

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

586

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

Санкт-Петербург
2017

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>

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 техн. наук А. А. Синькевич,
канд. физ.-мат. наук С. С. Чичерин,
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткина (секретарь редколлегии)

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

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

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

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

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

Editorial board

Dr. V. M. Kattsov, Dr. E. L. Genihovich, Dr. A. S. Zaitsev, Dr. I. L. Karol,
Dr. N. V. Kobysheva, Dr. V. P. Meleshko, Dr. A. V. Mescherskaya,
Dr. A. A. Sinkevich, 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 specialty.

© Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Главная геофизическая обсерватория
им. А.И. Воейкова»,
2017

СОДЕРЖАНИЕ

<i>В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев.</i> Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана. .	7
<i>М. П. Васильев, Е. В. Каширина, Е. В. Иванова.</i> Методология расчета погодно-климатических рисков в субъектах Российской Федерации с использованием реляционной базы данных.	21
<i>М. П. Васильев, А. А. Петерс.</i> Оценка погодно-климатических рисков для секторов экономики и социальной сферы на региональном уровне (на примере Краснодарского края).	34
<i>Е. Д. Надёжжина, А. В. Стернзат, Б. Н. Егоров, А. А. Пикалёва, И. М. Школьник.</i> Моделирование характеристик водного баланса в Центральной Азии.	65
<i>С. С. Байшоланов, В. Н. Павлова, Д. А. Чернов, М. С. Габбасова, А. Р. Жакиева.</i> Агроклиматические ресурсы западных земледельческих областей Казахстана.	80
<i>А. М. Абшаев, М. Т. Абшаев, А.Х. Аджиев, Я. А. Садыхов, А. Б. Чочаев, А. А. Синькевич, Ю. П. Михайловский.</i> Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках.	93
<i>А. В. Снегуров, В. С. Снегуров.</i> Система местоопределения гроз.	117
<i>В. В. Мелентьев.</i> Пассивная СВЧ радиометрия от момента возникновения до современных спутниковых исследований.	141

<i>М. В. Жарашуев, В. С. Макитов, А. Х. Кагермазов, Д. Д. Кулиев. Метод калибровки локаторов сети штормооповещения.</i>	164
<i>О. Г. Анискина, О. В. Волобуева, С. В. Мостаманди, Н. А. Новикова, В. С. Рябинин. Оценка прогнозов снегопадов, составленных с помощью модели WRF на Северо-Западе Европейской части России.</i>	175
<i>М. А. Маддах, И. Н. Русин, А. М. Ахунд-Али. Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана. ...</i>	191
<i>Л. В. Луцько, А. Н. Махоткин, А. Е. Ерохина, А. П. Бычкова. О методике контроля данных о составляющих радиационного баланса, получаемых на сети Росгидромета по программе регистрации.</i>	205
<i>О. В. Волобуева, И. В. Кок, Н. А. Новикова. Использование метода Д. Н. Лаврищева для прогноза радиационных туманов на аэродроме Усть-Каменогорск.</i>	234
<i>С. В. Морозова. О возможной роли облачности в настоящих климатических изменениях.</i>	251

CONTENTS

<i>Kattsov V. M., Porfiriev B. N.</i> Adaptation of Russia to climate change: a concept of the national plan.	7
<i>Vasilev M. P., Kashirina E.V., Ivanova E.V.</i> Methodology of the weather and climate related risk assessment in the subjects of Russian Federation with the use of relational data base.	21
<i>Vasilev M. P., Peters A. A.</i> Assessment of the weather and climate related risks for economy and social sphere at the regional level: the case of Krasnodar Krai.	34
<i>Nadyozhina E. D., Sternzat A. V., Egorov B. N., Pikaleva A. A., Shkolnik I. M.</i> Modeling of water balance components in the Central Asia region.	65
<i>Baisholanov S. S., Pavlova V. N., Chernov D. A., Gabbasova M. S., Zhakieva A. R.</i> Agroclimatic resources of the western agricultural regions of Kazakhstan.	80
<i>Abshayev A. M., Abshayev M. T., Adzhiev A. Kh., Sadykhov Ya. A., Chochaev A. B., Sinkevich A. A., Mikhailovskiy Yu. P.</i> Analysis of the development and interaction of cells in storm clouds.	93
<i>Snegurov A. V., Snegurov V. S.</i> Lightning location system.	117
<i>Melentyev V. V.</i> Passive microwave radiometry from beginning to the contemporary satellite investigations.	141
<i>Zharashuev M. V., Makitov V. S., Kagermazov A. Kh., Kallie D. D.</i> The method of calibration of the locators, the network alert of storm.	164
<i>Aniskina O. G., Volobueva O. V., Mostamandi S. V., Novikova N. A., Ryabinin V. S.</i> Forecast of snowfall evaluations, arranged by using of WRF model in the north-west of the European Russia.	175

<i>Rusin I. N., Maddah M. A., Ahund-Ali A. M.</i> Evaluation of WRF physical parameterizations in simulating heavy rainfall events in southwestern Iran.	191
<i>Lutsko L. V., Makhotkin A. N., Erokhina A. E., Bychkova A. P.</i> On the method of monitoring data on the radiation balance components received on the Roshydromet network under the registration program.	205
<i>Volobueva O. V., Kok I. V., Novikova N. A.</i> Using of the method of D.N Lavrishchev for forecasting of radiation fogs at the airdrome of Ust Kamenogorsk.	234
<i>Morozova S. V.</i> On the possible role of clouds in climate change present.	251

АДАПТАЦИЯ РОССИИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА: КОНЦЕПЦИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО ПЛАНА¹

В. М. Катцов¹, Б. Н. Порфирьев²

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

² Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН
117418 Москва, Нахимовский пр., 47

Поступила в редакцию 27.07.2017

1. Введение

Адаптация к изменениям климата на государственном уровне — это система мер политического, законодательного, нормативно-правового, экономического, социального характера, осуществляемых федеральными органами исполнительной власти и органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации и

¹ Концепция планирования адаптации населения и экономики страны к изменениям климата и их последствиям разработана авторами по поручению А. И. Бедрицкого, советника Президента Российской Федерации — специального представителя Президента Российской Федерации по вопросам климата в феврале 2017 г., и принята Минэкономразвития России, уполномоченным Правительством Российской Федерации на подготовку национального плана адаптации, в качестве проекта концепции такого плана. В настоящее время — июль 2017 г. — проект Концепции проходит общественное обсуждение. В. М. Катцов выполнял эту работу в рамках и за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00063). Б. Н. Порфирьев выполнял эту работу при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-06-08163).

направленных на уменьшение уязвимости системы обеспечения национальной безопасности страны, субъектов экономики и граждан к последствиям изменений планетарного климата, климата на территории Российской Федерации, на территориях соседних государств и на прилегающих к ним акваториях Мирового океана, а также на использование благоприятных условий, обусловленных указанными изменениями.

Целью настоящего документа является определение содержания и общих подходов к государственной организации в Российской Федерации разработки и реализации планов адаптации к текущим и ожидаемым изменениям климата. Разработка таких планов предусмотрена Климатической доктриной Российской Федерации и международными соглашениями в области изменений климата, прежде всего статьей 7 Парижского соглашения по реализации Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК), одобренного Российской Федерацией в ходе 21-й сессии Конференции сторон РКИК в декабре 2015 года.

Концепция планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата (далее — Концепция) определяет цели, задачи, уровни, принципы, этапы и приоритеты планирования, осуществления, контроля (мониторинга, отчетности и проверки) и анализа результатов, а также корректировки принятых мер адаптации в разрезе регионов и отраслей экономики.

Концепция разработана в соответствии с положениями Климатической доктрины Российской Федерации, утвержденной распоряжением Президента Российской Федерации № 861-рп от 17 декабря 2009 г. Потребность в планировании адаптации Российской Федерации к изменениям климата в интересах устойчивого развития страны определяется также рядом других государственных решений и документов, в том числе:

- Комплексным планом реализации Климатической доктрины Российской Федерации до 2020 года, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации № 730-р от 25 апреля 2011 г.;

- Водной стратегией Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ № 1235-р от 27 августа 2009 г.;
- Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной совместным приказом Минпромторга России № 248 и Минсельхоза России № 482 от 31 октября 2008 г.;
- Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной указом Президента Российской Федерации № 120 от 30 января 2010 г.;
- Стратегией деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата), утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1458-р от 3 сентября 2010 г.;
- другими документами².

Научным обоснованием настоящей Концепции являются оценочные доклады Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008 и 2014 гг.).

2. Современное состояние адаптации к изменениям климата в Российской Федерации и международный контекст

Погодно-климатический фактор затрагивает в той или иной степени сферу интересов практически любой отрасли экономики и социальной сферы Российской Федерации. Планирование и осуществление многих крупных инвестиционных проектов в значительной мере чувствительны к вопросам учета указанного фактора и требуют значительных усилий для того, чтобы реализуемые

² Некоторые государственные документы, имеющие отношение к планированию адаптации, были приняты после подготовки настоящего проекта Концепции, в том числе — Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утверждена указом Президента Российской Федерации № 176 от 19 апреля 2017 г.).

меры были экономически эффективны и одновременно способствовали бы снижению рисков и смягчению последствий изменяющегося климата, обеспечивая социальную и экологическую безопасность.

До настоящего времени эти усилия сосредоточиваются преимущественно на снижении рисков климатических изменений за счет снижения техногенных выбросов парниковых газов, тогда как адаптация к изменениям климата не входит в число текущих национальных приоритетов развития и приоритетов развития бизнеса. Принятые кратко- и среднесрочные программы развития большинства секторов экономики и регионов Российской Федерации не содержат мер адаптации к изменениям климата, либо предусматривают лишь меры реагирования на чрезвычайные ситуации, обусловленные последствиями резких погодно-климатических перемен.

Помимо прямого воздействия на экономику и население Российской Федерации погодно-климатический фактор оказывает существенное влияние на систему международных торгово-экономических и политических отношений. Вышеупомянутое Парижское соглашение 2015 года зафиксировало выход проблемы адаптации к изменениям климата на передний план международного переговорного процесса. В тексте этого документа адаптация к последствиям изменения климата впервые рассматривается как не менее важный аспект, чем сокращение выбросов парниковых газов. Парижское соглашение устанавливает общую цель в рамках адаптации. Вопрос ущерба и убытков признан официально и решается в рамках необходимого сотрудничества. Соглашение требует от всех стран наличия и представления национальных планов по адаптации. Во многих странах, включая Россию, таких планов пока нет. Это требование предполагает ряд скорейших практических шагов. В соглашении подчеркивается, что адаптация является глобальным вызовом, у которого есть локальное, субнациональное, национальное, региональное и международное измерения.

В последнее десятилетие мировое сообщество уделяет все большее внимание методам разработки адаптационных мер к изменению и изменчивости климата и разработке национальных планов адаптации.

Эти планы значительно отличаются друг от друга в зависимости от уровня развития стран, приоритетов государственной политики в области изменения климата, степени подверженности экономики и социальной сферы погодно-климатическим рискам.

В то же время им присущи общие черты и подходы, которые целесообразно (там, где это уместно) использовать (учитывать) при разработке планов адаптации в Российской Федерации. Одной из этих черт является опора планов адаптации и в целом национальных и региональных стратегий адаптации к изменениям климата на развитую базу знаний и базу данных, пополняемых и обогащаемых благодаря развитию национальных климатологических научных центров, систем погодно-климатического мониторинга и прогноза, которые интегрируются в Глобальную рамочную основу климатического обслуживания (ГРОКО). Последняя активно развивается в настоящее время в системе ООН при лидирующей роли Всемирной метеорологической организации (ВМО).

3. Цель и задачи планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата

Основная цель планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата заключается в снижении уязвимости населения, хозяйственных систем, сил и средств национальной безопасности к последствиям климатических изменений путем реализации комплекса организационно-управленческих, производственно-технологических и специальных мер в рамках федеральных и региональных стратегий и программ социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности.

Задачи планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата включают:

- научное обеспечение процесса разработки и принятия органами государственной власти и хозяйствующими субъектами решений, направленных на повышение уровня безопасности (защищенности жизненно важных интересов личности, общества и

государства) от последствий изменений климата для населения и экономики, включая опасные природные явления и чрезвычайные ситуации природного характера;

- реализацию решений, обеспечивающих повышение уровня безопасности личности, общества и государства от вышеупомянутых последствий изменения климата, и значительное сокращение потерь и ущерба экономике страны от опасных погодно-климатических явлений;

- получение дополнительных выгод от благоприятного развития погодно-климатических процессов, существенное увеличение экономического эффекта в отраслях экономики от использования информации о состоянии окружающей среды;

- актуализацию стратегий развития видов экономической деятельности и секторов экономики с учетом степени зависимости от погодно-климатических изменений и потребностей в адаптации к указанным изменениям, и обеспечение их реализации в рамках государственных целевых программ и инвестиционных проектов, а также проектов и программ частно-государственного партнерства;

- снижение рисков внешнеэкономической деятельности путем разработки и осуществления мер защиты российских товаропроизводителей от недобросовестных действий зарубежных партнеров по ограничению их конкурентоспособности под предлогом несоответствия требованиям климатической безопасности (адаптация к косвенным последствиям климатических изменений);

- обеспечение выполнения обязательств Российской Федерации по РКИК ООН, в том числе по Парижскому соглашению (2015 г.) в случае его ратификации; полноценное участие Российской Федерации в построении Глобальной рамочной основы климатического обслуживания (ГРОКО) и создание национального сегмента ГРОКО.

4. Уровни и принципы планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата

Подготовка и реализация в Российской Федерации планов адаптации к изменениям климата осуществляется на общенациональном (федеральном) и региональном уровнях. На федеральном уровне уполномоченными органами исполнительной власти Российской Федерации разрабатываются и реализуются: общенациональный план адаптации (НПА), планы адаптации систем обеспечения национальной безопасности страны (включая оборону страны и гражданскую защиту); планы адаптации секторов национальной экономики, включая производственные комплексы и сферу услуг. На региональном уровне органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации разрабатываются и реализуются региональные планы адаптации, которые включают в себя планы действий местных (муниципальных) властей в рассматриваемой сфере.

Основные принципы организации планирования включают:

- дифференцированный подход, учитывающий: (а) природно-климатическую и социально-экономическую специфику адаптации различных секторов (сфер) экономики и регионов страны; (б) разную степень их готовности к разработке и реализации соответствующих планов; (в) разную эффективность мер адаптации на различных уровнях принятия решений (например, меры по снижению уязвимости наиболее подверженных опасным климатическим воздействиям объектов и территорий особенно эффективны на местном и региональном уровнях);
- стадийность и итеративность процесса планирования, подразумевающие наличие этапов разработки и реализации планов адаптации в виде последовательных приближений к гармонизации всех планов, синергизм их элементов, регулярную корректировку и дополнение планов адаптации новыми элементами;
- комплексность планирования, предполагающую: (а) разработку и реализацию мер превентивной (упреждающей)

адаптации, нацеленных на снижение рисков (ожидаемых последствий) климатических изменений (например, сооружение дамб от наводнений, лесозащитных полос, расширение посевов засухоустойчивых культур и т. д.), и мер (пост-) кризисной адаптации, предусматривающих смягчение последствий (снижение ущерба) реального опасного воздействия или чрезвычайной ситуации (например, эвакуацию, вакцинацию и временное расселение пострадавших от бедствия); (б) разработку и реализацию мер адаптации к прямым (реальным и ожидаемым) последствиям изменений климата для населения, экономики и государственного управления развитием России и мер адаптации к косвенным последствиям климатических изменений, проявляющихся в действиях зарубежных корпораций и /или государств или их групп по ограничению или ухудшению условий внешнеэкономической деятельности, или снижению конкурентоспособности российских товаропроизводителей;

- гармонизацию и интеграцию планов адаптации, предполагающие: (а) согласованность и взаимную дополняемость мер превентивной и (пост-) кризисной адаптации; (б) согласованность и взаимную дополняемость планов адаптации на федеральном и региональном уровнях;

- иерархию планирования, в том числе приоритет НПА, выполнению целей и задач которого подчинены другие федеральные, а также региональные планы адаптации, конкретизирующие и детализирующие НПА в соответствующих измерениях (разрезах);

- принцип обратной связи, предусматривающий организацию мониторинга и оценки эффективности реализации и, на этой основе, корректировку планов адаптации;

- надлежащее научное обеспечение прогнозирования климата и климатического обслуживания.

Ограниченность доступных ресурсов делает особо важной научно обоснованную количественную оценку и прогноз рисков и ущерба экономике с учетом отраслевой и территориальной специфики потребителя, что необходимо для принятия эффективных решений по адаптации на федеральном, региональном и местном уровнях. Выработка базовых подходов к способам и механизмам адаптации к изменению климата должна осуществляться на основе развития научных исследований погоды и климата, оценки уязвимости населения и секторов экономики регионов Российской Федерации к изменению климата и других практических мер, что предусмотрено распоряжением Правительства Российской Федерации № 730-р от 25 апреля 2011 г., которым утвержден «Комплексный план реализации Климатической доктрины Российской Федерации на период до 2020 года». Ключевым компонентом прогнозирования связанных с изменением климата угроз национальной безопасности, оценки рисков и выгод для экономики страны и ее территорий, а также способности адаптации к изменению климата является реализация Комплексного плана научных исследований погоды и климата (КПНИПК) в соответствии с Комплексным планом реализации Климатической доктрины Российской Федерации до 2020 года, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации № 730-р от 25 апреля 2011 г.

5. Основные направления планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата

Основными направлениями планирования адаптации к изменениям климата в Российской Федерации являются:

- повышение осведомленности федеральных органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, инвесторов, бизнес-сообществ, негосударственных некоммерческих организаций и населения о погодно-климатических рисках, текущих и ожидаемых

климатических воздействиях, возможных мерах реактивной и упреждающей адаптации в процессе осуществления организациями хозяйственной и иной деятельности на территории Российской Федерации;

- создание информационной базы для разработки целевых показателей принимаемых адаптационных мер по стране в целом и отдельным секторам экономики, а также для мониторинга и соблюдения этих показателей в ходе реализации государственной климатической политики и мер, направленных на адаптацию к текущим и ожидаемым изменениям климата;

- создание необходимых предпосылок для осуществления контроля за реализацией на территории Российской Федерации НПА, а также региональных и отраслевых планов адаптации с использованием механизмов государственной поддержки.

Необходимыми предпосылками для планирования адаптации, а также осуществления надлежащего контроля реализации планов адаптации являются:

- формирование в Российской Федерации необходимой нормативно-правовой, методической и институциональной базы для внедрения системы адаптации, отчетности и проверки эффективности принятых мер. Соответствующие документы должны устанавливать порядок подготовки и представления субъектами адаптации отчетов о мерах адаптации, порядок приемки и проверки представленных отчетов уполномоченными государственными органами исполнительной власти, а также ответственность субъектов адаптации за непредставление или несвоевременное представление отчетов о реализации планов адаптации, или представление недостоверных сведений о результатах их реализации;

- формирование необходимой нормативно-правовой, методической и институциональной базы для проведения независимой оценки (проверки) проектов адаптации, представленных к реализации с использованием механизмов

государственной поддержки, на соответствие требованиям, установленным законодательством Российской Федерации, а также для проверки и заверения сведений (отчетов) о результатах применения адаптационных мер в ходе реализации таких проектов для получения государственной поддержки. Соответствующие документы должны определять требования к квалификации экспертных организаций для осуществления указанных функций, порядок их аккредитации, приостановки и прекращения такой аккредитации в случае выявленных нарушений в деятельности экспертных организаций, а также ответственность независимых экспертных организаций и их руководителей за представление заведомо ложных заключений;

- разработка и утверждение методических рекомендаций по проведению инвентаризации и подготовке отчетности реализации планов адаптации в субъектах Российской Федерации.

6. Основные этапы и приоритеты планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата

Природно-климатическая и социально-экономическая специфика различных регионов страны и секторов (сфер) экономики обуславливает особенности их планов адаптации, которые могут существенно отличаться по набору мер снижения рисков изменений климата. Тем не менее, основные элементы плана адаптации, которые одновременно суть этапы планирования, не зависят от вышеупомянутой специфики и являются неизменными компонентами типового плана адаптации любого объекта (хозяйственного комплекса, вида экономической деятельности, территории), включая:

- анализ и оценку современных и будущих погодно-климатических рисков, в том числе: (а) текущего состояния климатической системы и сценариев будущих изменений климата; (б) подверженности и уязвимости объекта под риском; (в) допустимых значений рисков с учетом экономических и социальных факторов;

- оценку адаптационного потенциала, включая определение перечня сценариев (вариантов) адаптации, связанных с ними основных мер и располагаемых ресурсов, а также ограничений возможности (пределов) адаптации;

- оценку социально-экономической эффективности (соотношения затрат, рисков (потерь) и выгод) реализации конкретных сценариев адаптации, установление их приоритетов и выбор наилучшего сценария по этому критерию;

- составление детального плана адаптации, включая мониторинг и оценку хода и результатов реализации мероприятий, с учетом перечисленных выше принципов организации планирования и указанием конкретных мер, сроков исполнения, ответственных исполнителей, объемов и источников финансирования.

С учетом значительной неопределенности будущих климатических и социально-экономических условий в процессе планирования приоритет следует отдавать мерам адаптации, которые:

- наряду с проблемой снижения уязвимости к последствиям климатических изменений способствуют эффективному решению ключевых задач социально-экономического развития (снижение производственных издержек, сокращение вредных выбросов в окружающую среду, создание новых рабочих мест и т. д.), являясь, таким образом, беспроигрышными (win-win) мерами;

- используют успешный опыт адаптации экономики и общества к современной изменчивости климата как предпосылку адаптации к будущему климату;

- опираются на сценарии изменений климата, малочувствительные к точности прогнозных оценок указанных изменений, и используют методы управления и принятия решений, относительно устойчивые к неопределенности;

- обеспечивают интегрированное управление использованием природными ресурсами, тем самым обеспечивая его комплексный характер.

Особо перспективно и целесообразно использование при разработке планов адаптации экономически эффективных (бесприигрышных или малозатратных) мер снижения подверженности и уязвимости объектов инфраструктуры, включая обновление нормативных документов, мониторинг и контроль их выполнения, системы раннего предупреждения и страхование от природных рисков.

7. Реализация Концепции и Национальный план адаптации

Реализация настоящей Концепции осуществляется федеральными органами исполнительной власти и органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации в пределах их компетенции и во взаимосвязи с осуществлением других мероприятий, предусмотренных планом мероприятий.

Реализация этапов Концепции основывается на своевременной разработке и вводе в действие нормативных, правовых, методических и иных необходимых документов параллельно с созданием необходимых институциональных, организационных и организационно-технических предпосылок и финансового обеспечения деятельности, предусмотренной Концепцией.

Состав и объем работ, сроки их выполнения, а также необходимые средства для их финансирования определяются при подготовке мероприятий, обеспечивающих реализацию Концепции, в пределах бюджетных ассигнований, предусматриваемых заинтересованным федеральным органом исполнительной власти в федеральном бюджете на соответствующий финансовый год и плановый период.

На федеральном уровне реализация настоящей Концепции осуществляется в виде разработки Национального плана адаптации (НПА). Указанный процесс включает перечисленные выше основные этапы и элементы типового плана адаптации. Спецификой НПА является определение зон ответственности и участие конкретных министерств, ведомств и региональных властей в процессе подготовки

и осуществления адаптационных мер, а также гармонизация указанных мер в структуре НПА.

В условиях ограниченности времени, кадровых и финансовых ресурсов, необходимых для реализации эффективной адаптации в масштабах Российской Федерации, формирование исходных (т. е. подлежащих дальнейшей регулярной корректировке) НПА, а также региональных и отраслевых планов адаптации будет осуществляться в период 2017—2020 гг. поэтапно с постепенным охватом и вовлечением в нее различных регионов, секторов экономики и организаций. Целесообразной представляется организация на первом этапе (в течение 2017—2018 гг.) ограниченного числа пилотных проектов — разработки и начала реализации одного-двух планов адаптации на федеральном уровне (применительно к конкретным секторам экономики) и одного-двух планов на региональном уровне. При этом приоритет отдается регионам, уже проявившим интерес к этой работе, а также секторам экономики, по которым имеется определенный задел во взаимодействии с Росгидрометом.

Приобретенный в результате реализации указанных пилотных проектов опыт организации и межведомственного взаимодействия может быть в дальнейшем распространен на другие отрасли и регионы. Одновременно в 2017 году может быть запущен процесс подготовки первой версии НПА.

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

М. П. Васильев¹, Е. В. Каширина², Е. В. Иванова³

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

² Российский Государственный Педагогический
Университет им. А. И. Герцена,
кафедра компьютерной инженерии и программотехники
191186 Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 48.

³ Институт озерадения РАН (ИНОЗ РАН).
196105 Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9.
E-mail: mih.vasilev@mail.ru

Поступила в редакцию 4.09.2017
Поступила после доработки 6.10.2017

Введение

Проблемы идентификации, оценки и управления погодно-климатическими рисками являются чрезвычайно актуальными в условиях меняющегося климата. Этим вопросам посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ (Порфирьев и др., 2011; IPCC, 2012; Martinez et al., 2012; Di Mauro, 2014; Второй оценочный доклад ..., 2014; Кобышева и др., 2015 и др.). Однако до настоящего времени не существует единого универсального подхода к решению этой проблемы. Как показывает международный опыт, для объективной количественной оценки погодно-климатических рисков необходимо создание баз данных о социально-экономических показателях на рассматриваемой территории, об опасных гидрометеорологических явлениях (ОЯ), неблагоприятных

гидрометеорологических явлениях (НГЯ) и аномальных климатических условиях (АКУ), а также ущербах, соотнесенных с интенсивностью этих явлений; причем эти соотношения значительно различаются в зависимости от природных и социально-экономических условий. Поэтому стоит вопрос о путях создания таких баз на локальном и национальном уровне. В данной работе для расчета погодно-климатических рисков было предложено две методики, основанные на вероятностном анализе данных многолетних наблюдений за опасными явлениями и экономическими характеристиками субъектов РФ.

1. Описание исходных данных и методов расчета

Для анализа характеристик опасных гидрометеорологических явлений использовался массив данных результатов наблюдений за опасными явлениями, полученный с сайта ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/data>). Этот массив содержит описание характеристик ОЯ и НГЯ, сведения о количестве и интенсивности опасных явлений, наблюдавшихся с 1991 года по настоящее время в субъектах Российской Федерации и нанесших экономический ущерб. Социально-экономические показатели для субъектов РФ были взяты на сайте Федеральной службы государственной статистики «Регионы России. Социально-экономические показатели».

Для получения обобщенной оценки погодно-климатического риска от опасных явлений для экономики конкретного субъекта РФ использовался подход, предложенный в (Кобышева и др., 2015):

$$R_{\text{эк}} = \Sigma p_{\text{оя}} \times \rho_{\text{нас.}} \times \text{ВРП}, \quad (1)$$

где $R_{\text{эк}}$ — обобщенный экономический риск от ОЯ в субъекте РФ,

$\Sigma p_{\text{оя}}$ — сумма повторяемостей опасных гидрометеорологических явлений, наблюдаемых в данном субъекте РФ и нанесших ущерб его экономике,

$\rho_{\text{нас}}$ — плотность населения в субъекте РФ,

ВРП — валовый региональный продукт субъекта РФ.

Оценка доли риска для конкретного сектора экономики в данном субъекте проводилась по формуле (2):

$$R_{\text{эк.сектор}} = \Sigma p_{\text{оя/сектор}} \times S_{\text{ВРП/сектор}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{эк.сектор}}$ — доля риска для экономического сектора, %;

$\Sigma p_{\text{оя/сектор}}$ — сумма повторяемостей опасных гидрометеорологических явлений, нанесших ущерб данному сектору экономики,

$S_{\text{ВРП/сектор}}$ — доля ВРП, приходящаяся на данный сектор в субъекте РФ.

Отбор опасных явлений, наиболее значимых для различных секторов экономики, был выполнен на основе анализа большого числа работ по данной тематике (Зябриков и др., 2000; Энциклопедия..., 2005; Руководство..., 2008; Effects of Climate Change...2008; Economic Evaluation of Climate Change Impacts..., 2015), нормативных документов, содержащих климатические характеристики (СП 131.13330.2012. Строительная климатология; СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия; СП 34.13330.2012. «СНиП 2.05.02-85*Автомобильные дороги» и др.), и данных об ущербах от ОЯ в экономических секторах.

2. Описание модели данных и программных технологий вычисления климатических рисков

Для расчетов была создана реляционная база данных с использованием СУБД Microsoft SQL Server 2014 Express. В реляционной базе данные представлены в виде некоторого множества таблиц различной структуры, связанных между собой. Каждая таблица имеет первичный ключ — один или несколько столбцов, значения данных в которых не повторяются. Это означает, что значение первичного ключа однозначно определяет строку таблицы. Для установления связи между двумя таблицами в одну из них добавляется внешний ключ — один или несколько столбцов, значения данных в которых повторяют значения первичного ключа

другой таблицы. Таблица, в которую добавлен внешний ключ, называется дочерней (или потомком). Таблица, на первичный ключ которой ссылается внешний ключ дочерней таблицы, называется родительской.

База данных для расчетов климатических рисков состоит из 8-ми базовых таблиц (рис. 1), в которых содержатся основные данные, используемые для расчетов.

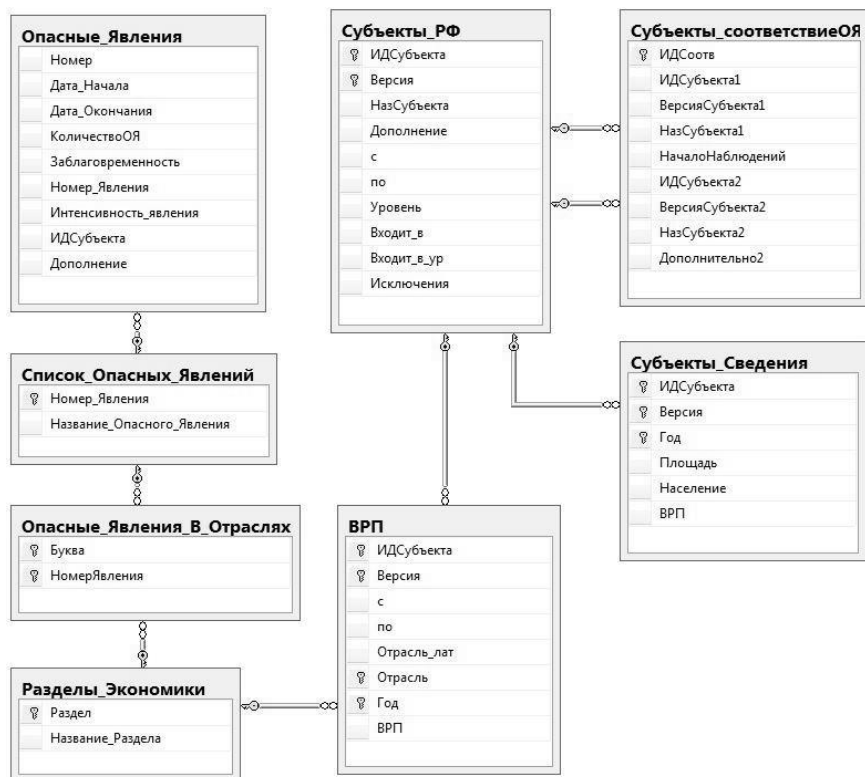


Рис. 1. Структура реляционной базы данных для расчета погодно-климатических рисков.

Таблицы *Разделы_Экономики*, *Субъекты_РФ* и *Список_Опасных_Явлений* являются независимыми справочниками и содержат названия отраслей экономики, названия субъектов Российской Федерации, а также перечень наблюдаемых опасных явлений. Эти таблицы являются родительскими по отношению к остальным таблицам базы данных. Таблица *Опасные_Явления* содержит сведения о количестве различных опасных явлений, наблюдавшихся в разные годы в субъекте РФ. Эта таблица является дочерней по отношению к таблицам *Субъекты_РФ* и *Список_Опасных_Явлений*. Таблица *Опасные_Явления_В_Отраслях* содержит сведения об опасных явлениях, способных нанести ущерб в той или иной отрасли экономики. Таблица *ВРП* содержит данные по субъектам, отраслям экономики и годам о доле валового регионального продукта, приходящейся на каждую отрасль и выраженной в процентах. Таблица *Субъекты_Сведения* содержит данные по субъектам и годам (без разбивки по отраслям экономики) о ВРП, выраженном в рублях, а также сведения о площади субъектов и численности населения. Эти три таблицы также являются дочерними по отношению к вышеназванным родительским таблицам.

Для вычислений используются специальные команды (запросы) языка SQL, предназначенного для работы с реляционными базами данных. Результаты запросов являются виртуальными таблицами, называемыми представлениями. Представления наполняются данными только в процессе вычислений. Такой подход позволяет избежать ошибок при изменениях исходных данных, поскольку не требуется вносить коррективы в данные на промежуточных этапах вычислений. Использование представлений наряду с базовыми таблицами позволило реализовать поэтапные вычисления погодноклиматических рисков по описанным выше методикам.

Диаграммы взаимодействия представлений и базовых таблиц при расчете погодноклиматических рисков по формулам (1) и (2) представлены на рисунках 2 и 3. На рисунках видно, что в том и в другом случае вычисления производятся в три этапа. При получении обобщенной оценки риска для субъекта РФ (рис. 2) на первом этапе вычисляется вероятность ОЯ по субъектам с использованием двух

базовых таблиц: *Опасные явления* и *Список опасных явлений*. На втором этапе на основе полученных данных и базовой таблицы *Субъекты_Сведения* вычисляются погодно-климатические риски для экономики субъектов РФ, выраженные в абсолютных величинах.

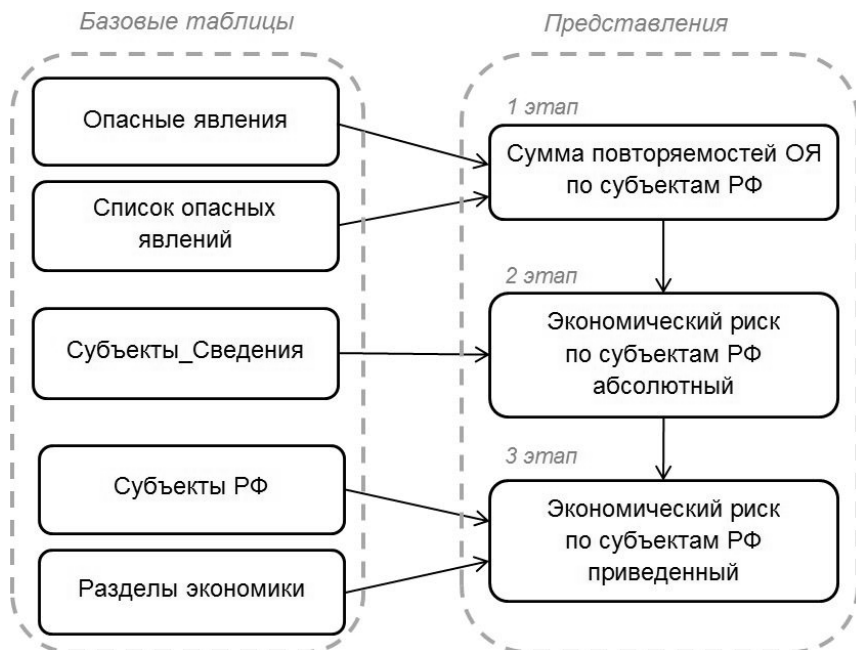


Рис. 2. Диаграмма взаимодействия представлений и базовых таблиц при расчете погодно-климатических рисков по формуле 1.

На третьем этапе вычисляются риски, нормированные на максимальное значение для субъектов РФ, а также осуществляется подстановка полных названий субъектов и отраслей экономики с использованием соответствующих базовых таблиц.

При расчете долей рисков для отдельных секторов экономики (рис. 3) на первом этапе для вычисления повторяемостей опасных явлений, значимых для конкретных отраслей, используются данные трех базовых таблиц: *Опасные явления*, *Список опасных явлений* и

Опасные явления в отраслях. На втором этапе вычисляются доли рисков отраслей экономики в субъектах РФ. На третьем этапе значения погодно-климатических рисков переводятся в проценты. Коды субъектов РФ и обозначения отраслей экономики заменяются на их полные названия с использованием соответствующих базовых таблиц.

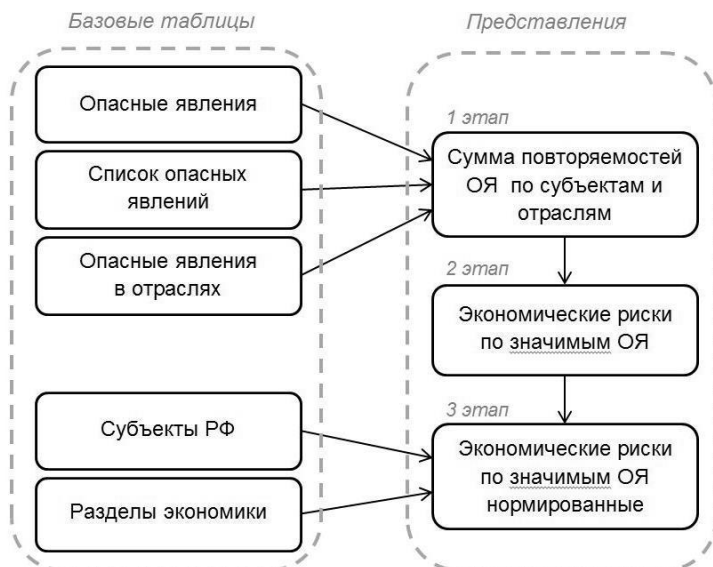


Рис. 3. Диаграмма взаимодействия представлений и базовых таблиц при расчете погодно-климатических рисков по формуле 2.

3. Анализ полученных результатов

На основе обобщенных оценок погодно-климатических рисков для экономики субъектов РФ, полученных по формуле (1), была построена карта, демонстрирующая относительное распределение величины рисков по территории страны (рис. 4). Значения рисков выражены в долях единицы. Так как величина картируемой характеристики очень сильно варьирует по территории России, было принято решение о

выборе неравномерной шкалы величин. Границы между градациями значений рисков были определены с помощью кластерного анализа (алгоритма Прима-Краскала) (напр. Миркин, 2011). В его основе лежит статистический анализ «скачков» между соседними значениями в ранжированном ряду величин. С помощью алгоритма Прима-Краскала была построена кратчайшая связывающая сеть (КСС), элементами которой являлись разности значений погодноклиматических рисков в субъектах РФ. Затем КСС разбивалась по наиболее длинным звеньям в соответствии с подходом, рассмотренным в работе Е. М. Акентьевой (1999). Получаемые при этом участки сети можно рассматривать в качестве районов, относительно однородных по величине рисков.

Как следует из рис. 4, максимальные значения рисков характерны для Москвы, Санкт-Петербурга, Московской области и Краснодарского края. Эти субъекты являются наиболее густонаселенными и экономически развитыми субъектами РФ, в которых при этом отмечается и значительное число ОЯ и НГЯ. Вес климатической составляющей риска особенно велик в Краснодарском крае. К территориям с очень большими значениями погодноклиматических рисков относятся также республика Татарстан, Самарская и Кемеровская области. Наименьшие относительные значения погодноклиматических рисков отмечаются на севере и северо-востоке РФ. Причиной этого является, прежде всего, значительно меньшая плотность населения в этих регионах.

Однако надо отметить, что в данной работе речь идет о значениях рисков, осредненных по территории субъектов, которые имеют весьма большую площадь и характеризуются значительной физико-географической и социально-экономической неоднородностью. Для более детальной оценки погодноклиматических рисков для экономики этих субъектов РФ необходимо проведение районирования на основе более мелкого административно-территориального деления. При этом риски в отдельных муниципальных образованиях могут во много раз превышать средние значения для субъекта. Такая работа в дальнейшем будет выполнена с использованием расширенной базы данных о погодноклиматических рисках.

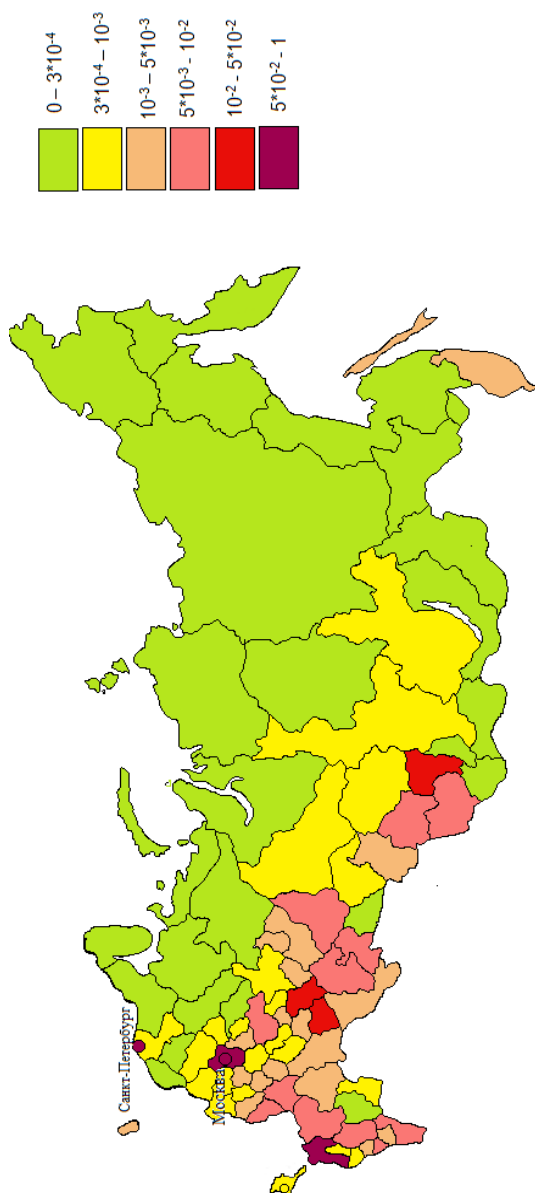


Рис. 4. Карта погодно-климатических рисков для экономики субъектов РФ.
Величина риска выражена в долях единицы.

Расчеты по формуле (2) позволили оценить долю рисков, приходящуюся на отдельные экономические сектора. Выделение секторов было проведено в соответствии с Общероссийским классификатором видов экономической деятельности (ОКВЭД). Для субъектов РФ были построены диаграммы, отражающие распределение погодно-климатических рисков для секторов экономики в данном субъекте. Примеры таких диаграмм для Ханты-Мансийского округа и для Хабаровского края представлены на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Распределение погодно-климатических рисков для секторов экономики Ханты-Мансийского округа.

Наибольшие риски на территории Ханты-Мансийского АО отмечаются для добывающей промышленности. Это связано как со значительной долей ВРП, приходящейся на данную отрасль в этом округе, так и с высокой повторяемостью ОЯ и НГЯ, воздействующих на процессы добычи полезных ископаемых (опасный ветер, опасная метель, чрезвычайная пожароопасность, аномально низкая температура, гроза, продолжительный дождь). Значительные риски в

этом субъекте РФ характерны также для торговли и сферы услуг, транспорта, строительства.



Рис. 6. Распределение погодно-климатических рисков для секторов экономики Хабаровского края.

В экономике Хабаровского края наряду с торговой деятельностью и сферой услуг большой вклад в создание ВРП вносит железнодорожный транспорт — Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали, которые связывают Хабаровск с городами Дальнего Востока и центра Российской Федерации. Важная роль принадлежит также речному и морскому сообщению. Для функционирования торговли и сферы услуг наибольшие риски связаны с экстремальными температурами, высокими скоростями ветра, ливнями, наводнениями. Наибольшие ущербы в транспортном секторе Хабаровского края вызываются продолжительными дождями, паводками, гололедом, метелями, туманом, а также штормами. Сочетание вкладов социально-экономических и метеорологических факторов создает картину распределения погодно-климатических рисков, представленную на рис. 6.

Заключение

Создание реляционной базы данных, включающей как погодноклиматические, так и социально-экономические характеристики субъектов РФ, позволило создать инструмент автоматизированной оперативной оценки погодноклиматических рисков от ОЯ и НГЯ как в целом для экономики субъектов РФ, так и долей рисков, приходящихся на отдельные экономические сектора в этих субъектах. Полученные оценки нельзя считать окончательными. По мере уточнения и обновления применяемых в расчетах исходных данных, а также включения более подробной информации о характеристиках ОЯ и НГЯ (охвата территории, длительности и т. д.) будут уточняться и оценки погодноклиматических рисков. Кроме того, рассматриваемые в данной работе риски от ОЯ и НГЯ можно отнести к категории прямых. Очевидно, что методика оценки косвенных рисков будет иметь отличия от описанных в данной работе и потребует большего количества исходных данных. Реализация новых расчетных методик потребует разработки дополнительных представлений на языке SQL, однако существенно не затронет уже существующую структуру базы данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агентьева Е. М. (1999). Мезоклиматическое районирование территории административных областей с использованием кластерного анализа. // Труды ГГО. Вып. 547. С. 119—127.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. (2014) — М.: Росгидромет. 59 с.

Зябриков В. А., Кобышева Н. В., Циркунов В. С. (2000). Климат и железнодорожный транспорт. — М.: Метеоагентство Росгидромета. 187 с.

Кобышева Н. В., Агентьева Е. М., Галюк Л. П. (2015). Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. — СПб: «Кириллица». 214 с.

Миркин Б. Г. (2011). Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: обзор. — М.: «Высшая школа экономики». 88 с.

Порфирьев Б. Н., Катцов В. М., Розинко С. А. (2011). Изменения климата и международная безопасность. — Москва: Д'АРТ. 290 с.

ПУЭ 7. (2015) Правила устройства электроустановок / Издание 7 — М.: Минстрой России.

Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами (2008) / Под редакцией Н. В. Кобышевой. — СПб: Астерион. 336 с.

СП 131.13330.2012. (2012). Строительная климатология. Building climatology. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* — М.: Минстрой России. 112 с.

СП 20.13330.2016. (2016) Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. — М.: Минстрой России. 104 с.

СП 34.13330.2012. (2012). «Автомобильные дороги» СНиП 2.05.02-85* — М.: Минрегион России. 111 с.

Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации (2005). / Под ред. Н. В. Кобышевой, К. Ш. Хайруллина. — СПб: Гидрометеиздат. 319 с.

Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes 1970—2012. WMO-№ 1123.

Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria (2015) / Editors: Steininger, K.W., König, M., Bednar-Friedl B., Kranzl L., Loibl W., Prettenhaler F. (Eds.) — Springer International Publishing Switzerland. 473 p.

Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States (2008). — U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 4.5.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge. UK and New York: Cambridge University Press. 582 p.

Di Mauro M. (2014). Quantifying risk before disasters occur: hazard information for probabilistic risk assessment. Risk Knowledge Section, United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). // Bulletin WMO. Vol. 63 (2). P. 36 M.42

Hemming R. D., Malone L., Bermudez N., Cockfield G., Diongue A., Hansen J., Hildebrand A., Ingram K., Jakeman G., Kadi M., McGregor G. R., Mushtaq S., Rao P., Pulwarty R., Ndiaye O., Srinivasan G., Seck Eh., White N., Zougmore R. (2012). Improving Climate Risk Management at Local Level — Techniques. Case Studies. Good Practices and Guidelines for World Meteorological Organization Members. DOI: 10.5772/51554

**ОЦЕНКА ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ ДЛЯ
СЕКТОРОВ ЭКОНОМИКИ И СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ
НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ
(НА ПРИМЕРЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ)**

М. П. Васильев, А. А. Петерс

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

Поступила в редакцию 6.09.2017
Поступила после доработки 11.11.2017

**Определение понятия и методики оценки
погодно-климатического риска и его составляющих**

Погодно-климатический риск определяется как произведение вероятности конкретной метеорологической опасности на вероятность уязвимости реципиента, который может оказаться подверженным этой опасности; выражается в долях единицы или процентах (МГЭИК, 2014). Риск существует, если на данной территории наблюдаются опасные или неблагоприятные метеорологические явления и присутствует некий объект (реципиент риска), находящийся под их вероятным воздействием и уязвимый к ним. В качестве реципиента риска может выступать население, территории, отрасли экономики, технические объекты и процессы, экосистемы. Анализ погодно-климатических рисков направлен на выявление различных видов риска, их количественное определение и прогноз их взаимодействия с антропогенной средой. Данный анализ выполняется в несколько этапов: идентификация риска, количественная оценка риска и прогноз риска, управление рисками.

В общем виде погодно-климатический риск P может быть определен по формуле, учитывающей повторяемость (p) опасного

(ОЯ) или неблагоприятного (НГЯ) гидрометеорологического явления и уязвимость объекта, подвергающегося воздействию опасного природного явления (Y), приведенной в (Кобышева и др., 2015):

В соответствии с определением МГЭИК уязвимость — это предрасположенность к неблагоприятному воздействию. Понятие уязвимости охватывает разнообразные концепции, включая чувствительность или восприимчивость к ущербу и отсутствие способности справляться с проблемой и адаптироваться. Главными факторами, определяющими уязвимость территорий, являются существующие экологические и социальные условия, а также состояние инфраструктуры. При таком подходе характеристика подверженности объекта включается в величину уязвимости.

Применяемый в данной работе косвенный метод оценки уязвимости территории к опасным явлениям основан на зависимости уязвимости от степени развития территории, подвергшейся бедствию. Чем более развита экономика, тем больше населения проживает на ней и тем больший ущерб возникает при прохождении через нее ОЯ. Уязвимость также зависит от географических и климатических особенностей территории, формирующих определенные характеристики ОЯ (Кобышева и др., 2015). В соответствии с этим подходом уязвимость может быть выражена следующим образом:

$$Y = \left(\frac{S}{S} \right) \cdot m \cdot t_{\text{ср}} \cdot K \quad (1)$$

Y — уязвимость от ОЯ или НГЯ,

s — средняя площадь воздействия данного явления (км^2),

S — площадь административной области (км^2),

m — численность населения административной области (чел.),

$t_{\text{ср}}$ — время действия ОЯ или НГЯ (сут.),

K — коэффициент агрессивности явления.

Основой механизма управления риском является определение ущерба, создаваемого опасным событием. Ориентировочно экономический ущерб от ОЯ может быть выражен через долю ВРП, приходящуюся на жителей охваченного ОЯ района. В соответствии с

международными нормами предполагается, что во время опасного гидрометеорологического явления экономическая деятельность невозможна в полном объеме и ВРП не производится. Совокупный ущерб на данной территории может быть назван экономическим риском ($P_э$):

$$P_э = A \cdot p \cdot Y, \quad (2)$$

где A — доля ВРП (руб.), приходящаяся на одного жителя данной административной области. При наличии соответствующей информации целесообразно также принимать во внимание среднюю заработную плату или стоимость доли основных производственных фондов, приходящихся на одного жителя данной административной области.

При таком подходе может быть ориентировочно определена нижняя граница возможного ущерба от данного ОЯ в исследуемом районе. Однако реальные ущербы обычно превышают оценки, полученные на основе ВРП. Поэтому при наличии данных о величине ущербов, они должны включаться в расчет экономического риска.

Социальный риск определяется на основе сопоставления повторяемости ОЯ и социальной уязвимости населения.

$$P_{соц} = p \cdot Y_{соц}, \quad (3)$$

В соответствии с подходом, представленным в работах (World Risk Report, 2014; Кобышева и др., 2015), при оценке социальной уязвимости наиболее важным является учет возрастной структуры населения, уровень доходов, качество жилищных условий, уровень здравоохранения. Поэтому для расчета социальной уязвимости в муниципальных образованиях использовались данные о

- доле нетрудоспособного населения,
- средней зарплате,
- доле населения, живущего в ветхом и аварийном жилье,
- доле населения с доходами ниже прожиточного минимума,
- количестве врачей и больничных коек на тысячу населения.

Чтобы указанные показатели могли быть сравнимы, они выражались в долях единицы. За единицу были приняты

максимальные значения соответствующих показателей на территории Краснодарского края. В расчетах использовались социально-экономические показатели для муниципальных образований Краснодарского края, помещенные на сайте Федеральной службы государственной статистики «Регионы России. Социально-экономические показатели».

Идентификация существующих погодно-климатических рисков на территории Краснодарского края

Краснодарский край является важнейшим сельскохозяйственным регионом РФ. За счет производства сельскохозяйственной продукции и ее переработки создается около 25 % ВРП. Сфера услуг и туризм обеспечивают 33 % ВРП, строительство и транспорт — по 15%. Остальные сектора экономики в сумме производят 12 % ВРП. Городское население в крае составляет около 55 %, что заметно ниже, чем в среднем по РФ (75 %).

Территория края разделяется на две резко отличающиеся в физико-географическом и климатическом отношении части: северную равнинную и южную горную. Равнинная зона — Прикубанская низменность — занимает две трети территории. Здесь расположена большая часть сельскохозяйственных земель и основные промышленные объекты по переработке сельхозпродукции. Южная зона образована системами хребтов Западного Кавказа, примыкающей к ним полосой предгорий и узкой лентой Черноморского побережья, где расположено большинство рекреационных и туристических объектов, а также наиболее развитая портовая инфраструктура.

Краснодарский край является одним из районов РФ, наиболее подверженных воздействию ОЯ и НГЯ. Повторяемость чрезвычайных ситуаций, связанных с природными явлениями, здесь превышает 7 ЧС в год. На равнинной территории основную опасность представляют гидрометеорологические явления, наносящие ущерб сельскому хозяйству — засухи, пыльные бури, град, ливневые осадки. Значительные риски для хозяйственной инфраструктуры этой части Краснодарского края, а также экологические риски связаны с

прорывом противопаводковых дамб (особенно в районе Краснодарского водохранилища), мелководьем на реках (постоянное пересыхание малых рек и периодическое — средних), очень высокой антропогенной нагрузкой на местные водные ресурсы (более 5000 тыс. человек на 1 км³ воды). В горных и предгорных районах основные погодно-климатические риски обусловлены лавинами, селями, оползнями из-за сильных дождей. В прибрежной полосе основную опасность представляют высокие скорости ветра, штормы, смерчи, экстремальные гололедно-изморозевые отложения и снеговые нагрузки.

В таблице 1 представлено суммарное количество различных ОЯ, соответствующих критериям, установленным Росгидрометом (РД 52.04.563—2013). За период 1997—2015 гг. на 36 метеостанциях и постах Краснодарского края было зарегистрировано 1498 опасных гидрометеорологических явлений.

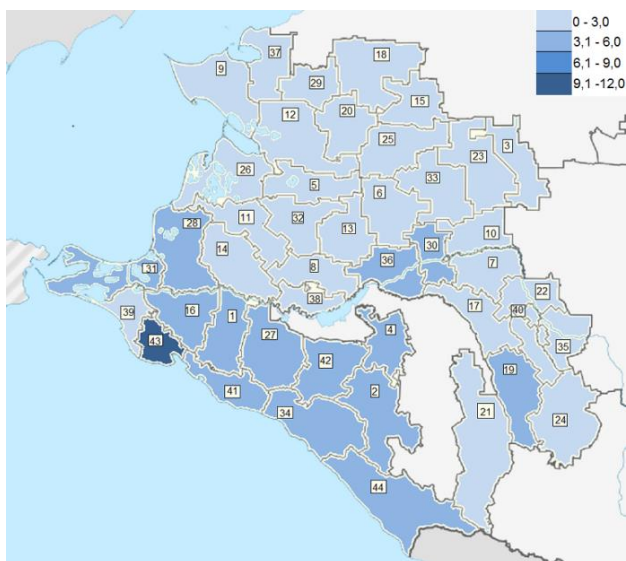


Рис. 1. Общая ежегодная повторяемость всех видов ОЯ в муниципальных образованиях Краснодарского края.

Таблица 1

Количество ОЯ, зарегистрированных в период 1997—2015 гг.

Район	ГПО	Крупный град	Очень сильный ветер	Очень сильный дождь	Очень сильный снег	Продолжительный сильный дождь	Сильная жара	Сильная метель	Сильный ливень	Сильный мороз	Сильный туман	Смерч	Шквал	Суммарное количество ОЯ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Белоглинский		1	5	2			7		6	1	1		1	24
Белореченский	13		3	7	6				2		21		1	53
Анапский			13	1					6	1		1		22
город-курорт Геленджик		1	4	14		1	1		2		3	2		28
город-курорт Сочи	106		31	74	16		4		39			79	3	352
Ейский			1	6					2		3			12
МО города Ейск			1	2			1				6		1	11
Кавказский	1			2			5		1		8			17
Каневский	1			3	1		3		3		6			17
Кореновский	2		1	5			2		3		11			24
Крымский	2		12	11	5				4		3		1	38
Кушевский	3		5	3			2				2			15

Продолжение таблицы 1														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Лабинский	12	1	1	5			1		5		28		2	55
МО города. Краснодар	3			6	2		3		7		11			31
МО города. Новороссийск	2	1	86	57	16	1		2	24		57	2	2	250
МО города. Горячий Ключ	18	1	1	14	8				6					48
Мостовский	3	3	6	4	1				3	1	5			26
Отраденский	2	1	2	6					4	2				17
Павловский	2		1	4	1		2		2	1			1	14
Приморско- Ахтарский				4			2		4					10
район города Армавир	4		7	9			4		6		1		1	32
Славянский	3		15	6	3				3		53		3	86
Староминский				1	2		2		1		1			7
Темрюкский	4		8	12					2		32			58
Тимашевский	1	1		6	1		1		6					16
Тихорецкий	2		2	5			2		2		16			29
Туапсинский	3		9	13			1		13	1		12		52
МО города Туапсе	1		3	24	1		2		20		3	27	1	82
Усть- Лабинский	4		1	3	1		1		2		67			79

На рис. 1 представлена повторяемость суммарного количества ОЯ, осредненная по территории муниципальных образований (МО) Краснодарского края (номера муниципальных образований приведены в таблице 2).

Таблица 2

Перечень муниципальных образований Краснодарского края

№	Название муниципального образования	№	Название муниципального образования
1	Абинский район	23	Новопокровский район
2	Апшеронский район	24	Отраденский район
3	Белоглинский район	25	Павловский район
4	Белореченский район	26	Приморско-Ахтарский район
5	Брюховецкий район	27	Северский район
6	Выселковский район	28	Славянский район
7	Гулькевичский район	29	Староминский район
8	Динской район	30	Тбилисский район
9	Ейский район	31	Темрюкский район
10	Кавказский район	32	Тимашевский район
11	Калининский район	33	Тихорецкий район
12	Каневской район	34	Туапсинский район
13	Кореновский район	35	Успенский район
14	Красноармейский район	36	Усть-Лабинский район
15	Крыловский район	37	Щербиновский район
16	Крымский район	38	город Краснодар
17	Курганинский район	39	город-курорт Анапа
18	Кушевский район	40	город Армавир
19	Лабинский район	41	город-курорт Геленджик
20	Ленинградский район	42	город Горячий Ключ
21	Мостовский район	43	город Новоросси́йск
22	Новокубанский район	44	город-курорт Сочи

В районах, не освещенных метеонаблюдениями, характеристики ОЯ для расчета рисков были получены с использованием карты, построенной в ArcGis 10.1 интерполяцией по методу естественной окрестности (рис. 2).

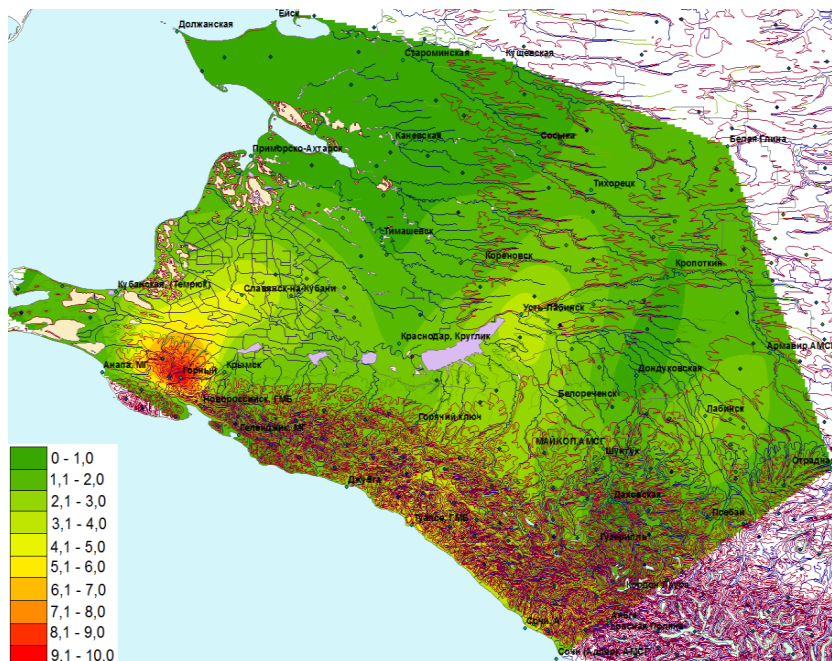


Рис. 2. Суммарная ежегодная повторяемость всех видов ОЯ на территории Краснодарского края (ArcGis 10.1, интерполяция по методу естественной окрестности).

Анализ полученных данных показал, что наибольшая повторяемость опасных явлений погоды наблюдается на Черноморском побережье и в восточной части края, к ним относятся очень сильный дождь, очень сильный ветер, гололедно-изморозевые отложения, сильный ливень, сильный туман.

Экономический ущерб от гидрометеорологических явлений тесно связан как с интенсивностью опасного явления, так и с физико-географическими и социально-экономическими особенностями района, охваченного ОЯ. По данным ВНИИГМИ-МЦД за период 1991—2015 гг. на территории Краснодарского края был зарегистрирован ущерб от 1276 опасных и неблагоприятных явлений погоды. Таким образом, ущерб нанесли только около 70 % отмеченных ОЯ. Очевидно, это объясняется тем, что некоторые опасные явления происходили на территориях, где отсутствует интенсивная человеческая деятельность.

На рис. 3 представлено количество разных видов явлений, нанесших экономический ущерб в муниципальных образованиях края за 1991—2015 гг.

Как видно из графика, ущерб чаще всего обусловлен воздействием сильного ветра, града, интенсивных и длительных осадков. Наиболее значительные ущербы связаны именно с экстремальными осадками. Максимальный ущерб за рассматриваемый период составил более 141 млн долларов (стоимостные оценки ущерба в долларах позволяют сделать эти величины более сравнимыми за разные годы), был вызван сильными и продолжительными ливнями (более 60 мм за 12 ч) и градом (диаметр до 50 мм) в горных районах в июне 2002 г. В результате ОЯ было подтоплено 20226, повреждено 11412 и разрушено 2397 жилых домов, повреждено 190 км автодорог, 57 км ЛЭП, 11 км газопроводов, 127 км водоводов. Пострадали 92259 человек, 31 человек погиб. Следующий по величине ущерб (около 25 млн долларов) также был обусловлен очень интенсивными и длительными дождями, кроме материальных потерь были и очень большие человеческие жертвы — 167 человек.

Значительные ущербы в этом регионе были также связаны с воздействием сильных ветров — до 8 млн долларов, градобитиями — 3÷5 млн долларов, сильными гололедно-изморозевыми отложениями — 2÷4 млн долларов. Косвенный экономический ущерб от гидрометеорологических явлений по разным данным может превышать прямой примерно в 3—5 раз.



Рис. 3. Число ОЯ и НГЯ, вызвавших ущерб на территории Краснодарского края в 1991—2015 гг.

КНЯ — комплекс неблагоприятных явлений,

РИП — отбойное (отливное) течение на водных объектах.

Экономический риск от ОЯ и НГЯ для муниципальных образований Краснодарского края, рассчитанный по формулам (1) и (2), представлен на рис. 4.

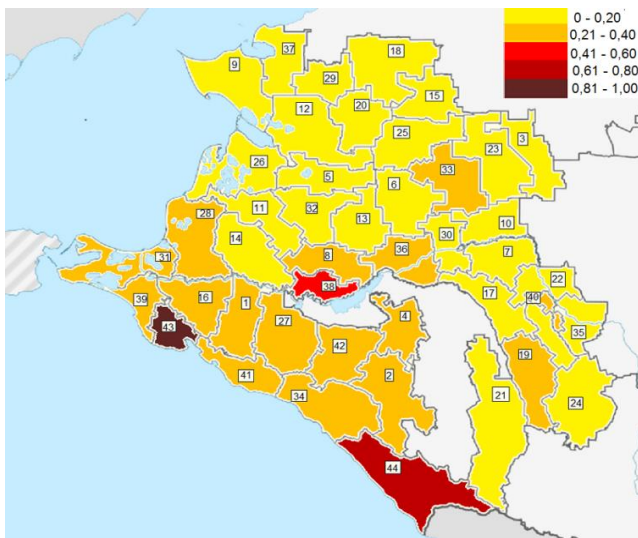


Рис. 4. Экономический риск от ОЯ м НГЯ для муниципальных образований Краснодарского края, выраженный в долях единицы.

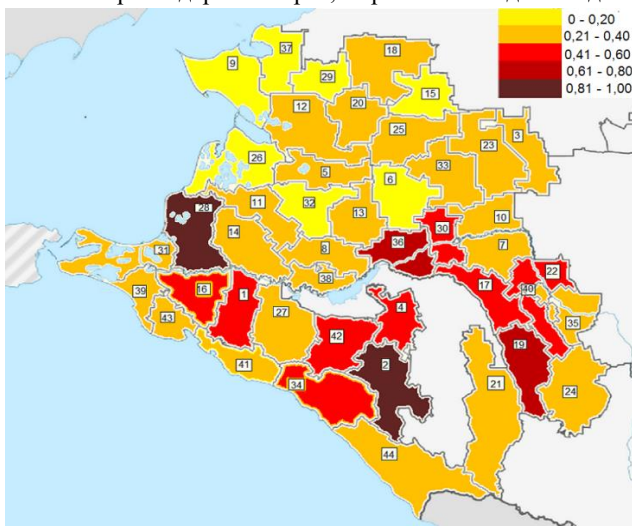


Рис. 5. Риск от ОЯ и НГЯ для населения муниципальных объединений Краснодарского края, выраженный в долях единицы.

На карте видно, что значения экономического риска наиболее высоки там, где высокая повторяемость экстремальных явлений сочетается с большой плотностью населения и развитой инфраструктурой. Однако в разных районах вклад этих составляющих риска может быть различным. Так, например, в Краснодаре основную роль играет очень высокая плотность населения, кроме того, дополнительная опасность создается риском, связанным с противопаводковыми дамбами. В районе Сочи и Новороссийска обе составляющих риска имеют одинаковый вес. Наибольшая величина экономического риска характерна для района Новороссийска, где наблюдается экстремально высокая повторяемость многих ОЯ (сильного ветра, сильного дождя, опасных снегопадов и туманов) в сочетании с большой плотностью населения и объектов городской и портовой инфраструктуры.

Распределение по территории Краснодарского края социального риска, рассчитанного по формуле (3), представлено на рис. 5.

Величина индивидуального социального риска показывает степень социальной незащищенности человека от воздействия экстремальных гидрометеорологических явлений и их последствий. Наибольшая величина риска от ОЯ и НГЯ характерна для населения Апшеронского, Славянского, Лабинского и Усть-Лабинского районов. Здесь, наряду с довольно высокой повторяемостью различных видов ОЯ (интенсивные и длительные дожди, большие скорости ветра, опасные туманы) отмечается большой процент людей, живущих в ветхих и аварийных домах, а также недостаточно развитая и сложно доступная система здравоохранения (малое число врачей и больничных коек по отношению к численности населения). Надо отметить, что повышенный социальный риск от опасных гидрометеорологических явлений наблюдается практически во всех горных и предгорных районах Западного Кавказа. Однако на самом Черноморском побережье он несколько ниже, несмотря на очень высокую повторяемость ОЯ и НГЯ, т. к. здесь отмечается более высокий уровень социальных услуг, доступных населению, в случае наступления экстремальных явлений погоды.

Влияние наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на величину погодно-климатических рисков

Наиболее ощутимые воздействия на объекты инфраструктуры можно ожидать в тех районах, где происходит увеличение подверженности и уязвимости этих объектов (например, нерегулируемая застройка горных долин в опасной близости к водотокам, несоблюдение строительных норм при постройке новых и ремонте старых зданий и т. д.) при одновременном росте количества и интенсивности ОЯ и НГЯ в данном районе.

На территории Краснодарского края в последние десятилетия наблюдается выраженный положительный тренд числа ОЯ и НГЯ, которые нанесли экономический ущерб (рис. 6). Однако эта тенденция, вероятно, вызвана не только возрастанием повторяемости экстремальных явлений, но и увеличением подверженности и уязвимости инфраструктуры, о чем говорилось выше. Учитывая выводы МГЭИК, можно утверждать, что число экстремальных гидрометеорологических явлений будет расти и дальше, т. к. увеличивается изменчивость и экстремальность климата. В этой ситуации разработка методов снижения рисков путем уменьшения подверженности и уязвимости объектов экономики и социальной сферы представляется особенно актуальной.

В последнее 20-летие на территории края наблюдаются положительные тренды как суммарного годового количества, так и большинства других видов ОЯ. Особенно заметно возросла повторяемость дней с сильной жарой, опасных гололедно-изморозевых отложений, очень сильного ветра и очень сильного дождя. Но поскольку межгодовая изменчивость этих характеристик достаточно велика, нельзя рассматривать их тренды как прогноз количества ОЯ на ближайшие годы.

Для анализа климатических изменений на территории края использовались данные пяти метеорологических станций: Сочи АМСГ, Армавир, Красная Поляна, Краснодар Круглик за период 1966—2016 гг. и Новороссийск за период 1984—2016 гг.

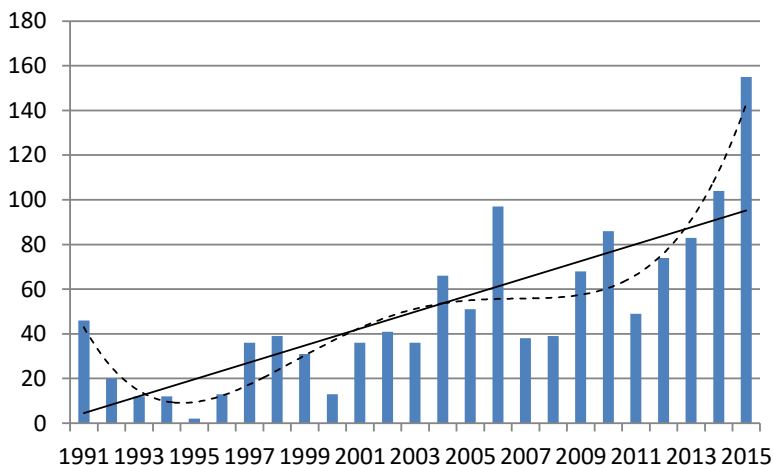


Рис. 6. Изменение годового числа ОЯ и НГЯ, нанесших ущерб на территории Краснодарского края в 1991—2015 гг.

$$Y = 3,8x + 0,7, R^2 = 0,62.$$

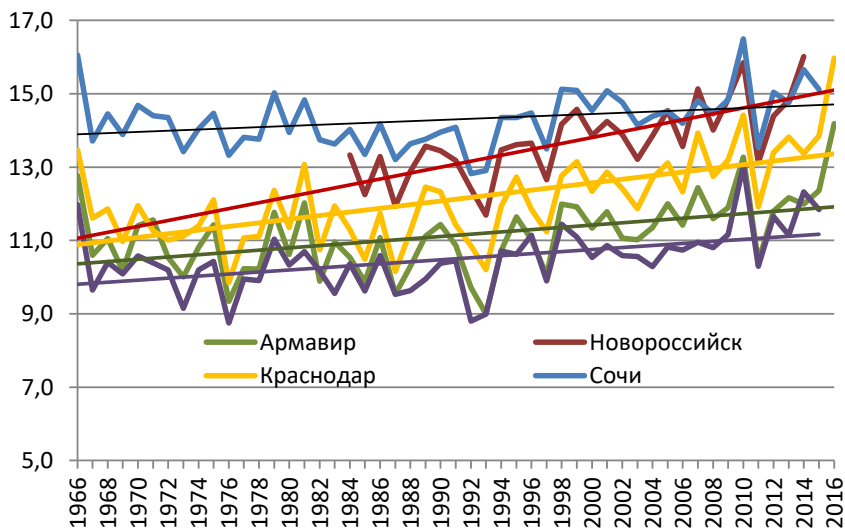


Рис. 7. Изменение среднегодовой температуры воздуха, °С.

На рис 7. представлены изменения средней годовой температуры воздуха. Наибольшая скорость потепления в целом за год наблюдается на станции Новороссийск ($0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет), в остальных районах края скорость потепления изменяется от $0,2^{\circ}\text{C}/10$ лет (МС Сочи АМСГ) до $0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет (МС Краснодар Круглик).

Максимальная скорость потепления в годовом ходе наблюдается в летний и осенний сезоны и составляет $0,4—0,9^{\circ}\text{C}/10$ лет летом и $0,2—0,9^{\circ}\text{C}/10$ лет осенью, причем наибольшая скорость потепления наблюдается в Новороссийске, а наименьшая в районе г. Сочи. Менее всего растут температуры воздуха в весенний период.

На всей территории края наблюдается увеличение как максимальных, так и минимальных температур воздуха.

Одним из важных показателей для сельского хозяйства является сумма активных температур выше $+10^{\circ}\text{C}$. В последние годы происходит рост суммы активных температур, скорость составляет роста от $53^{\circ}\text{C}/10$ лет на северо-востоке территории (Армавир) до $179^{\circ}\text{C}/10$ лет на побережье (Новороссийск). Учитывая прогнозируемый климатическими моделями рост температуры воздуха в ближайшие годы, на территории Краснодарского края будут сохраняться тенденции к увеличению суммы активных температур, что может неблагоприятно сказаться на различных отраслях сельского хозяйства из-за уменьшения интенсивности фотосинтеза.

В таблице 3 приведены результаты расчетов ожидаемых изменений температуры воздуха на территории Краснодарского края с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) для сценариев изменения содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 (Второй оценочный доклад, 2014). Изменения климата (средние за 20 лет значения климатических характеристик) оцениваются для периода 2041—2060 гг. по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг.

Наибольшее увеличение температуры воздуха прогнозируется для летнего периода (от $+2,0$ до $+3,3^{\circ}\text{C}$). Наименьшее увеличение температур воздуха будет наблюдаться в зимний период (от $+1,3$ до $+2,2^{\circ}\text{C}$).

Таблица 3

Изменение температуры воздуха на территории Краснодарского края к середине XXI века (ансамбль моделей СМIP5), °C

Сценарий	зима	весна	лето	осень	год
RCP 2.6	+1,3	юг края +1,5 север края +1,7	+2	+1,8	+1,8
RCP 4.5	+1,7	+1,8	+2,5	+2,0	+2,0
RCP 8.5	+2,2	+2,3	+3,3	+2,9	+2,9

На основании представленных данных можно сделать вывод о том, что на рассматриваемой территории ожидается увеличение рисков, связанных с высокими температурами воздуха, прежде всего, «волнами жары» и повышенной пожароопасностью. Эти явления создают повышенную опасность для здоровья людей, качества и доступности водных ресурсов, надежности работы энергетических систем и т. д.

В соответствии с режимом осадков территорию Краснодарского края можно разделить на две части. К первой относятся центральные и северные области с максимумом выпадения осадков в летний период, ко второй — Черноморское побережье, где суммы осадков за теплый и холодный период года примерно одинаковы. Так, в районе Сочи в среднем выпадает 890 мм осадков за теплый период и 800 мм за холодный (Новороссийск 410 мм — теплый период, 410 мм — холодный период), тогда как в районе Краснодара эти суммы составляют соответственно 410 и 310 мм, а в Армавире — 430 мм и 195 мм. Такие особенности режима осадков приводят к тому, что скорость изменения и направленность трендов сезонных сумм осадков различны по территории.

На рис. 8 представлена динамика изменения годовой суммы осадков. В целом наблюдается заметное увеличение годовых сумм осадков. Такая же тенденция сохраняется и для сумм осадков за

теплый период года, что особенно характерно для района города Сочи.

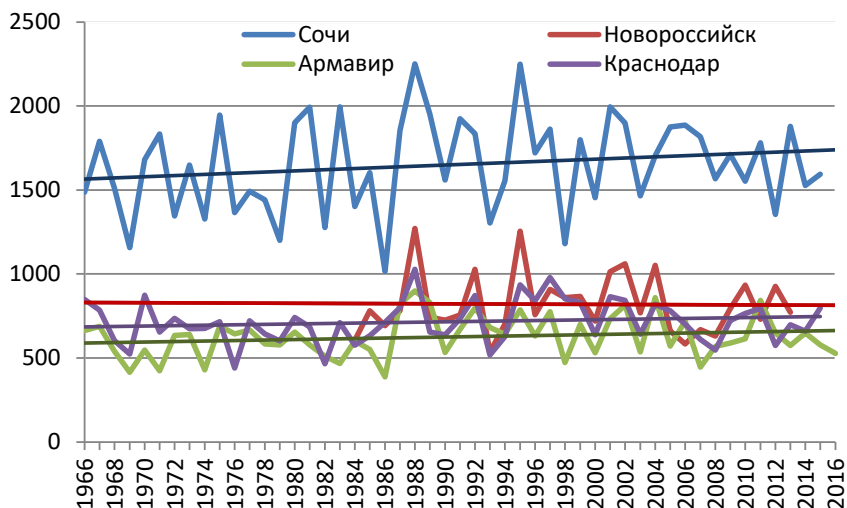


Рис. 8. Изменение годовой суммы осадков, мм.

Однако изменения сезонных сумм осадков менее однородны по территории. Так, на побережье Черного моря увеличение сумм осадков за теплый период происходит быстрее, чем рост суммы осадков за холодный период (г. Сочи: холодный период $+1,4$ мм/мес./10 лет, теплый период $+4$ мм/мес./10 лет). На МС Новороссийск отмечаются отрицательные тенденции изменения суммы осадков за холодный период ($-1,3$ мм/мес. /10 лет) и положительные для теплого периода ($+1$ мм/мес./10 лет). В районе г. Краснодар рост сумм осадков за холодное полугодие составляет $2,4$ мм/мес./10 лет, в то время как сумма осадков за теплый период практически не меняется, что говорит некотором перераспределении сумм выпадающих осадков в течение года.

Важной характеристикой для сельского хозяйства является сумма осадков за период года со среднесуточной температурой воздуха более $+10^{\circ}\text{C}$. На территории края наблюдается увеличение этой

характеристики от 0,5 %/10 лет (г. Краснодар) до 4 %/10 лет (г. Армавир).

Некоторую тенденцию к росту имеет и суточный максимум осадков. Однако, с учетом большой межгодовой изменчивости характеристик осадков (30—50 %, а для МС Новороссийск около 65 %), значимость этих трендов невелика.

Результаты расчетов ожидаемых изменений количества осадков на территории Краснодарского края с помощью ансамбля глобальных климатических моделей СМIP5 представлены в таблице 4.

Таблица 4

Изменение сезонных и годовых сумм осадков на территории Краснодарского края к середине XXI века (СМIP5), %

Сценарий	зима	весна	лето	осень	год
RCP 2.6	+8	+7	–2	–1	+4
RCP 4.5	+8	+7	–3	+2	+5
RCP 8.5	+7	+5	–11	0	+2

В соответствии с климатическим прогнозом на территории Краснодарского края ожидается рост атмосферных осадков в целом за год. Наибольшее увеличение осадков характерно для зимне-весеннего периода и уменьшение в летний период. Тем не менее, необходимо помнить о значительной неопределенности, свойственной прогнозу осадков. Поэтому на территории края возможно увеличение риска как более частых засушливых периодов, так и экстремальных суточных сумм осадков, так называемых «нерасчетных дождей», на которые имеющиеся городские системы водоотведения могут быть не рассчитаны.

За последние 50 лет отмечается небольшое уменьшение максимальной высоты снега в северной и равнинной части края. В соответствии с климатическим прогнозом к середине XXI века ожидается увеличение межгодовой изменчивости как запаса воды в снежном покрове, так и высоты снега, что может увеличить риски,

связанные с опасными снегопадами и занормативными снеговыми нагрузками в отдельные годы. Прежде всего, это относится к горным и прибрежным районам.

Для средней годовой скорости ветра, начиная примерно с середины XX в., характерно уменьшение во все сезоны года. Однако в последнее десятилетие этот процесс замедлился. В связи с уменьшением скорости ветра происходит ее перераспределение по градациям. Это приводит к увеличению повторяемости слабых ветров (2—3 м/с) и уменьшению повторяемости сильных ветров (6—7 и более м/с). Тем не менее, в последние годы возрастает изменчивость максимальных скоростей ветра. За исключением района г. Сочи, где наблюдается снижение средних максимальных скоростей ветра, связанное, возможно, с влиянием городской застройки, на остальных рассматриваемых станциях отмечается увеличение средней скорости порывов ветра. Таким образом, несмотря на уменьшение средних скоростей ветра, происходит рост максимальных скоростей ветра при порывах. Следовательно, риски, связанные с высокими скоростями ветра, не уменьшаются, а возрастают. Результаты модельных прогнозов подтверждают, что эти тенденции сохранятся, по крайней мере, до середины XXI в.

Предложения по учету информации о погодно-климатических рисках при принятии решений в отраслях экономики и социальной сферы Краснодарского края

В таблице 5 приведен перечень отраслей экономики и социальной сферы Краснодарского края в соответствии с Общероссийским классификатором видов экономической деятельности (ОКВЭД-2015). Для каждой отрасли экономики выбраны наиболее значимые последствия от ОЯ и НГЯ и предложены меры, позволяющие повысить адаптационный потенциал отрасли. Постепенная реализация адаптационных мероприятий может позволить в будущем ослабить негативные последствия опасных гидрометеорологических явлений.

Таблица 5

Последствия воздействия ОЯ и НГЯ для отраслей экономики и рекомендуемые адаптационные меры

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
Раздел А. Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	Поражение сельскохозяйственных культур от ОЯ и НГЯ (засух, пыльных бурь, града, ливневых осадков, экстремально высоких температур, заморозков, снегопадов, очень сильных ветров).	Повышение надежности кратко-, среднесрочного и сезонного агроклиматических прогнозов погоды. Обязательное использование прогностических данных. Использование градозащитной аппаратуры.
	Колебание (снижение) урожайности под влиянием медленных климатических изменений (роста температуры, опустынивания).	Актуализация мезо- и микроклиматического районирования территории с учетом наблюдаемых и ожидаемых климатических изменений. Увеличение видового разнообразия возделываемых культур и сортов. Совершенствование системы земле- и водопользования. В более засушливой, северной части края более широкое внедрение влагосберегающих технологий (снегозадержание, уменьшение непродуктивного испарения из-за

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
	Потери древесины, ущербы объектам инфраструктуры, риски для здоровья и жизни людей, для лесных экосистем в результате пожаров. Ветровал и снеголом от прохождения шквалистого ветра, смерчей, сильных снегопадов.	орошения открытым способом и др.) Развитие системы страхования урожая от природных ЧС. Постоянный мониторинг состояния лесных массивов. Запрет на неконтролируемые поджоги травы. Контроль рекреационного использования лесов. Повышение осведомленности населения о причинах и опасности лесных пожаров. Регулярная очистка леса от сухостоя и валежника.
Раздел D. Обработывающие производства	Снижение производительности труда и сокращение времени работы из-за высоких температур воздуха Увеличение затрат на кондиционирование в периоды с высокой и низкой температурой воздуха.	Создание высокоэффективных автоматизированных систем кондиционирования на основе использования специализированной климатической информации.

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
	Повреждение заводских зданий сильным ветром (смерчем, шквалом).	Пошаговая модернизация капитального фонда. Отказ от строительства на территории производства легких мобильных конструкций. Создание или увеличение суммы материального резерва по ГО и ЧС.
Раздел Е. Производство и распределение электроэнергетики, газа и воды	Снижение безопасности и эффективности работы ТЭС из-за недостаточного охлаждения энергоблоков в период волн жары.	Создание резервных систем охлаждения (дополнительные резервуары воды, градирни и т.д.).
	Разрушение строительных конструкций под действием занормативных снеговых, ветровых и гололедных нагрузок.	Пересчет климатических характеристик, входящих в нормативные документы по строительству и эксплуатации ТЭС, с учетом метеорологических данных последних десятилетий.
	Возрастание рисков аварийных ситуаций на ГЭС из-за экстремально большого или малого стока. Разрушение или повреждение гидротехнических сооружений.	Постоянный мониторинг состояния гидротехнических сооружений. Переоценка водопропускной способности сооружений. Пересмотр действующих правил эксплуатации гидротехнических систем с учетом происходящих и ожидаемых изменений характеристик стока рек.

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
	Увеличение рисков разрушения конструкций ЛЭП из-за сильного ветра, гололеда, высоких температур воздуха, гроз.	Создание бригад технической помощи быстрого реагирования. Строительство подстанций закрытого исполнения и минимальных размеров Освоение подземного пространства для размещения электросетевого хозяйства Установка оборудования для электромеханического удаления ледяных образований.
	Нарушение централизованного энергоснабжения при авариях на ЛЭП.	Пошаговая модернизация инфраструктуры. Использование грозозащитной аппаратуры. Более широкое применение передвижных электростанций иподстанций. Создание дополнительных источников энергии на основе ВИЭ. Применение схем с минимальным временем восстановления. электроснабжения потребителей при возникновении аварийных режимов.

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
Раздел F. Строительство	Разрушение строительных конструкций под действием занормативных снеговых, ветровых и гололедных нагрузок. Разрушение зданий и сооружений, возведенных в потенциально опасных местах (в горных долинах, на склонах, подверженных лавинам и оползням и т. д.).	Актуализация нормативных документов по строительству, содержащих расчетные климатические характеристики, с учетом метеорологических данных последних десятилетий. Контроль за выполнением нормативных документов при строительстве новых и ремонте старых зданий.
	Подтопление подвалов, протечка кровель (ливневые дожди) Аварии в системах водоотведения. Увеличение рисков при работах на открытом воздухе при наступлении ОЯ или НГЯ (сильный ветер, смерч, шквал, гроза и т. д.)	Профилактическое обслуживание водостоков. Увеличение пропускной способности ливневой канализации Профилактическое обслуживание водостоков. Расселение людей из ветхих и аварийных домов. Пошаговая модернизация жилого фонда. Своевременное оповещение работников о возможности ОЯ или НГЯ и организация их защиты.

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
Раздел Г. Оптовая и розничная торговля; ремонт. Раздел Н. Гостиницы и рестораны	Возрастание рисков для функционирования предприятий торговли, сферы услуг, туристического сектора от ОЯ или НГЯ (сильный ветер, сильная жара, ливень).	Совершенствование методики раннего оповещения об ОЯ. Улучшение транспортной инфраструктуры. Повышение доступности медицинской помощи. Установка качественных кондиционеров в гостиницах, торговых комплексах. Разработка рекомендаций и планов действий по защите населения от последствий ЧС, связанных с прохождением ОЯ и НГЯ.
Раздел I. Транспорт и связь	Возрастание рисков для функционирования всех видов транспорта, а именно: Разрыв дорог под действием очень сильного дождя.	Разработка системы оповещения водителей об особенностях движения в сложных метеорологических условиях. Совершенствование методики раннего оповещения об ОЯ. Развитие системы страхования от случаев природных ОЯ. Улучшение систем дренажа и водоотведения для предупреждения размыва насыпей и дорожного полотна.

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
	Снежный занос автомобильных дорог. Образование снежного и гололедного наката, приводящих к снижению сцепных качеств дорожного покрытия, увеличение тормозного пути.	Расширение автопарка снегоуборочной техники Своевременная обработка дорог при гололедице и снежном накате.
	Нарушение работы ж/д транспорта при сильном ветре (повал деревьев).	Создание бригад технической помощи быстрого реагирования.
	Ухудшение видимости на трассах при сильном тумане. Ухудшение состояния дорожного полотна при высоких температурах воздуха.	Снижение скоростного режима на опасных участках дороги. Использование теплостойких дорожных покрытий.
	Возрастание рисков для водного транспорта при штормах, обледенении и т. д.	Совершенствование специализированных прогнозов погоды для водного транспорта.

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
Раздел L Государственное управление и обеспечение безопасности	Увеличение рисков ЧС для объектов инфраструктуры и населения от ОЯ и НГЯ.	Совершенствование прогнозов и методики раннего оповещения об ОЯ и НГЯ. Разработка рекомендаций и планов действий по защите населения от последствий ЧС, связанных с изменениями климата и прохождением ОЯ. Жесткий контроль за выполнением строительных норм. Создание резервных источников электроэнергии. Улучшение транспортной инфраструктуры. Повышение доступности медицинской помощи.
Раздел N. Здравоохранение и предоставление социальных услуг	Рост рисков для жизни и здоровья населения от ОЯ и НГЯ (волны жары, сильный ветер, гололед и т. д.)	Совершенствование методики раннего оповещения об ОЯ. Улучшение транспортной инфраструктуры. Разработка рекомендаций и планов действий по защите населения от последствий ЧС, связанных с изменениями климата и прохождением ОЯ. Разработка системы оповещения населения и различных служб о ситуации появления тепловых волн. Дополнительное озеленение территории городов. Обязательная установка кондиционеров в больницах и детских садах.

Отрасль экономики, элемент социальной инфраструктуры	Перечень последствий для отрасли	Рекомендуемые мероприятия
		Повышение качества и доступности медицинской помощи (внедрение системы патронажа пожилых людей с хроническими заболеваниями сердечнососудистой системы и т.д.). Совершенствование системы сбора и регистрации информации о состоянии здоровья населения, включая основные и вновь выявляемые факторы риска, возникающие как реакция на климатические изменения.

Выводы

Выполненные в работе расчеты социального и экономического рисков по муниципальным образованиям Краснодарского края позволили получить пространственное распределение этих характеристик. Наиболее высокие величины экономического риска наблюдаются в районах, где значительная повторяемость ОЯ сочетается с большой плотностью населения, к таким районам относятся Краснодарский район, города Сочи и Новороссийск. Высокие значения социального риска характерны для населения восточной горной и предгорной части Краснодарского края, где система здравоохранения слаборазвита и сложно доступна. На побережье Черного моря, несмотря на очень высокую повторяемость ОЯ и НГЯ, социальный риск несколько ниже, поскольку здесь более высокий уровень социальной защиты населения в случае наступления ОЯ.

На рассматриваемой территории ожидается увеличение рисков, связанных с высокими температурами воздуха, прежде всего, «волнами жары» и повышенной пожароопасностью. Возрастает риск более частых засушливых периодов, прежде всего в северной части края. На всей территории будет сохраняться опасность экстремальных суточных сумм осадков, так называемых «нерасчетных дождей», и опасных снегопадов, приводящих к занормативным снеговыми нагрузкам в отдельные годы, особенно в горных и прибрежных районах. Так же увеличатся риски, связанные с высокими скоростями ветра.

Представленный подход позволяет включить информацию о погодно-климатических рисках в паспорта безопасности субъектов РФ, учесть климатические факторы при разработке социально-экономической стратегии развития субъектов РФ, определить оптимальные пути адаптации к изменению и изменчивости климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй Оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014). — М.: Росгидромет. 1009 с.

Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П. (2015). Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. — СПб: Кириллица. 213 с.

Кобышева Н. В., Васильев М. П. (2015). Уязвимость социальной сферы регионов России к опасным гидрометеорологическим явлениям // Труды ГГО. Вып. 578. С. 59—74.

МГЭИК (2014). Изменение климата, 2014 г. Воздействия, адаптация и уязвимость. Вклад Рабочей группы II в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. — ВМО. 40 с.

РД 52.04.563-2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. — М.: Росгидромет. 49 с.

World Risk Report (2014). UNU-EHS and the Alliance Development Works / Bündnis Entwicklung Hilft.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНОГО БАЛАНСА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

*Е. Д. Надёжина, А. В. Стернзат, Б. Н. Егоров,
А. А. Пикалёва, И. М. Школьник*

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

Поступила в редакцию 3.09.2017

Введение

В аридных регионах, к числу которых относится регион Центральной Азии, негативные последствия изменений климата проявляются особенно заметно (Второй оценочный доклад Росгидромета, 2014). В связи с этим в последние десятилетия Центральная Азия оказалась в фокусе разносторонних исследований, касающихся изменений регионального климата и их последствий для экономики и социальной сферы (Lioubimtseva and Henebry, 2009; Hu et al., 2014; Zhou et al., 2015). Так, дефицит водных ресурсов и экономическая значимость орошаемого земледелия в Центральной Азии требуют развития исследований, направленных на повышение точности оценки суммарного испарения с орошенных земельных участков. Такие исследования позволяют повысить реалистичность оценок изменения водного баланса и способствуют оптимизации норм водопотребления в условиях изменяющегося климата.

Суммарное испарение (эвапотранспирация, далее по тексту ЭТ) при оптимальной организации поливного режима — основной расходный элемент в водном балансе орошаемого поля в аридных регионах. В настоящее время существует большое количество методов оценки эвапотранспирации (Мезенцев, 1976; Горбунова, 1967; Er-Raki et al., 2010; Monteith, 1985). Наибольшее

распространение получил рекомендованный FAO (Food and Agriculture Organization) метод Пенмана—Монтейта (П—М), позволяющий рассчитать эталонную ЭТ в предположении, что испарение происходит с эталонной поверхности (Allen et al., 1998). За эталонную поверхность принимается гипотетический травяной покров со специфическими характеристиками (гипотетическая культура имеет высоту 0,12 м, сопротивление поверхности 70 с/м, альбеда 0,23, испарение происходит с травяной поверхности одной высоты, активно растущей и, соответственно, увлажненной). Именно эталонные значения ЭТ отражают влияние климата на водный баланс орошаемого поля. Процедура оценки ЭТ предполагает также стандартизацию определения параметров формулы Пенмана—Монтейта на основе данных наблюдений разного временного осреднения либо модельных расчетов. В настоящей работе параметры уравнения Пенмана—Монтейта определяются на основе расчетных данных системы региональной климатической модели (РКМ) и модели атмосферного пограничного слоя (АПС). Это дает возможность проводить оценки изменений ЭТ с использованием прогнозируемых климатических параметров. Прежде чем проводить оценки на основе прогнозов изменений климата, необходимо проанализировать современные и ретроспективные данные о пространственном распределении и эволюции климатических характеристик и получить представление о качестве расчета климата с помощью моделей РКМ и АПС.

Цель настоящей работы — анализ изменчивости локальных значений и пространственных распределений климатических характеристик, определяющих ЭТ с орошенного участка в зависимости от его расположения в регионе и оценка пространственной изменчивости ЭТ на основе данных РКМ и АПС.

1. Схема расчета и анализ входной информации для оценки испарения

На основе расчетных данных системы моделей РКМ и АПС определяются значения характеристик, входящих в формулу

Пенмана—Монтейта (Monteith, 1998). К их числу относятся: приток солнечной радиации, температура, влажность воздуха и скорость ветра на уровне стандартных наблюдений. РКМ ГГО позволяет существенно детализировать поля климатических характеристик, рассчитанные либо по глобальным моделям климата, разрешение которых обычно находится в диапазоне 100—200 км, либо по реанализу. В настоящей работе использованы расчеты климата по РКМ, имеющей пространственное разрешение 25 км (Школьник и др., 2000, Shkolnik et al., 2017). Боковые граничные условия РКМ получаются путем пространственно-временной интерполяции полей реанализа ERA-Interim по температуре, влажности, ветру и атмосферному давлению с разрешением по времени 6 часов за весь период расчетов (1979—2010 гг.). Область расчетов РКМ для Средней Азии занимает территорию от 32 °с. ш. до 56 °с. ш. и от 42 °в. д. до 90 °в. д. Число узлов в расчетной области составляет 95×179 .

Мезомасштабная многоуровневая модель АПС позволяет рассчитать распределения температуры, влажности, скорости ветра, характеристик турбулентности и потоков тепла и влаги на разных расстояниях от наветренной границы орошаемого участка различных размеров и участка, составленного из орошаемых и неорошаемых полос. Модель неоднократно использовалась для решения прикладных задач (Надёжина, Шкляревич, 1994; Надёжина, Стернзат, 1999). Модель АПС позволяет учитывать изменение растительности и рельефа при чередовании полос и наличие адвекции локального, регионального или синоптического масштаба.

Модель АПС относится к классу мезо– γ -моделей, в ней использован полуторный уровень замыкания по турбулентности. Численное решение системы уравнений, составленной из уравнений движения, неразрывности, уравнений переноса для тепла и влаги и дополненной соотношениями замыкания для масштаба и коэффициента турбулентности, отыскивается маршевым методом с дополнительными приближениями для нелинейных членов уравнений. К числу внешних параметров модели относятся: характеристики рельефа, шероховатость подстилающей поверхности, высота пограничного слоя атмосферы, температура и массовая доля влаги на

уровне пограничного слоя, скорость геострофического ветра, радиационный баланс или температура на поверхности. Очевидно, что для проведения оценок необходимо иметь достаточно широкий объем информации, получаемой на основе РКМ. Конечным продуктом расчета является суммарное испарение с поверхности, состоящей из отдельных орошаемых и неорошаемых участков. Расчет ведется для случая соблюдения технологических норм полива, позволяющих выдерживать оптимальную влажность у поверхности и внутри растительного покрова.

В настоящей работе в узлах регулярной сетки РКМ над орошаемым участком длиной 5 км рассчитываются среднемесячные значения температуры, влажности, скорости ветра и эвапотранспирации. Предполагается, что орошенный участок расположен в подсеточной области РКМ и находится под влиянием адвективного переноса из районов, в которых орошение отсутствует.

2. Сравнение модельных данных с результатами наблюдений и реанализов

В работах последнего времени (Zhou et al., 2015; Hu et al., 2014) особое внимание уделяется анализу данных, позволяющих количественно оценить проявления глобального потепления в рассматриваемом регионе. Прогностические модельные оценки воздействия изменений климата на водный баланс орошенного поля необходимо выполнять с учетом сравнительного анализа ретроспективных модельных результатов и результатов наблюдений. Поскольку объем данных наблюдений в изучаемом регионе существенно ограничен (Zhou et al., 2015) для сравнения с модельными оценками целесообразно привлекать результаты реанализов.

Прежде всего необходимо выполнить анализ расчетных результатов РКМ, которые являются основой для исследования неопределенности в оценках локальных характеристик, в том числе, ЭТ с орошенного участка.

Всесторонний анализ имеющихся в регионе данных наблюдений температуры воздуха и данных нескольких реанализов выполнен в работе (Zhou et al., 2015). На рис. 1 показаны осредненные за период 1981–2010 гг. распределения отклонений модельных значений температуры от соответствующих значений этой характеристики, полученных по реанализу MERRA-2 (Gelaro R. et al., 2017) и анализу данных наблюдений CRU (Harris I. et al., 2014). Там же показаны отклонения температуры, полученные с учетом влияния пограничного слоя атмосферы над орошенной поверхностью участка в подсеточной области PKM, от данных CRU.

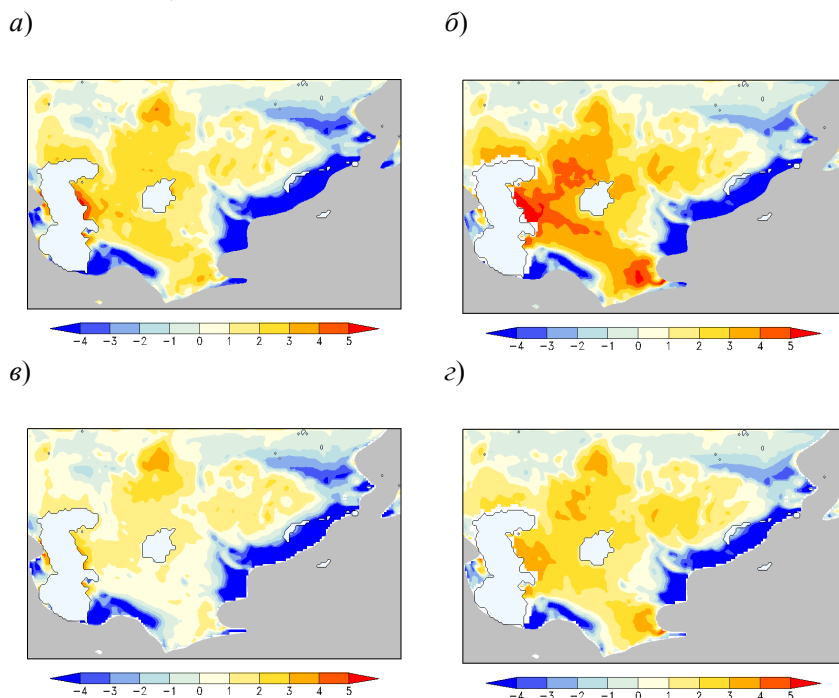


Рис. 1. Средние за сезон (май — сентябрь) разности значений температуры воздуха на уровне 2 м, осредненные за период 1981—2010 гг.

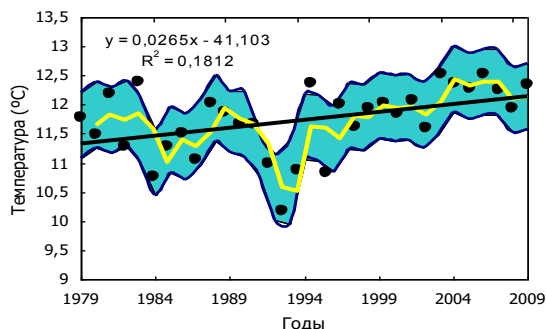
а) PKM – MERRA-2; б) (PKM+АПС) – MERRA-2; в) PKM – CRU; г) (PKM+АПС) – CRU.

Из рис. 1 следует, что в равнинных регионах Центральной Азии абсолютные значения температуры, рассчитанные на основе РКМ, заметно отличаются от данных MERRA-2 и CRU. Детализация структуры пограничного слоя над орошенным участком на основе модели АПС приближает значения температуры поверхности в районах орошаемого земледелия к значениям температуры, полученным по данным CRU. Объяснение этому можно найти в том, что в оценках CRU приближенно учитывается наличие орошенных земель, поскольку этот анализ включает данные наблюдений. Для уточнения результата необходимо использовать данные о площади орошенных земель в подсеточной области РКМ и выполнить коррекцию значений температуры в узлах сетки РКМ равнинных участков поверхности исследуемого региона.

Скорость изменения средней по региону температуры воздуха за последние 30 лет является одним из наиболее надежных показателей эволюции климата. Поэтому необходимо выяснить, насколько реалистично модель воспроизводит скорость изменения температуры воздуха в регионе за период 1979—2010 гг. Эта характеристика определялась, как для осредненных значений температуры для всего региона в целом, так и для отдельных равнинных участков изучаемого региона.

Рис. 2 демонстрирует эволюцию среднегодовой температуры, осредненной для разного ансамбля модельных точек. Для сравнения на этом же рисунке показаны результаты, приведенные в работе (Zhou et al., 2015). Анализ показывает, что для осредненных по ансамблю узлов сетки РКМ, координаты которых близки к координатам метеостанций (выборка соответствует данным работы (Zhou et al., 2015)), величина линейного тренда за период 1979—2010 гг. оказывается меньше, чем по данным наблюдений.

a)



б)

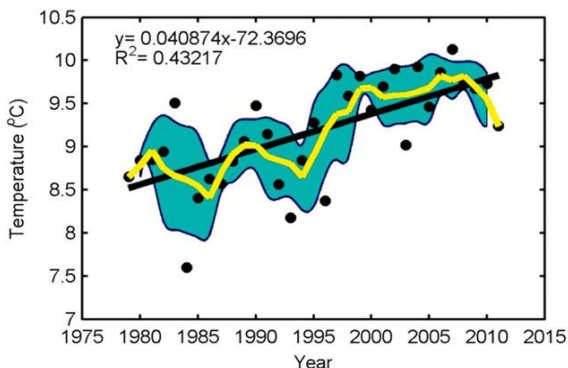


Рис. 2. Эволюция среднегодовой температуры воздуха для ансамбля точек, координаты которых близки координатам метеостанций.

а) модельные точки, 1979—2010 гг.; б) стандартные наблюдения 1979—2010 гг. из статьи (Zhou et al., 2015).

— линейный тренд, — фильтр 95% интервал.

3. Пространственная и сезонная изменчивость водного баланса

На основе системы моделей РКМ+АПС проведен анализ изменений пространственных распределений температуры, влажности воздуха и ЭТ вблизи поверхности орошенного поля, расположенного

в окрестности каждого из узлов сетки РКМ на расстоянии, меньшем горизонтального разрешения этой модели (25 км). Некоторые из результатов показаны на рис. 3—5.

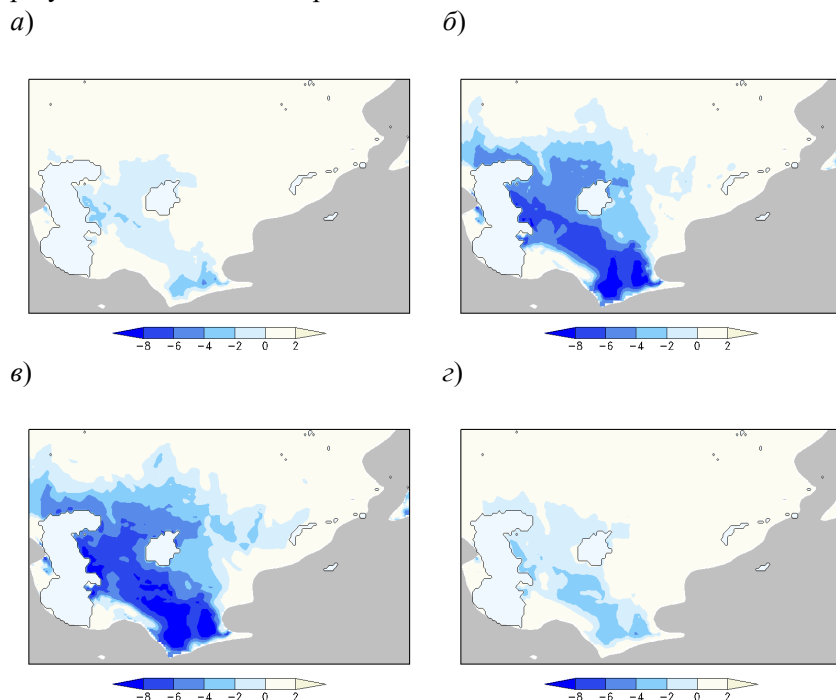


Рис. 3. Разность температур поверхности ($T_{\text{АПС}} - T_{\text{РКМ}}$) в разные месяцы теплого периода.

а) июнь; б) июль; в) август; г) сентябрь.

Для расчета ЭТ использована формула Пенмана–Монтейта (Monteith, 1985). Необходимые характеристики, используемые в этой формуле, — это составляющие радиационного баланса, температура (T), влажность (q) воздуха и скорость ветра на уровне 2 м. Суммарное испарение с орошенного участка, прежде всего, определяется распределением температуры и влажности в окрестности этого участка. Используются два варианта оценок ЭТ:

(1) значения ЭТ вычисляются по данным о температуре и влажности, полученным на основе РКМ в узлах сетки этой модели, т.е. соответствуют осредненным по площади ячейки значениям T и q (на рисунках обозначен, как расчет по данным РКМ – $T_{\text{РКМ}}$);

(2) в формуле П–М используются значения T и q над орошенным участком, расположенным в подсеточной области каждого из узлов сетки РКМ. Эти значения T и q получены с привлечением АПС (обозначены, как результат расчета с учетом АПС – $T_{\text{АПС}}$).

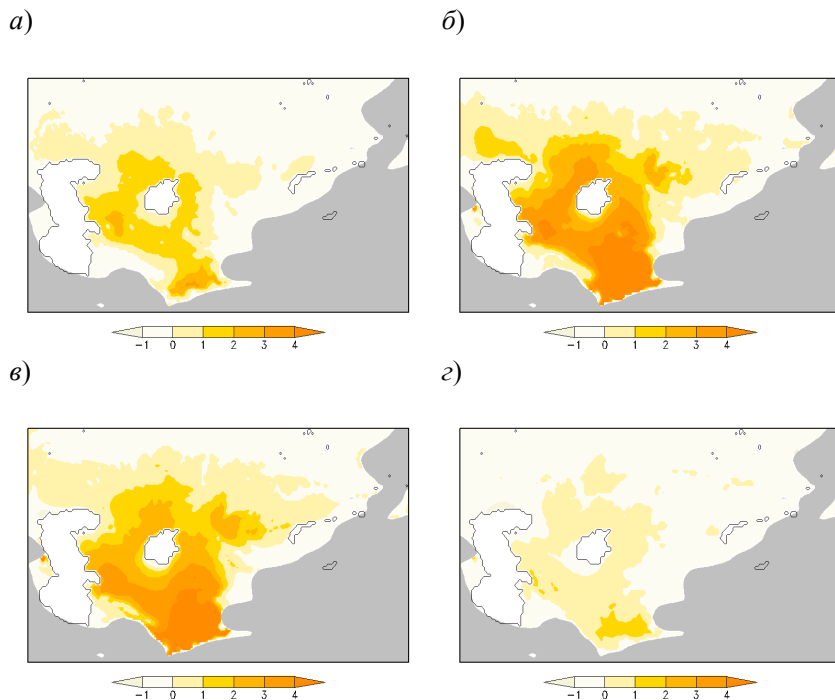


Рис. 4. Разность относительных влажностей на уровне 2м ($q_{\text{АПС}} - q_{\text{РКМ}}$).
а) июнь; б) июль; в) август; г) сентябрь.

Расчеты выполняются для отдельных месяцев вегетационного периода. Сравнение температуры поверхности, полученной разными

методами, показано на рис. 3. Рисунок показывает, что в разные месяцы теплого сезона учет детальной структуры АПС по-разному влияет на распределения рассматриваемых характеристик. В среднем за сезон (с мая по сентябрь) над орошенными полями максимальное отклонение температуры $T_{\text{АПС}}$ от $T_{\text{РКМ}}$ составляет до 3°C , а влагосодержания — до 4 г/кг (рис. 3, 4).

Наиболее заметно эти эффекты выражены в июле и августе, когда расхождения в оценках температуры ($T_{\text{АПС}} - T_{\text{РКМ}}$) достигают 10°C . Весной и осенью (май, сентябрь) детализация структуры АПС приводит к существенно меньшим отклонениям расчетных полей температуры и влажности, полученным на основе РКМ (в сентябре, например, наибольшее различие между $T_{\text{АПС}}$ и $T_{\text{РКМ}}$ оказывается меньшим 4°C). Уточнение распределений температуры за счет детализации структуры АПС неодинаково проявляется на территории региона. Наибольшие разности температур $T_{\text{АПС}} - T_{\text{РКМ}}$ (до 10°C в летние месяцы) отмечаются в междуречье Амударьи и Сырдарьи. Отметим, что в этих районах сосредоточены значительные по площади массивы орошаемых земель. Очевидно, что изменения температуры проявляются и в распределениях влажности, и в распределении потоков водяного пара в окрестности орошенного участка.

Отметим, что распределение влажности зависит в значительной мере от задания степени насыщения на поверхности растительного покрова. В расчетных примерах распределений влажности, анализируемых здесь, использованы экспериментальные данные о влажности внутри растительного покрова хлопкового поля, приведенные в исследовании (Горбунова, 1967). Относительная влажность изменялась от 40% у поверхности покрова в начале вегетационного периода, до 70% в июле—августе. Эффекты детализации структуры АПС наиболее заметно выражены в пространственных распределениях удельной влажности в июле—августе. Средние за сезон наиболее заметные отклонения оценок влажности ($q_{\text{АПС}} - q_{\text{РКМ}}$) находятся в диапазоне $2\text{—}3\text{ г/кг}$ и достигают в летние месяцы 12 г/кг (рис. 5).

Взаимодействие полей температуры и влажности определяет особенности распределений ЭТ. Рис. 5 иллюстрирует эффект такого взаимодействия в рассматриваемом регионе.

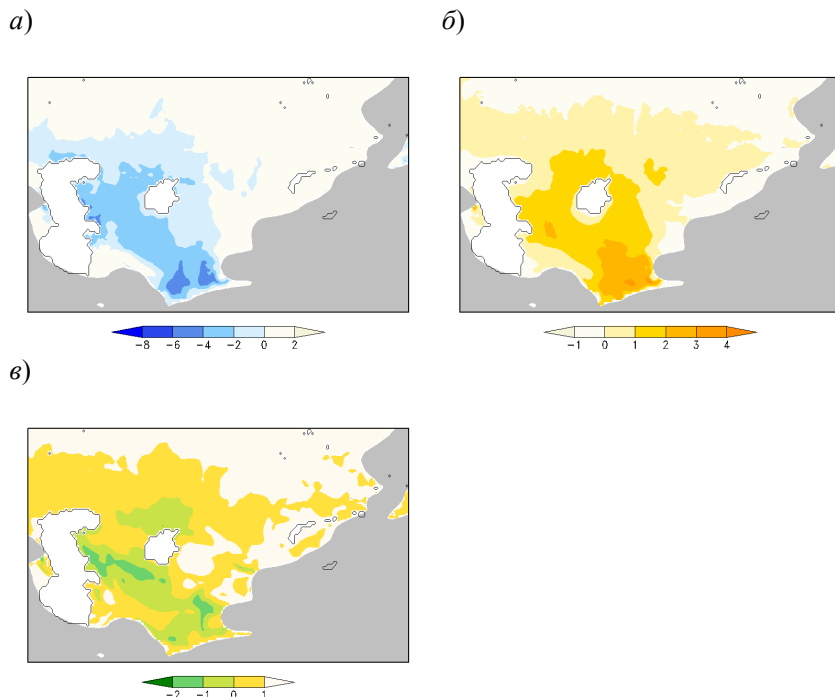


Рис. 5. Средние за сезон (май—сентябрь) разности значений температуры поверхности (а), влажности на уровне 2 м (б) и испарения (в) (РКМ+АПС) – РКМ, осредненные за период 1981—2010 гг.

На рисунке показаны отклонения температуры ($T_{\text{АПС}} - T_{\text{РКМ}}$), влажности ($q_{\text{АПС}} - q_{\text{РКМ}}$) и соответствующие отклонения ЭТ за период с мая по сентябрь. Видно, что при более низких температурах над орошенными полями, которые получают по оценкам модели АПС, в районах орошаемого земледелия на 2—3 г/кг увеличивается влажность воздуха. При этом ЭТ уменьшается по сравнению с

расчетными значениями этих характеристик, полученными на основе данных РКМ, особенно в юго-западных районах. Наиболее значительные различия между ЭТ, полученной на основе только данных РКМ, и рассчитанной с привлечением АПС составляют в среднем за сезон 2—3 мм/сутки.

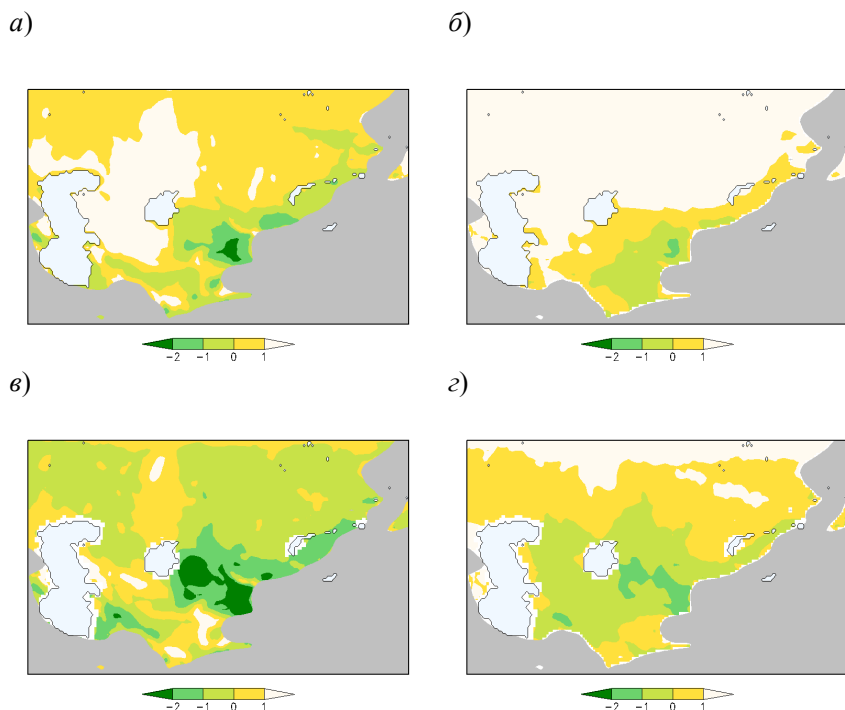


Рис. 6. Средние за сезон (май—сентябрь) разности значений испарения, осредненные за период 1981—2010 гг.

а) РКМ – MERRA-2; б) (РКМ+АПС) – MERRA-2; в) РКМ – CRU; г) (РКМ+АПС) – CRU.

Проанализируем, какое влияние оказывает учет детальной структуры АПС над орошенными полями на степень согласованности модельных значений ЭТ с величинами ЭТ, представленными в

реанализе MERRA-2 и по данным анализа наблюдений CRU. Иллюстрацией сравнения служит рис. 6, который показывает, что детализация структуры АПС сближает модельные значения ЭТ с данными реанализов. Особенно заметен этот эффект при сопоставлении модельных расчетов с результатами CRU. В последнем случае абсолютные отклонения модельных значений ЭТ от данных CRU для большей части региона не превосходят 1 мм/сутки.

Заключение

Детализация описания пограничного слоя атмосферы в региональной климатической модели открывает путь к повышению качества расчета эволюции теплового и влажностного режима вблизи подстилающей поверхности, включая физически более обоснованный расчет суммарного испарения с орошенных участков поверхности. Сравнение расчетов климата по региональной модели ГГО с учетом детального описания пограничного слоя атмосферы и без него с данными наблюдений и реанализа показывает, что описание термического режима улучшается, когда в модели детализируется структура АПС, причем уточненные оценки оказываются ближе к данным анализа наблюдений CRU, чем к реанализу MERRA-2. Наибольшее расхождение между модельными оценками температуры и реанализом составляет 3 °С. Поправка к температуре за счет привлечения модели АПС оказывается наибольшей (до 8 °С) в середине летнего сезона (июль, август). В остальные месяцы теплого времени года этот эффект менее заметный. Детализация структуры АПС, кроме того, приближает модельные значения эвапотранспирации к данным CRU. Дальнейшее развитие исследований предполагает уточнение расчетной схемы за счет детализации структуры АПС в районах богарного земледелия, оценки суммарного испарения при чередовании орошенных и пустынных участков поверхности, прогностические оценки эволюции суммарного испарения с орошаемых поверхностей различной структуры в середине и конце XXI века.

Благодарности

Методология совместного использования РКМ и модели АПС для оценки климата в условиях орошаемого земледелия реализована за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16–17–00063) в рамках оценки воздействий изменений климата на сельское хозяйство Российской Федерации. Часть исследований выполнена при поддержке Корейской Метеорологической Администрации (КМА, Республика Корея) в рамках двустороннего сотрудничества между КМА и Росгидрометом по подпроекту «Центральная Азия в контексте глобальных климатических изменений: прогнозы региональных изменений с высоким разрешением и воздействия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Техническое резюме (2014). — М.: Росгидромет. 1009 С.

Горбунова И. Г. (1967). Методика расчета суммарного испарения на орошаемых полях // Труды ГГО. Вып. 214. С. 81—99.

Мезенцев В. С. (1976). Расчёты водного баланса. — Омск: Изд-во Омского сельскохозяйственного института. 76 С.

Надёжжина Е. Д., Стернзат А. В. (1999). Сравнение результатов расчетов по двух- и трехмерной моделям теплообмена между океаном и атмосферой в приполярных районах // Метеорология и гидрология. № 10. С. 53—62.

Надёжжина Е. Д., Шкляревич О. Б. (1994). Адвективные туманы и гололед над склоном в прибрежных районах // Метеорология и гидрология. № 9. С. 20—28.

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.

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements // FAO Irrigation and drainage paper. №. 56. 333 P. <http://www.cawater-info.net/bk/improvement-irrigated-agriculture/files/fao56.pdf> – in Russian.

Er-Raki S., Chehbouni A., Khabba S. et al. (2010). Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as

alternate of ground meteorological parameters // Journal of Arid Environments. Vol. 74. P. 1587—1596.

Gelaro Ronald et al. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Clim. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

Harris I., Jones P. D., Osborn T. J. and Lister D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset // J. Climatol. V. 34. P. 623—642. doi:10.1002/joc.3711.

Hu Z., Zhang C., Hu Q. S., Tian H. (2014). Temperature changes in Central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets // Journal of Climate. Vol. 27(3). P. 1143—1167.

Lioubimtseva E., Henebry G. M. (2009). Climate and environmental change in arid central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations // Journal of Arid Environments. Vol. 73. P. 963—977.

Monteith J. L. (1985). Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. // Advances in Evapotranspiration. Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration. Chicago, Ill. ASAE, St. Joseph, Michigan. P. 4—12.

Shkolnik, I., Pavlova, T., Efimov, S. et al. (2017). // Clim. Dyn. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3600-6>.

Zhou Y., Zhang L., Fensholt R., Wang K., Vitkovskaya I., Tian F. (2015). Climate Contributions to Vegetation Variations in Central Asian Drylands: Pre- and Post-USSR Collapse // Remote Sensing. Vol. 7. № 3. P. 2449—2470.

АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ЗАПАДНЫХ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ КАЗАХСТАНА

*С. С. Байшоланов¹, В. Н. Павлова², Д. А. Чернов¹,
М. С. Габбасова¹, А. Р. Жакиева¹*

¹ Филиал ТОО «Институт географии» Министерства образования
и науки Республики Казахстан.

Z05H0T3 г. Астана, пр. Кабанбай батыра, 8

saken_baisholan@mail.ru, mailboxda@gmail.com, marzhan_94.94@mail.ru,
baiarai@mail.ru

² Всероссийский научно–исследовательский институт сельскохозяйственной
метеорологии.

249037 г. Обнинск, Калужская область, пр. Ленина, 82

vnp2003@bk.ru

Поступила в редакцию 5.09.2017

Введение

В Казахстане первый научный труд по агроклиматическим ресурсам «Агроклиматическое районирование Казахстана» был опубликован П. И. Колосковым в 1947 году. В 1955 году опубликована монография «Агроклиматические и водные ресурсы районов освоения целинных и залежных земель» под редакцией Ф. Ф. Давитая. В 50—60-х годах XX века были выпущены агроклиматические справочники по всем областям Казахстана, в том числе по Западно-Казахстанской и Актюбинской областям в 1960 году. В 1975—78 гг. агроклиматические справочники были переизданы по южным областям.

Сегодня в связи изменением климата возникла необходимость переоценки агроклиматических ресурсов на основе современных физико-математических моделей и геоинформационных систем. Например, за последние 70 лет в среднем по Казахстану

среднегодовая температура воздуха повышалась со скоростью 0,28 °С каждые 10 лет. Более значимые изменения наблюдались на севере, западе и юге Казахстана (на 0,30—0,37 °С каждые 10 лет) (III-VI Национальное Сообщение ..., 2013).

В ТОО «Институт географии» Министерства образования и науки Республики Казахстан под руководством доцента С. С. Байшоланова завершается исследование по теме № 5041/ГФ4 «Агроклиматические ресурсы Республики Казахстан в условиях изменения климата», в рамках которой готовятся научно-прикладные агроклиматические справочники по 4-м северным и 2-м западным областям Казахстана.

Данная статья подготовлена на основе результатов проекта и посвящена оценке основных агроклиматических показателей, агроклиматическому зонированию, оценке биоклиматического потенциала и засушливости климата в Западно-Казахстанской и Актюбинской областях.

Исходные данные и методы исследования

При проведении исследований были использованы данные метеорологических станций (МС) РГП «Казгидромет» Министерства энергетики Республики Казахстан за период 1981—2016 гг. Многолетние данные были обработаны общепринятыми методами статистической и климатологической обработки данных. Агроклиматические карты построены с помощью программного обеспечения ArcGIS 10.1.

Ресурсы солнечной радиации вегетационного периода оценивались по фотосинтетически активной радиации (ФАР) и продолжительностью солнечного сияния.

Продолжительность вегетационного периода определялась продолжительностью периода с температурой воздуха выше 10 °С.

Для комплексной оценки агроклиматических условий выполнено агроклиматическое зонирование (районирование) территории по тепло- и влагообеспеченности. Агроклиматическое зонирование территории облегчает решение ряд практических и научных задач в сельском хозяйстве. Например, на его основе можно провести

агроклиматическое районирование сельскохозяйственных культур. По агроклиматическим зонам можно распределить сроки проведения агротехнических мероприятий (сев, уборка, обработка почвы и т. д.).

В ранее опубликованных агроклиматических справочниках зонирование проводилось по сумме активных температур воздуха выше 10 °С и гидротермическому коэффициенту Г. Т. Селянинова (ГТК). В данной работе вместо ГТК был использован коэффициент увлажнения «К», предложенный Байшолановым С. С. для условий Казахстана (Григорук, Аюлов, Долгих, Байшоланов, 2012).

Данный коэффициент увлажнения (К) схож с другими коэффициентами увлажнения, предложенными Д. А. Бринкеном, С. А. Сапожниковой и Ю. И. Чирковым, Л. С. Кельчевской, Л. С. Кельчевской и Ю. С. Мельником (Лосев, 1994; Грингоф, Клещенко, 2011).

При расчете К для условий Казахстана коэффициент аккумуляции осадков холодного периода принимается равным 0,5, а коэффициент учета температуры воздуха — 0,12:

$$K = \frac{0,5 \sum R_{11-4} + \sum R_{5-8}}{0,12 \sum T_{5-8}}, \quad (1)$$

где: $\sum R_{11-4}$ — сумма осадков за ноябрь–апрель;

$\sum R_{5-8}$ — сумма осадков за май–август;

$\sum T_{5-8}$ — сумма температур воздуха за май–август.

В многолетнем разрезе (1981—2016 гг.) коэффициент К имеет довольно тесную связь с ГТК и со средней областной урожайностью яровой пшеницы ($r = 0,63—0,79$), что дает основание для его использования в оценке условий увлажнения.

В различных индексах увлажнения коэффициент учета температуры воздуха (для характеристики испаряемости) составляет от 0,10 (Г. Т. Селянинов, Н. В. Бова, Л. С. Кельчевская, Е. С. Уланова) до 0,18 (М. И. Будыко). В условиях Казахстана для коэффициента К экспериментальным путем было подобрано значение 0,12, при котором дефицит увлажнения соответствует значениям

менее 1,0 и оценочные градации были схожи с ГТК.

Для зонирования были установлены градации уровней характеристик термических условий и условий увлажненности: для суммы активных температур воздуха выше 10 °C шаг составил 500 °C, для коэффициента увлажнения $K = 0,20$ (в пределах, наблюдаемых на равнинной территории Казахстана).

Для оценки биоклиматического потенциала (БКП) территории была использована имитационная система «Климат–Почва–Урожай», разработанная во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной метеорологии (ФГБУ «ВНИИСХМ»). БКП является комплексной величиной, характеризующей общую потенциальную продуктивность земель с учетом основных факторов климата и плодородия почвы. Урожай, полученный в результате имитации, представляет собой искомую оценку биоклиматического потенциала (Абашина, Сиротенко, 1986; Павлова, Сиротенко, Абашина, 2013).

В качестве входной информации используются данные метеорологических и агрометеорологических наблюдений, а также данные о водно-физических свойствах почвы и уровне ее плодородия. В нашем случае БКП характеризуется урожайностью яровой пшеницы в ц/га.

Существуют множество методов оценки засухи. Прямым показателем засухи является запас продуктивной влаги (ЗПВ) в почве. В Казахстане, в связи с разреженностью сети наблюдения за влажностью почвы, очень сложно проводить оценку засухи на основе данных ЗПВ. Поэтому для оценки засухи широко используются различные косвенные методы.

Как не существует универсального определения понятия засухи, так не существует единого индекса или показателя, который мог бы характеризовать все типы засух. В справочнике ВМО описаны основные индексы и показатели засухи, используемые сегодня в мире (Справочник, 2016).

На территории стран СНГ широко используются: гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК), коэффициенты увлажнения Д. И. Шашко (Md), П. И. Колоскова,

А. В. Процорова, Н. Н. Иванова, Л. С. Кельчевской, Д. А. Бринкена, С. А. Сапожниковой и Ю. И. Чиркова, показатель засушливости Д. А. Педя и т. п. (Грингоф, Клещенко, 2011; Лосев А.П., 1994).

В США используются «индекс Палмера» (PDSI), «Стандартизированный индекс осадков» (SPI), «Индекс критического содержания воды в посевах» (CWSI), а в горной местности — «Индекс запаса поверхностной влаги» (SWSI) и т. д.

Идентификация засухи в Казахстане с помощью SPI показали удовлетворительные результаты. Однако сравнение с ГТК выявило погрешности SPI в определенных условиях (Кожаметов, Исаков, Байбазаров, 2016).

В Российской Федерации для мониторинга атмосферно-почвенных засух используется агрометеорологический коэффициент увлажнения (АКУ), объединяющий в себе ГТК и ЗПВ (Страшная, Пурина, Чуб, Задорнова, Чекулаева, 2013). Для ежедекадного мониторинга засухи также успешно применяется система комплексной оценки засух и засушливых явлений, разработанная во ВНИИСХМ. В этой системе используются 8 показателей, включая ГТК, Md и ЗПВ (Зоидзе, Хомякова, 2002; Страшная, Пурина, Чуб, Задорнова, Чекулаева, 2013).

Многолетняя практика показала, что для оценки засухи и засушливости климата в условиях Казахстана, наиболее подходящим является гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, рассчитанный за период май–август (Байшоланов, 2010; Муканов, Байшоланов, 2012):

$$ГТК_{5-8} = \frac{\sum R_{5-8}}{0,1 \sum t_{5-8}}, \quad (2)$$

где: ГТК₅₋₈ — ГТК за май–август;

$\sum R_{5-8}$ — сумма осадков за май–август;

$\sum t_{5-8}$ — сумма среднесуточных температур воздуха за май–август.

В условиях Казахстана для оценки атмосферной засухи в период май–август используются критерии ГТК, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки засухи по ГТК ₅₋₈	
ГТК ₅₋₈	Интенсивность засухи
< 0,40	Очень засушливо
0,40–0,59	Умеренно засушливо
0,60–0,79	Слабо засушливо
≥ 0,80	Не засушливо

Результаты исследований

Ресурсы солнечной радиации. На изучаемой нами территории в вегетативно активный период (с мая по август) месячные суммы ФАР при средней облачности составляют на севере 284—336 МДж/(м²·мес), на юге 293—355 МДж/(м²·мес). Максимальная сумма ФАР обычно наблюдается в июне.

Территория двух западных областей простирается в пределах 46—52° с. ш. В вегетационный период продолжительность светового дня на севере территории составляет 15—17 ч, а на юге 14—16 ч. Для растений длинного дня нормальная продолжительность освещения в сутки составляет 15—18 ч, а для растений короткого дня 12—14 ч. Соответственно территория исследуемых областей подходит для роста и развития растений длинного дня.

На изучаемой территории с мая по август средняя продолжительность солнечного сияния (по гелиографу) составляет на севере 10—11 ч, на юге 11—12 ч в сутки.

Таким образом западные земельные сельскохозяйственные области Казахстана обладают ресурсами солнечной радиации достаточными для оптимальной жизнедеятельности сельскохозяйственных культур и особенно благоприятны для растений длинного дня.

Продолжительность вегетационного периода. На территории двух западных областей продолжительность вегетационного периода (период с температурой выше 10 °С) колеблется от 145 суток на севере до 180 суток на юге. Весной температура воздуха устойчиво переходит через 10°С на севере изучаемой территории в начале мая, на юге — в середине апреля. Осенью температура воздуха переходит

через 10 °С на севере в конце сентября, на юге — в первой декаде октября.

Ресурсы тепла. На территории исследуемых западных областей за период с температурой воздуха выше 5 °С в среднем сумма температур составляет от 2760 °С до 3900 °С, а за период с температурой воздуха выше 10 °С — от 2470 до 3670 °С. Для теплолюбивых культур (период с температурой выше 15 °С) ресурсы тепла составляют 1950—3230 °С.

Для оценки соответствия ресурсов тепла требованиям культур определяются суммы температур различной обеспеченности. Принято считать, что сумма температур с обеспеченностью 80–90 % является достаточной для обеспечения растений теплом (Лосев, 1994).

В северной части исследуемой территории сумма активных температур воздуха выше 10 °С при 90-процентной обеспеченности составляет 2270 °С, что удовлетворяет требованиям для выращивания мягких и твердых сортов пшеницы, среднеспелых сортов подсолнечника, раннеспелых сортов кукурузы. В центральной части исследуемой территории указанная сумма оценивается в 3000 °С, что обеспечивает условия произрастания яровых зерновых культур, всех сортов подсолнечника, кукурузы и сорго. На юге сумма температур выше 10 °С с обеспеченностью 90 % достигает 3500 °С, что позволяет выращивать, например, позднеспелые сорта сои.

Агроклиматические зоны. Анализ распределения по территории Казахстана значения коэффициента увлажнения K и сумм активных температур воздуха выше 10 °С (ΣT_{10}) позволил выделить на равнинной территории Казахстана 6 агроклиматических зон. При этом с III по VI зоны по термическим условиям подразделяются на подвиды (а) и (б) (см. табл. 2).

В двух западных зерносеющих областях выделяются 5 агроклиматических зон, с II по VI (рис. 1). Надо отметить, что на карте, для снижения нагрузки убраны слои с границами районов, с населенными пунктами, водными объектами и основными автомагистралями (в оригинале они обозначены).

Таблица 2

Агроклиматические зоны на равнинной территории Казахстана

№ зоны	Название зоны	К	$\Sigma T_{10}, ^\circ\text{C}$
I	Умеренно влажная умеренно теплая	1,0–1,2	2000–2300
II	Слабовлажная умеренно теплая	0,8–1,0	2200–2500
III	а) Слабо засушливая умеренно теплая	0,6–0,8	2400–2500
	б) Слабо засушливая теплая		2500–3000
IV	а) Умеренно засушливая теплая	0,4–0,6	2500–3000
	б) Умеренно засушливая умеренно жаркая		3000–3500
V	а) Очень засушливая умеренно жаркая	0,2–0,4	3000–3500
	б) Очень засушливая жаркая		3500–4000
VI	а) Сухая жаркая	< 0,2	3500–4000
	б) Сухая очень жаркая		> 4000

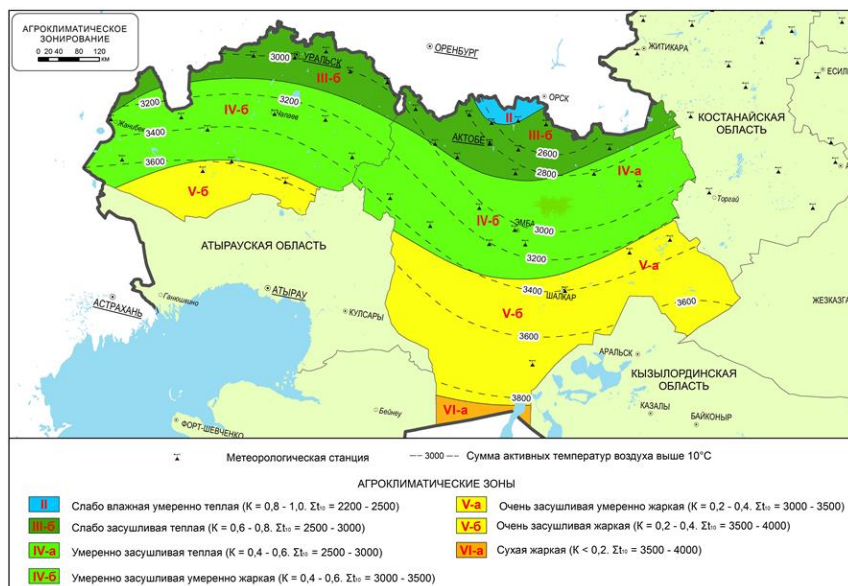


Рис. 1. Агроклиматические зоны.

Зона I располагается севернее исследуемой нами территории, т. е. в Северном Казахстане.

Зона II «Слабовлажная умеренно теплая» занимает северную окраину Актыбинской области.

Зона III–б «Слабо засушливая теплая» расположена в северной части Западно-Казахстанской и Актыбинской областей.

Зона IV–а «Умеренно засушливая теплая» занимает восточную часть центральной полосы Актыбинской области. Зона IV–а плавно переходит в зону IV–б.

Зона IV–б «Умеренно засушливая умеренно жаркая» занимает центральную часть Западно-Казахстанской области, центр и запад центральной полосы Актыбинской области.

Зона V–а «Очень засушливая умеренно жаркая» занимает юго-восточную часть Актыбинской области. Зона V–а плавно переходит в зону V–б.

Зона V–б «Очень засушливая жаркая» занимает юг Западно-Казахстанской области, южную и юго-западную часть Актыбинской области.

Зона VI–а «Сухая жаркая» занимает самую южную окраину Актыбинской области.

Биоклиматический потенциал. Для комплексной оценки почвенно–климатического потенциала с помощью имитационной системы «Климат–Почва–Урожай» был рассчитан биоклиматический потенциал (БКП) территории, который в нашем случае характеризует урожайность яровой пшеницы при естественном увлажнении территории.

Карта биоклиматического потенциала территории западных областей приведена на рис. 2. Если климатические показатели относительно устойчивы по территории, то почвенные показатели (тип, механический состав, балл бонитет) распределяются неравномерно. Например, в южной части исследуемых областей распространены почвы как пригодные, так и непригодные для земледелия. Здесь при расчете БКП учитывались почвы пригодные для земледелия.

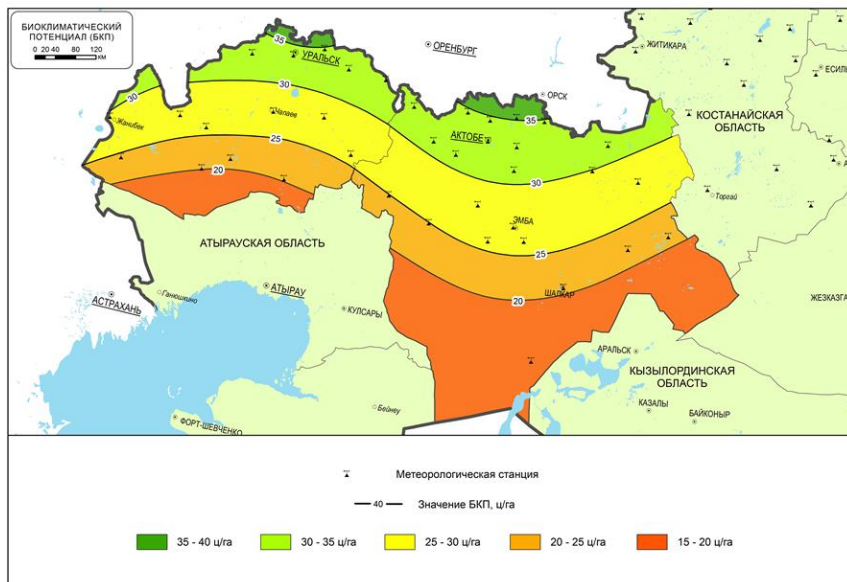


Рис. 2. Биоклиматический потенциал территории.

На крайнем севере Западно-Казахстанской и Актыбинской областей значения БКП составляют 35—40 ц/га. Они обеспечиваются более плодородными почвами (южные черноземы, темно-каштановые почвы). К югу значение БКП снижается. На остальной территории северной части областей БПК составляет 30—35 ц/га. В центральной полосе областей БПК составляет 25—30 ц/га, в южной части — менее 20 ц/га. Следует отметить, что значения БПК в южной части областей не относятся к почвам непригодным для земледелия (бурые пустынные и серо-бурые пустынные почвы, солонцы, солончаки и пески). Здесь в долинах рек и озер распространены луговые, лиманно-луговые, пойменные луговые и лесолуговые почвы, а также лугово-каштановые, светло-каштановые и лугово-бурые почвы.

Анализ показал, что максимальная урожайность яровой пшеницы по административным районам областей составляет около 50 % от БКП. Это означает, что верхний уровень использования биоклиматического потенциала составляет примерно 50 %, что

указывает как на недостаточно высокий уровень земледелия в Казахстане, так и на имеющиеся потенциал. К примеру, западноевропейский уровень использования БКП составляет 80—85 %.

Засушливость вегетационного периода. Климат Западного Казахстана в вегетационный период является засушливым. Оценка засушливости климата по $ГТК_{5-8}$, проведенная на основе многолетних данных, показала, что на изучаемой территории имеются 3 категории засушливости (рис. 3).

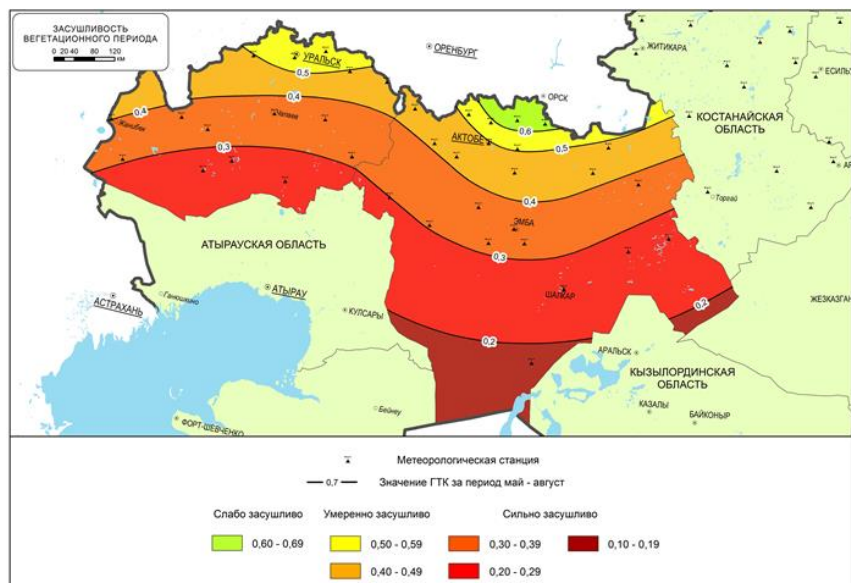


Рис. 3. Засушливость вегетационного периода.

Вегетационный период является климатически «слабо засушливым» на крайнем севере Актыбинской области, где $ГТК_{5-8}$ составляет 0,60—0,69. Остальная территория северной части Актыбинской области, а также северная часть Западно-Казахстанской области характеризуются как «умеренно засушливая». Здесь $ГТК_{5-8}$

составляет 0,40—0,59. В центральной и южной частях двух областей вегетационный период климатически является «сильно засушливым», где ГТК₅₋₈ составляет менее 0,40.

Таким образом, северные части изучаемых двух западных областей, где возделываются сельскохозяйственные культуры в условиях естественного увлажнения, климатически являются слабо и умеренно засушливыми.

Выводы

В западных двух земледельческих областях Казахстана ресурсы солнечной радиации достаточны для оптимальной жизнедеятельности сельскохозяйственных культур и больше подходит для растений длинного дня. Продолжительность вегетационного периода меняется от 145 суток на севере до 180 суток на юге. Тепловые ресурсы северной части областей удовлетворяют требования мягких и твердых сортов пшеницы, среднеспелых сортов подсолнечника, раннеспелых сортов кукурузы. В центральной и южной части удовлетворяют требования всех яровых зерновых культур, всех сортов подсолнечника, кукурузы и сорго. Анализ пространственного распределения показателей тепло- и влагообеспеченности позволил выделить на территории Актюбинской области 5 агроклиматических зон, в Западно-Казахстанской области — 3 зоны. Оценка показала, что на территории областей биоклиматический потенциал составляет от 15 до 40 ц/га в урожайности яровой пшеницы. Территория областей по климатической засушливости вегетационного периода подразделяется на 3 зоны, от «слабо засушливой» на севере, до «сильно засушливой» на юге.

Приведенные выше результаты будут полезны при решении хозяйственных и научных задач в сельском хозяйстве. Например, при рациональном размещении сельскохозяйственных культур, разработке научных рекомендаций и т. д.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки республики Казахстан, грант 5041/ГФ4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абашина Е. В., Сиротенко О. Д. (1986). Прикладная динамическая модель формирования урожая для имитационных систем агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства // Труды ВНИИСХМ. Вып. 21. С. 13—18.

Байшолонов С. С. (2010) О повторяемости засух в зерносеющих областях Казахстана // Гидрометеорология и экология. № 3. С. 27—38.

Грингоф И. Г., Клеценко А. Д. (2011). Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 1. Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. — Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 808 с.

Григорук В. В., Аюлов А. М., Долгих С. В., Байшолонов С. С. (2012). Акмолинская область: климат и урожай. — Алматы: Казгидромет. 88 с.

Зоидзе Е. К., Хомякова Т. В. (2002). Основы оперативной системы оценки развития засух и ее опыт экспериментальной эксплуатации // Труды ВНИИСХМ. Вып. 34. С. 48—66.

Кожасхметов П. Ж., Исаков Е. А., Байбазаров Д. А. (2016) Использование стандартизированного индекса осадков (СИО) для выявления засух в Казахстане // Гидрометеорология и экология. № 1. С. 22—32.

Лосев А. П. (1994). Практикум по агроклиматическому обеспечению растениеводства. — СПб: Гидрометеоиздат. 243 с.

Муканов Е. Н. Байшолонов С. С. (2012). Районирование и оценка засушливости вегетационного периода на территории Казахстана // В сб.: Материалы международной научной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы прикладной гидрометеорологии». Одесса, 12—14 сентября 2012 г. — Одесса: ОДЕКУ. С. 100—104.

Павлова В. Н., Сиротенко О. Д., Абашина Е. В. (2013). Методика оценки агроклиматических условий для мониторинга изменений современного климата на территории РФ. URL: <http://method.meteorf.ru>. (дата обращения: 05.04.2017).

Справочник по показателям и индексам засушливости (2016). ВМО № 173. 60 с.

Страшина А. И., Пурина И. Э., Чуб О. В., Задорнова О. И., Чекулаева Т. С. (2013) Автоматизированная технология мониторинга и расчета количества декад с почвенной и атмосферно-почвенной засухой под зерновыми культурами // Труды Гидрометцентра России. Вып. 349. С. 150—160.

III-VI Национальное Сообщение Республики Казахстан Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2013). — Астана. 274 с.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯЧЕЕК В ГРОЗОГРАДОВЫХ ОБЛАКАХ

*А. М. Абшаев¹, М. Т. Абшаев¹, А.Х. Аджиев¹, Я. А. Садыхов¹,
А. Б. Чочаев¹, А. А. Синькевич², Ю. П. Михайловский²*

¹Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, д. 2

²Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7
e-mail: sinkev51@mail.ru

Поступила в редакцию 6.09.2017

Поступила после доработки 13.10.2017

Введение

Развитие радиолокационных, грозопеленгационных, спутниковых и наземных средств наблюдений, а также программных средств синхронизированной во времени и пространстве обработки комплекса разнородной взаимодополняющей информации позволило создать высокоинформативные системы отображения полей облачности и осадков в реальном масштабе времени и развить методы их краткосрочного прогноза для решения многих практических задач.

В данной работе делается попытка применения комплекса такой аппаратуры и программ для исследования мощных конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений погоды (град, гроза, ливень, шквал).

Ранее на основе обширных радиолокационных исследований градовых облаков была проведена их классификация, описаны ячейковая структура, условия развития и закономерности эволюции градовых процессов различных типов (Chisholm, Renic, 1972; Marwitz, 1972; Абшаев, Имамджанов, 1974; Абшаев, 1984). Показано, что ячейковая структура, место зарождения и диссипации,

закономерности эволюции и взаимодействия конвективных ячеек (КЯ) в одноячейковых, многоячейковых, суперячейковых и переходного типа градовых процессах существенно отличаются.

Облачная система одноячейковых процессов состоит из нескольких одновременно существующих пространственно изолированных короткоживущих и не взаимодействующих между собой осесимметричных КЯ, имеющих разные стадии развития. Облачная система упорядоченных многоячейковых процессов состоит из трех и более несимметричных взаимодействующих между собой КЯ и систематически обновляется за счет развития новых КЯ, зарождающихся на наветренном фланге наиболее мощной доминирующей КЯ. Усиление очередной КЯ приводит к зарождению на ее правом фланге новой КЯ, которая, по мере развития своими осадками подавляет восходящий поток, питающий предыдущую (материнскую) КЯ, приводит к ее ослаблению и диссипации на подветренном фланге.

Значительно сложнее обстоит дело в случае неупорядоченных грозоградовых процессов и грозоградовых процессов переходного типа, в которых место зарождения и диссипации КЯ трудно предсказуемо. Кроме того, происходящие зачастую процессы разделения и слияния КЯ, значительно осложняют анализ закономерностей эволюции ячейковой структуры конвективных облачных кластеров.

1. Слияние и разделение ячеек

Слияние конвективных облаков являлось объектом множества экспериментальных и численных исследований (Dennis et al., 1970; Westcott, 1984, 1994; Lee et al., 2006a, b). Под этим подразумевается сложный динамический и микрофизический процесс, при котором две КЯ объединяются в одну. На основе радиолокационных и численных исследований в работах (Simpson и Woodley, 1971; Changnon, 1976; Wiggert, 1981; Woodley, 1982; Turpeinen, 1982; Krauss, 2012; Sinkevich, 2014) было показано, что слияние ячеек приводит к существенному росту объема, верхней границы и максимальной отражаемости облака,

увеличению массы и потока осадков в 2—3 раза. Большинство исследователей отмечают, что кучево-дождевые облака, сформированные слиянием двух или нескольких конвективных ячеек, являются наиболее мощными и долгоживущими.

В работе (Lemon, 1976) показано, что мощность суперячейкового облака интенсифицируется, когда индивидуальные ячейки с фланговой линии присоединяются к основному восходящему потоку. Симпсон показал (Simpson, Westcott, Clerman, 1980), что во Флориде слияние двух кучево-дождевых облаков среднего размера увеличивает в 10—20 раз количество осадков, и слившиеся ячейки ответственны за 86 % от общей суммы осадков, хотя 90 % от общего числа ячеек не сливались. Weaver и Nelson (1982) показали, что ячейки, возникшие под действием сильного шквалистого фронта кучево-дождевого облака, могут производить дискретное распространение и резкое усиление за счет слияния с основным облаком. Weaver и Lindsey (2004) предположили, что организованные линии фидерных облаков часто ассоциируются с усилением кучево-дождевого облака и являются предвестниками опасных явлений погоды.

В работе (Dimitrovski, 2014) на основе радиолокационных данных и трехмерного численного моделирования облака рассмотрен один случай разделения суперячейкового облака на две ячейки, которые после разделения разошлись по разным траекториям, и в дальнейшем прошли стадию усиления, стабилизации и диссипации.

Однако усиление облака возможно за счет двух совершенно разных факторов:

1) слияние двух КЯ приводит к слиянию питающих их восходящих потоков и формированию одной КЯ с более мощным восходящим потоком, что маловероятно. Но если это верно, то разделение КЯ должно приводить к ослаблению конвективной облачности, что противоречит, например, работе (Dimitrovski, 2014);

2) одна из КЯ интенсивно развивается, увеличиваясь по площади до слияния границ ее радиоэха с границами радиоэха близлежащей КЯ. При этом усиление облака связано с усилением одной из сливающихся КЯ, а вторая КЯ диссипирует в процессе кажущегося слияния.

В данной работе на основе современных аппаратно-программных средств предпринята попытка более детального анализа множественного слияния конвективных ячеек, с рассмотрением истории ячеек до и после слияния. С этой целью изучалась эволюция пространственной структуры многоячейковой облачной системы, временной ход ее одномерных, двумерных и трехмерных параметров, определение которым дано, например, в (Абшаев, 2015; Абшаев, 1984; Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич и др., 2011; Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова и др., 2010; Абшаев А.М. Абшаев М.Т., Малкарова и др., 2014). При этом под КЯ будем облачное образование радиоэха которого ограничено замкнутыми изолиниями отражаемости и имеет отдельную куполообразную вершину, а под слиянием двух и более КЯ — процесс объединения радиоэха различных КЯ.

2. Методика измерений

Наблюдения проводились с помощью следующих технических систем:

Автоматизированный радиолокационный комплекс «АСУ-МРЛ» (Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич и др., 2011), предназначенный для целей штормоповещения и управления противоградовыми операциями. Программно-технический комплекс «АСУ-МРЛ» построен на базе на 10 см канала радиолокатора «МРЛ-5М», имеющего импульсную мощность передатчика 500 кВт, ширину диаграммы излучения 1,5 градуса и чувствительность приемника 141 дБ/Вт.

«АСУ-МРЛ» обеспечивает панорамный обзор пространства каждые 3,5 мин, получение трехмерных полей отражаемости облачных систем, расчет карт метеоявлений, размера и кинетической энергии града, интенсивности и количества осадков и др., измерение одномерных (высота верхней границы, отражаемость на заданной высоте и др.), двумерных (максимальная отражаемость в столбе, вертикально интегрированная водность VII и др.) и трехмерных (объем облака и интегрированная по всему облаку водность на заданном уровне отражаемости и др.) параметров облаков, построение

графиков временного хода параметров КЯ, отображение координат внесения противораковых ракет и пеленгов грозových разрядов на фоне радиолокационной структуры облаков, расчет характеристик грозových разрядов и т.д.

Система грозопеленгации Северного Кавказа (Аджиев, Абшаев, Тумгоева и др., 2016), построенная на базе четырех сенсоров LS8000, предназначена для измерения характеристик высокочастотного (VHF) и низкочастотного (LF) электромагнитного излучения грозových разрядов, где VHF импульсы излучения связаны с разрядами облако-облако, а LF — импульсы с энергетически более мощными разрядами облако-земля.

Согласно паспортным данным система обеспечивает точность определения: местоположения молниевых разрядов ± 300 м, полярности разряда — 100 %; значения тока молнии — 10 %, времени разряда, — не хуже 12 %, распознавание разрядов облако-облако и облако-земля — $\sim 100\%$.

3. Объект исследования

Рассматривается эволюция КЯ в мощном неупорядоченном многоячейковом градовом процессе, наблюдавшемся 12.06.2015 в Андроповском и Кочубеевском районах Ставропольского края. По данным системы «АСУ-МРЛ» и наземных наблюдений некоторые КЯ давали ливневые осадки с крупой и градом диаметром до 1,0 см. Воздействия на КЯ проводились Ставропольской противораковой службой. Всего в этот день было израсходовано 261 противораковой ракет типа «Алазань-6», засеяно 8 градоопасных КЯ, которые согласно (Абшаев, 2010) отнесены к объектам воздействия (ОВ) II категории, 9 градовых КЯ, отнесенных к ОВ III категории и одна сверхмощная градовая КЯ, отнесенная к ОВ IV категории, из которой выпадал град размером до 1 см, не нанесший ощутимого ущерба.

4. Аэросиноптическая характеристика

В июне 2015 г. погоду на Ставрополье формировали циклоны, перемещавшиеся преимущественно с запада на восток, и связанные с ними атмосферные фронты. В средней тропосфере отмечались глубокие барические ложбины. В результате этого практически ежедневно на территории Ставропольского края отмечались грозовые ливни, сопровождавшиеся местами с градом и шквалистым ветром.

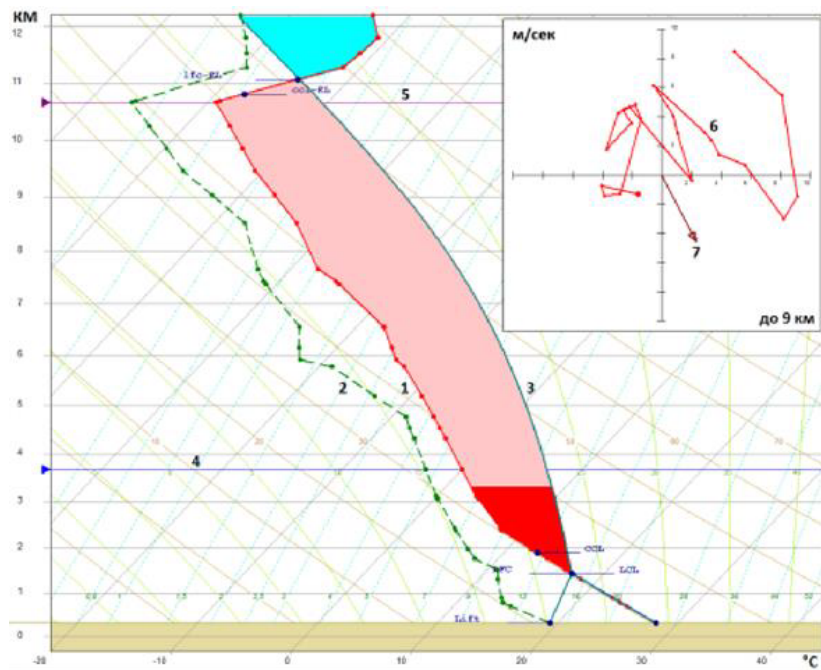


Рис. 1. Аэрологическая диаграмма SKEW-T вертикального профиля температуры (1) и точки росы (2);

3 — кривая состояния; 4 — уровень изотермы 0 °C; 5 — тропопауза;

6 — годограф ветра по высотам;

7 — направление переноса кучевых облаков.

Станция Минеральные Воды (37054). 29.06.2015, 12 ч UTC.

Погода 12.06.2015 была обусловлена прохождением холодного фронта и ложбиной южного циклона в приземном слое, ось высотной ложбины находилась в средней тропосфере. По данным аэрологического зондирования (рис. 1) максимальная расчетная скорость вертикальных потоков достигала 32 м/с, ведущий поток был северо-западным (направление 150 градусов, скорость 18 км/ч); коэффициент потенциальной конвективной энергии неустойчивости (CAPE) — 3086 Дж/кг, высота уровня конденсации — 2 км с температурой 12,1 °С, высота верхней границы уровня конвекции — 11,3 км, высота изотермы 0°С — 3,4 км, высота тропопаузы — 10,4 км над уровнем моря. Горизонтальный ветер плавно нарастал с высотой от 3,5 м/с на высоте 1 км до 41,2 м/с на высоте 12 км, характеризуясь разворотом на 100—130 градусов между нижним и верхним слоями тропосферы. Сдвиг ветра был максимальным в слое развития конвективной облачности. Перенос облаков происходил в северо-западном направлении (в направлении 333 градуса) со скоростью 18,3 км/ч. По прогнозу ожидалось развитие многоячейкового градового процесса с размером града до 1,4 см и шквалом с порывами ветра до 23 м/с.

5. Анализ развития облачной системы

Развитие конвективной облачности в районе г. Кисловодск началось примерно в 11 часов по московскому времени (МСК). Однако формируемые в разных местах ячейки были еще слабыми, зачастую не фиксировались радиолокатором, и не рассматривались. Наиболее мощные ячейки стали формироваться после полудня, а весь процесс продолжался вплоть до окончания дня. В настоящем исследовании анализируется временной период с 12:48 до 14:00 МСК и пространственный квадрат размером 30 км, включающим в себя г. Кисловодск.

За указанный период максимальная радиолокационная отражаемость Z_{max} облачной системы увеличивалась с 33 до 59 dBZ (рис. 2а), имея циклические спады, сменяемые ростом.

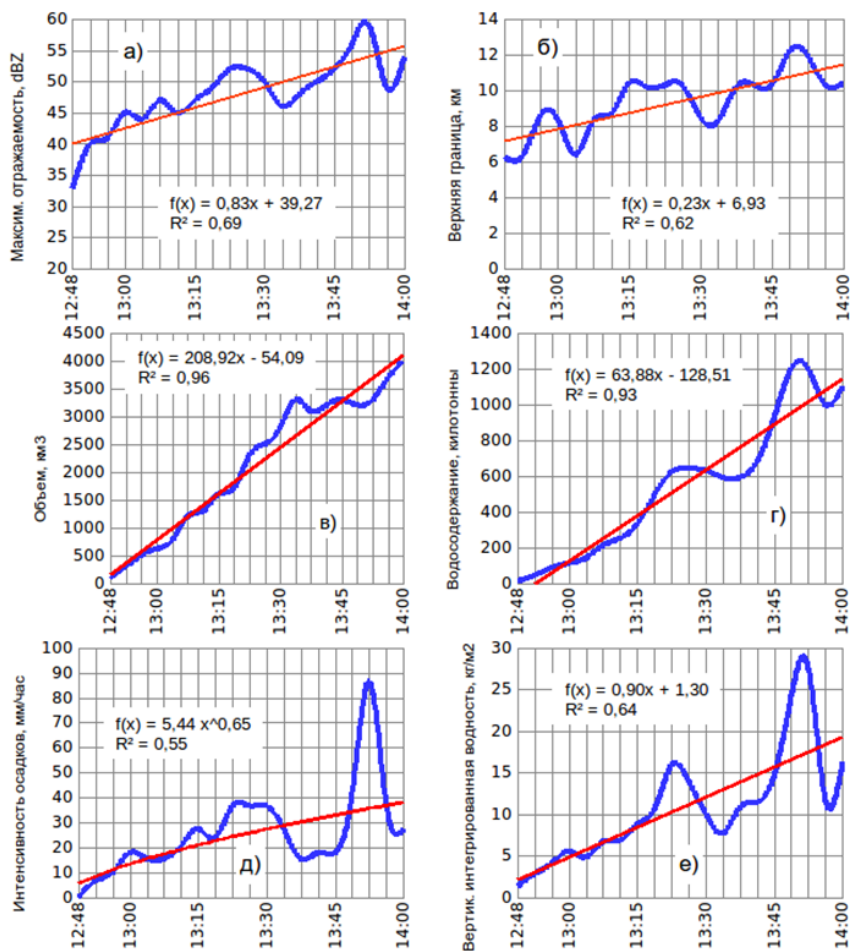


Рис. 2. Временной ход параметров (время МСК) облачной системы по радиолокационным измерениям:

- а) максимальная отражаемость, dBZ;
- б) высота верхней границы, км; в) объем, км³;
- г) водосодержание, килотонны; д) интенсивность осадков, мм/ч,
- е) вертикально-интегрированная водность, кг/м².

Зависимость Z_{max} от времени можно описать линейным уравнением $0,8 \times t_i + 39,3$ (здесь t_i — порядковый номер объемного радиолокационного файла обзора) с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,69$. Промежуток времени между двумя последовательными файлами обзора составлял примерно 220 сек. Изменение верхней границы облачности (ВГО) также носило осциллирующий характер (рис. 2б), который можно выразить линейным уравнением $0,2 \times t_i + 6,9$, $R^2 = 0,62$. Объем облачности V_{15} (рис. 2в) возрастал по приближенному закону: $208,9 \times t_i - 54,1$, $R^2 = 0,96$.

Водосодержание облачности M_{15} в килотоннах (рис. 2г) увеличивалось по закону $63,9 \times t_i - 128,5$, $R^2 = 0,93$. Максимальная интенсивность осадков (рис. 2д) удовлетворительно аппроксимируется степенной функцией $5,4 \times t_i^{6,5}$, $R^2 = 0,55$. Вертикально приведенная водность VII (рис. 2г) может быть грубо описана уравнением $0,9 \times t_i + 1,3$, $R^2 = 0,64$.

Таким образом, в данном случае в заданном временном периоде, простейшая линейная и степенная аппроксимации могут быть применены для описания динамики объема (рис. 2в) и водосодержания (рис. 2г) облачности. Другие параметры имеют более высокую дисперсию значений и удовлетворительно описываются линейным и степенным законом.

Анализ спутниковых данных также показал, что облачность в заданном секторе развивалась и усиливалась. Так, например максимальная интенсивность осадков, могла быть аппроксимирована по линейному уравнению $8,86 \times t^{0,13}$, $R^2 = 0,84$ (рис. 3а), что достаточно хорошо согласуется с радиолокационными измерениями интенсивности осадков (рис. 2д). Разница между начальными и конечными значениями данного параметра в исследуемом промежутке времени составляет около 20 %, что говорит о хорошем согласии между спутниковыми и радиолокационными измерениями. Такое же хорошее согласие наблюдается и для верхней границы облачности (рис. 2б и рис. 3б).

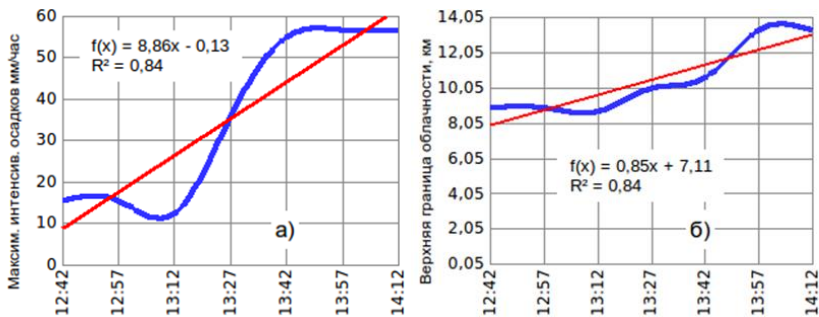


Рис. 3. Временной ход параметров (время МСК) облачной системы по спутниковым измерениям:

а) максимальная интенсивность осадков, мм/ч;

б) высота верхней границы облаков, км.

6. Анализ слияния конвективных ячеек

В заданном периоде времени были выделены 8 отдельных КЯ, которые сложным образом эволюционировали, иногда сменяя стадии развития и диссипации по нескольку раз. Кроме того, ячейки взаимодействовали между собой, «слияние» их радиоэха удалось зафиксировать не менее 6 раз.

К 13:03:52 КЯ № 1 продолжала развиваться: Z_{max} достигло 44 dBZ, интегральное водосодержание — $M_{15} = 9,5 \cdot 10^4$ тонн, площадь радиоэха увеличилась до 54 км^2 , граница радиоэха распространилась в направлении КЯ № 2 в виде навеса радиоэха, направленного на юг, в котором зародилась КЯ № 3. При этом радиоэхо КЯ № 3 сомкнулось с радиоэхо КЯ № 2. Таким образом, судя по карте максимума отражаемости, области радиоэха КЯ № 1, № 2 и № 3 слились. Но примечательно то, что на вертикальном сечении все три КЯ имеют индивидуальные вершины. Это означает, что произошло лишь смыкание областей радиоэха, обусловленное усилением КЯ № 1 и зарождением в ней новой КЯ № 3, а не слияние трех КЯ в одну.

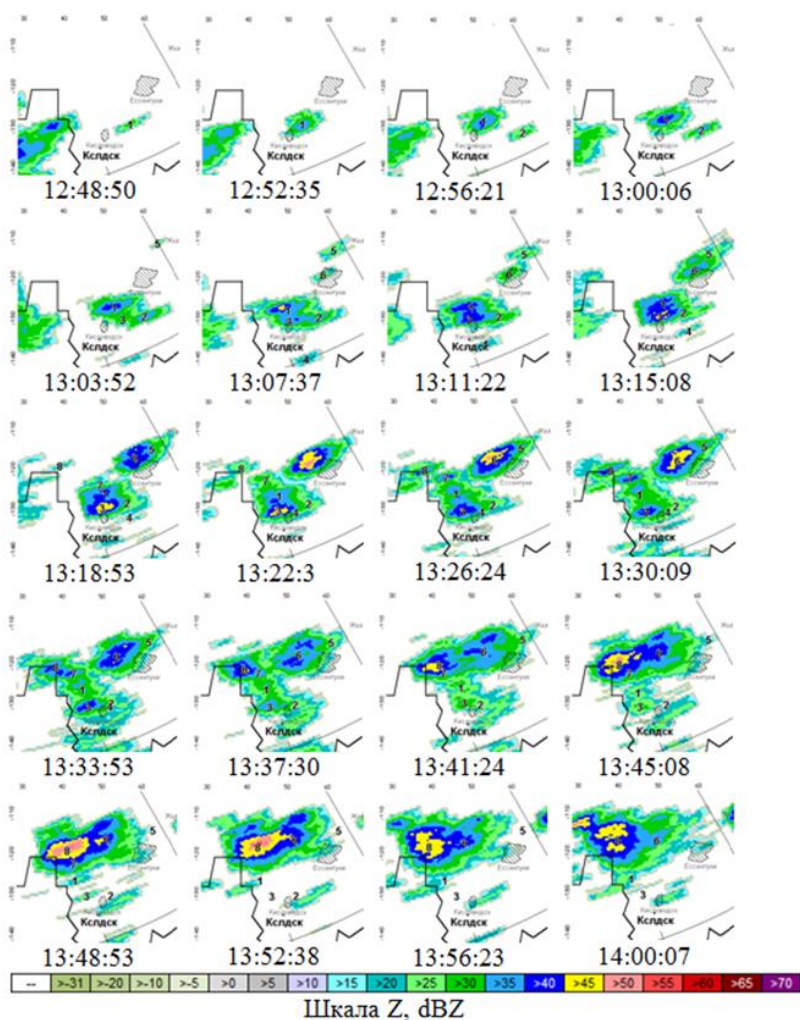


Рис. 4а. Последовательный во времени набор карт максимума отражаемости облачной системы в хронологическом порядке их зарождения.

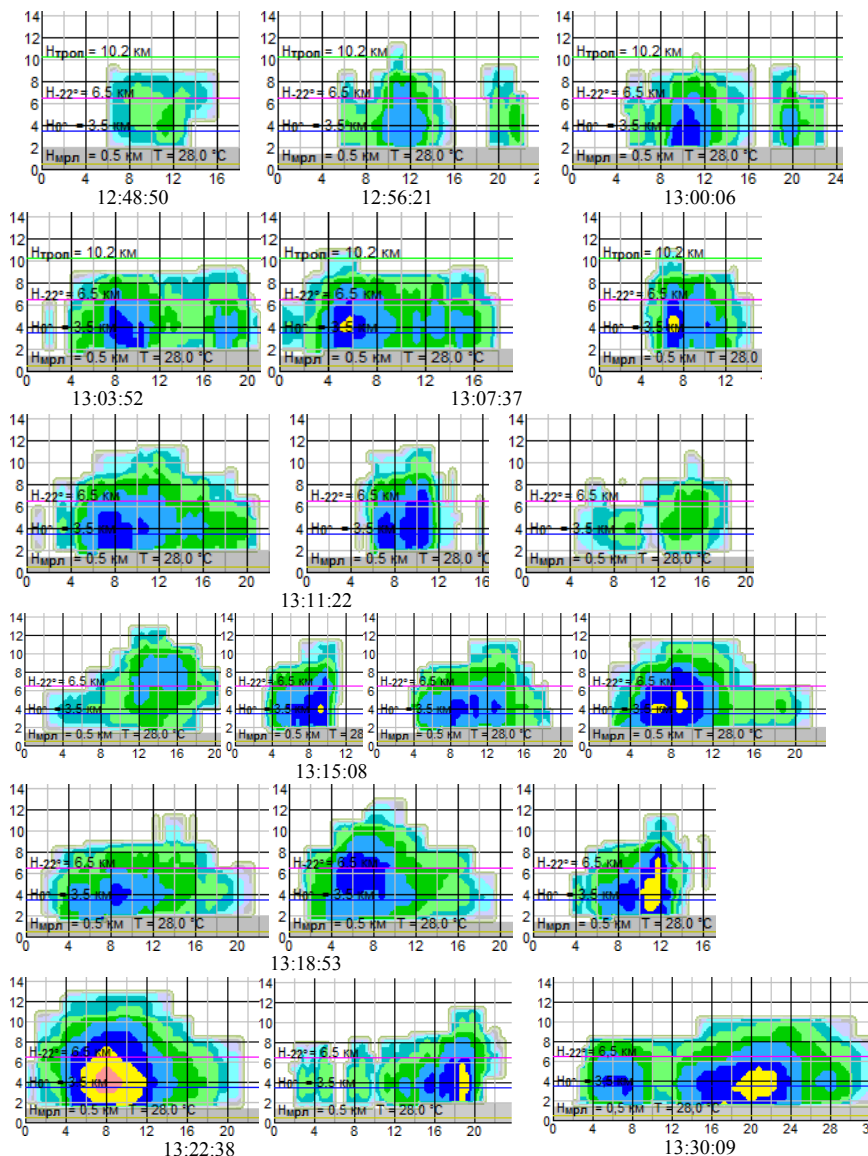


Рис. 46. Последовательный во времени набор карт вертикальных сечений в хронологическом порядке их зарождения.

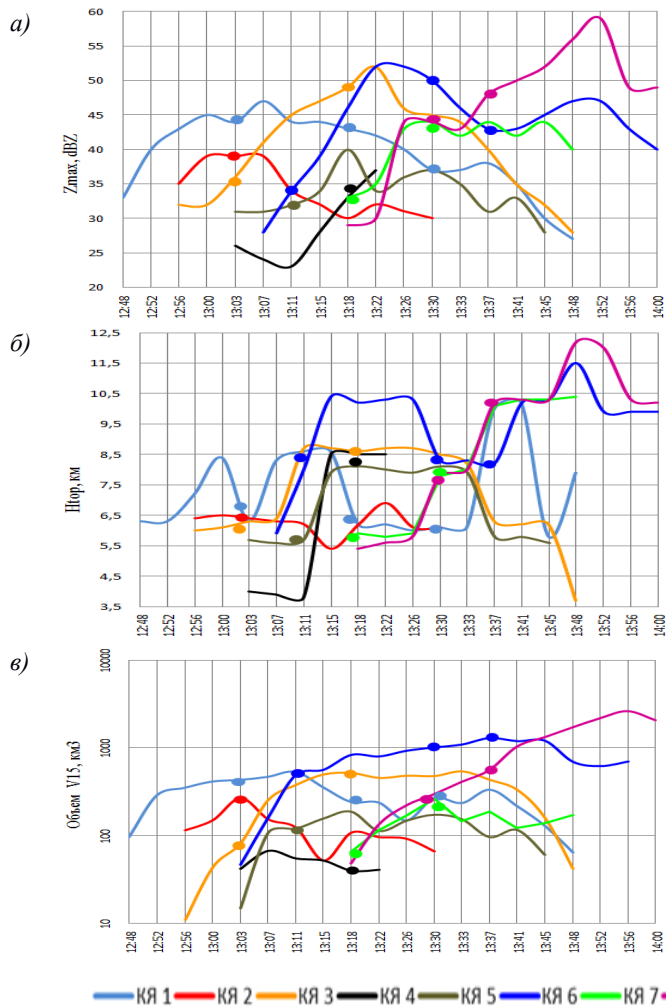


Рис. 5. Временной ход максимальной отражаемости Z_{max} (dBZ) конвективных ячеек (а), высоты верхней границы H_{top} (км) по уровню отражаемости 10 dBZ (б), объема V_{15} (км³) по уровню отражаемости 15 dBZ (в). Здесь и далее маленькие кружочки соответствуют времени слияния заданной ячейки с другой ячейкой, каждой конвективной ячейке определен один цвет линии и кружочка.

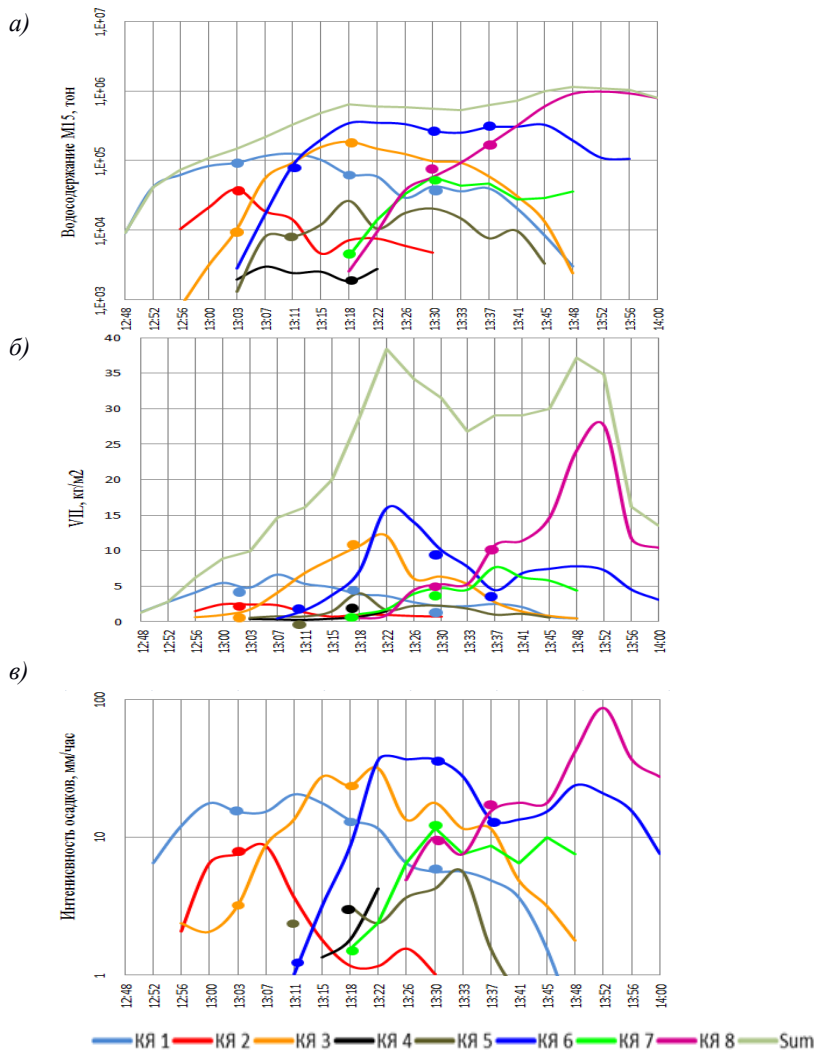


Рис. 6. Временной ход: водосодержания М15 (тонны) по уровню отражаемости 15 dBZ (а), вертикально приведенной водности WIL ($\text{кг}/\text{м}^2$) (б), интенсивности осадков I , $\text{мм}/\text{час}$ (в).

Кривая “Sum” показывает суммарное значение параметра по всем КЯ.

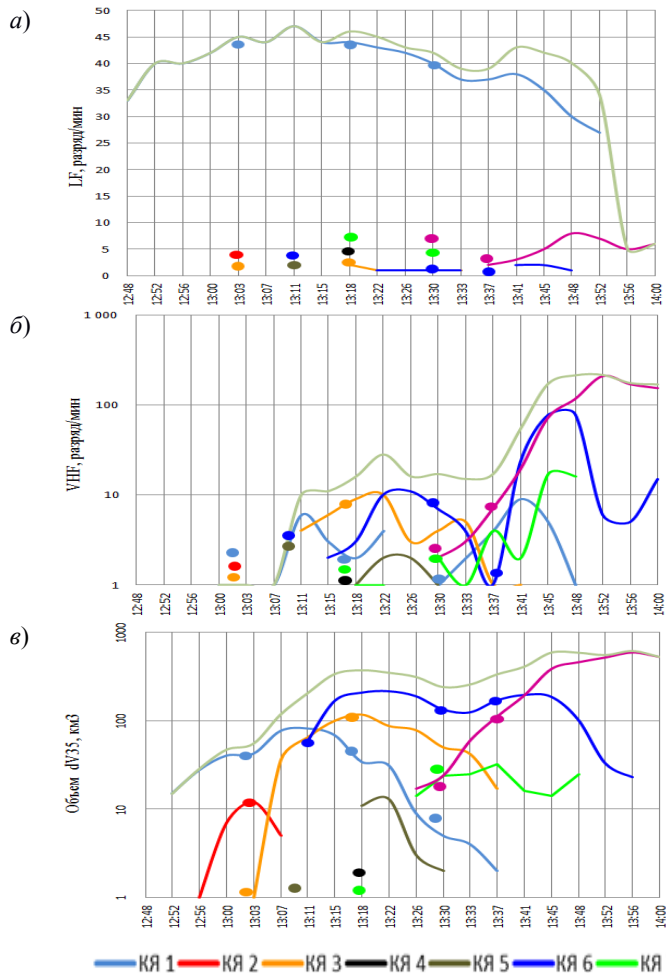


Рис. 7. Временной ход интенсивности грозовых разрядов типа LF облако-земля (разряд/мин) (а), интенсивности грозовых разрядов типа VHF облако-облако (разряд/мин) (б), объема dV_{35} (км^3) облака выше нулевой изотермы по уровню отражаемости 35 dBZ (в).

Кривая “Sum” показывает суммарную значение параметра по всем КЯ.

Тем не менее, уже в следующем обзоре в 13:07:37 КЯ № 1 показала значительный рост. Значения параметров достигли значений: $Z_{max} = 47 \text{ dBZ}$, $V_{15} = 582 \text{ км}^3$, $VIL = 6,7 \text{ кг/м}^2$, интенсивность осадков $Ri = 15,4 \text{ мм/ч}$, появились внутриоблачные грозовые разряды с интенсивностью до 7 разрядов/мин, регистрируемые VHF датчиком. В результате усиления радиолокационной отражаемости на вертикальном сечении ячейки появился характерный ложный вертикальный выступ высотой 2 км, связанный с эффектом боковых лепестков антенны радиолокатора. Реальная же верхняя граница облака, судя по верхней границе уровня отражаемости 15 dbZ, практически не изменилась.

Еще больший рост после слияния продемонстрировала КЯ № 3, у которой к 13:07:37 максимальная отражаемость Z_{max} увеличилась на 7 dBZ, объем ячейки V_{15} увеличился примерно в 3 раза, интегральное водосодержание M_{15} более, чем в 5 раз, приведенная водность с 1 до 4 кг/м², а осадки с 5 до 10 мм/час. В 13:11:22 у ячейки появляются первые грозовые разряды типа облако-облако интенсивностью до 6 разрядов/мин.

В отличие от них КЯ № 2 показала только увеличение интенсивности осадков, и уменьшение всех остальных параметров, что указывает на то, что ячейка находится на стадии диссипации, сокращаясь за счет выпадающих осадков.

В 13.11:52 КЯ № 1 и № 2 начинают ослабевать. КЯ № 3 становится наиболее мощной (доминирующей), границы ее радиоэха распространяются в направлении КЯ № 4 (см. рис. 4а).

В 13.15:08 КЯ № 3 продолжает развиваться и увеличиваться по площади, а ее границы достигают границ КЯ № 4 и в 13.18:53 происходит слияние КЯ № 3 и № 4 (см. рис. 4). В этот момент у КЯ № 3 регистрируются энергетически более мощные разряды типа облако-земля с интенсивностью до 3 разрядов/мин. После этого обе ячейки усиливаются на 3—4 dBZ и в 13.22:28 КЯ № 3 и № 4 достигают максимума своего развития и далее ослабевают.

Процесс слияния сопоставимых по мощности КЯ № 5 и № 6 также показан на рис. 4. Ячейка № 5 зародилась в 13:03:52 северо-восточнее ячейки № 1, а ячейка № 6 зародилась между ними в 13.07:37

(см. рис. 4а). Обе ячейки быстро развивались, увеличиваясь по площади, и уже в 13:11:22 границы их радиоэха сомкнулись, а в 13:15:08 слились по уровню 25—30 dBZ. После этого значение Z_{max} ячейки № 5 увеличилось на 5 dBZ, а у ячейки № 6 увеличилось на 7 dBZ. Объем ячеек V_{15} и интегральное водосодержание M_{15} увеличились примерно в 2—3 раза, вертикально приведенная водность VIL ячейки № 5 увеличилась с 0,5 до 4,5 кг/м², а у ячейки № 6 с 6 до 10,5 кг/м². В 13:11 ячейка № 6 начала давать осадки, которые к 13:18 усилились до 10 мм/час. Осадки у ячейки № 5 появились лишь в 13:18, их интенсивность была около 5 мм/час. На вертикальном сечении появился ложный выступ из-за влияния боковых лепестков радиолокатора.

В 13:18:53 в непосредственной близости от северной границы радиоэха КЯ № 1, в области ее выпадающих осадков, возникает новая КЯ № 7. Вероятнее всего, она возникла вследствие компенсирующей или вынужденной конвекции. В это же время северо-западнее ячейки № 7 на расстоянии 8 км формируется КЯ № 8.

При дальнейшем своем развитии ячейка № 6 еще два раза сливалась с соседними ячейками. Так в 13:30:09 произошло смыкание ее радиоэха с КЯ № 7. Однако к заметному усилению ячеек это не привело, напротив ячейка № 7, находящаяся на стадии диссипации уменьшилась в объеме с 200 до 100 км³. КЯ № 6 к 13:30:53 ослабела на 5 dBZ, а к 13:37:39 еще на 2,5 dBZ.

В 13:37:39 произошло слияние КЯ № 6 и № 8. Обе ячейки после этого значительно прибавили по всем основным параметрам. Так максимальная радиолокационная отражаемость Z_{max} росла на протяжении последующих 15 минут, увеличившись с 48 до 59 dBZ у ячейки № 8, и с 43 до 47 dBZ у ячейки № 6. Верхняя граница H_{top} по уровню 10 dBZ за этот же период выросла на 2 км у КЯ № 8 и на 3 км у КЯ № 6. Интенсивность осадков увеличилась с 18 до 87 мм/час у КЯ № 8 и с 12 до 20 мм/час у КЯ № 6. Приведенная водность VIL увеличилась от 11 до 28 кг/м² у КЯ № 8 и от 4 до 7 кг/м² у КЯ № 6. Изменение же объемов V_{15} и интегрального водосодержания M_{15} , наоборот, показали, что ячейка № 6 начала ослабевать, а ячейка № 8 усиливаться. Это указывает на то, что для анализа развития

конвекции недостаточно анализировать отдельные параметры облачной системы, а необходимо рассматривать комплекс параметров, включая интегрированные по объему и высоте характеристики.

В 13:30:09 ячейка № 8 помимо ячейки № 6 одновременно сомкнулась с КЯ № 7. Однако на тот момент ячейка № 7 достигла максимальную стадию своего развития и в дальнейшем ослабевала. Это указывает на то, что сближение или смыкание двух ячеек не всегда приводит к их обоюдному усилению.

В 13:41:24 КЯ № 8 становится градоопасной. В 13:52:38 в момент максимального развития внутри области охватываемой КЯ № 8 отмечается около 200 межоблачных разрядов в минуту, и до 9 разрядов/мин типа облако-земля, Z_{max} при этом равно 59 dBZ, верхняя граница $H_v = 12,2$ км, интенсивность осадков 87 мм/ч, максимальная приведенная водность $VIL = 27,6$ кг/м², а облако соответствует 2-й категории по классификации градовых процессов (Абашев и др., 2010; Абашев и др., 2014), из него выпадает ледяная крупа размером 0,8 см на площади около 4 км².

Таким образом, во всех 6 случаях слияния радиоэха каждая ячейка сохраняла атрибуты отдельной КЯ: индивидуальные области Z_{max} , вокруг которых имеются замкнутые изолинии отражаемости, а также отдельные куполообразные вершины вплоть до стадии диссипации более слабой КЯ. Расстояние между Z_{max} и вершинами радиоэха КЯ в процессе их слияния практически не изменяются (см. вертикальные сечения, приведенные на рис. 4б).

В большинстве рассмотренных случаев слияния радиоэха наблюдалось усиление грозоградовых облаков, в некоторых случаях усиливалась одна и ослабевала другая ячейка, и лишь в отдельных случаях ослабевали обе ячейки. Это можно видеть и на рис. 5—7, на которых представлена эволюция комплекса радиолокационных параметров рассмотренной облачной системы в целом и по каждой КЯ в отдельности. Так, начиная с 12:48, отмечается постепенное увеличение Z_{max} , высот H_{Zi} , M_{Zi} , V_{Zi} , VIL и площади облачной системы, не достигая опасных градовых значений, и только в 13:52 отмечено выпадение града из ячейки № 8.

Однако проведенный анализ не позволяет нам связать усиление ряда радиолокационных параметров ячеек с процессом слияния или смыкания их радиоэха. Напротив, на наш взгляд, слияние радиоэха происходило в результате собственного усиления конвективных ячеек, при котором площадь радиоэха одной или двух из них значительно расширялась. Косвенным подтверждением этому, является сохранение изолированности очагов радиоэха и зон восходящего потока, что особенно заметно проявлялось на стадии диссипации ячеек.

Из анализа графиков (рис. 5—7), видно, что процессы усиления и ослабления близко расположенных ячеек достаточно сложны, кривые эволюции параметров имеют многомодальные распределения, указывая на то, что рост и ослабление могут меняться по несколько раз вплоть до полной диссипации облаков.

7. Анализ грозовой активности

При анализе изменений молниевой активности исследуемого облака при взаимодействии конвективных ячеек были использованы подходы, апробированные ранее (Синькевич и др., 2016; Михайловский и др., 2017). Первые грозовые разряды типа облако-облако были связаны с ячейкой № 1 и регистрировались с 13:03 до 13:07. Следующий всплеск грозовых разрядов типа облако-облако, а также появление разрядов типа облако-земля наблюдалось с 13:11 до 13:22, что связано с развитием ячейки № 3. Частота разрядов VHF в высокочастотном диапазоне в 13:18 составляла до 7 в минуту, частота разрядов в низкочастотном диапазоне (LF) до 2—3 в минуту, а сила тока в них была 6—8 кА. Развитие ячейки № 6 и особенно ячейки № 8 привело к резкой активизации грозоразрядной деятельности облачной системы, а именно, к увеличению частоты и интенсивности грозовых разрядов VHF, LF+ (положительной полярности) и LF- (отрицательной полярности). Например, в 13:48 частота VHF разрядов достигла 140 разрядов/мин, а частота разрядов LF+ и LF- выросла до 7 раз/мин. Увеличилась также и сила тока разрядов LF+ и

LF-, превысив 10 kA. Суммарный ток разрядов LF- достигал 70 kA. Тем не менее, превалировало число VHF разрядов.

Максимальная частота разрядов всех типов и максимальные токи отмечались в период кратковременного выпадения града размером до 1 см из ячейки № 8 (с 13:48 до 13:52), когда $Z_{max} = 57$ dBZ, $VIL = 27,6$ кг/м², VIL переохлажденного облачного слоя (выше изотермы 0 °C) — 14,0 кг/м², а слоя облака выше изотермы –6 °C, где происходит активный рост ледяных кристаллов, крупы и града — 11,3 кг/м². В этот период интенсивность осадков была 86,6 мм/ч. Верхняя граница радиоэха достигла 12,2 км. Средняя скорость перемещения облачной системы составляла 25 км/ч, что несколько выше, чем скорость ведущего потока в слое 700—500 миллибар по данным аэрологического зондирования (см. рис. 1).

После 14:18 рассматриваемая облачная система постепенно ослабевала и через полчаса полностью диссипировала. Но грозоградная активность в этот день продолжалась вплоть до 20:00 и отмечалось множество других КЯ, в том числе и мощных градовых.

Выводы

Детальный комплексный анализ одного случая развития многоячейкового грозоградного облака, в котором многократно сливалось радиоэхо близко расположенных конвективных ячеек и фидерных облаков показал, что:

1) Во всех случаях слияния радиоэха можно было по-прежнему выделять зоны максимальных отражаемостей и вершины восходящих потоков сливающихся ячеек, что сохранялось вплоть до диссипации облака.

2) В большинстве случаев после слияния радиоэха ячеек происходило быстрое (за 1—5 минут) усиление всех основных параметров объединенной облачной системы (объем, водосодержание, приведенная водность, отражаемость и т. д.), измеряемых радиолокационным методом.

3) В среднем максимальная радиолокационная отражаемость облака за 3,5-минутный период (время между последовательными

радиолокационными обзорами) после слияния увеличивалась на 2—7 dBZ, общее водосодержание, объем облака и интенсивность осадков увеличивались в 1—3 раза, приведенная водность в 1—2 раза, верхняя граница облака увеличивалась незначительно.

4) Грозовая активность облака показала высокую реакцию на слияние ячеек, после которого часто происходило значительное увеличение интенсивности разрядов. Так, например, разрядов типа облако-земля становилось в 1—5 раз, а типа облако-облако в 3—15 раз больше после слияния облаков. Отношение количества разрядов облако-облако к разрядам облако-земля после слияния облаков увеличивалось в 5—10 раз, что говорит о доминировании межоблачных разрядов при слиянии ячеек.

5) Мощность разрядов обоих типов неоднозначно изменяется после слияния облаков, но суммарный ток разрядов в единицу времени увеличивается примерно в 2—5 раз, по всей видимости, за счет увеличения интенсивности разрядов.

6) Усиление и диссипация взаимодействующих между собой конвективных ячеек имеют сложную закономерность, часто сменяя рост на ослабление и наоборот, хотя амплитуды таких осцилляций уменьшаются со временем.

7) Внутри одного и того же многоячейкового процесса некоторые ячейки могут сближаться и даже сливаться своим радиоэхом, другие же ячейки могут развиваться лишь незначительно взаимодействуя с соседними ячейками.

8) Сближение или смыкание двух близкорасположенных ячеек не обязательно приводит к их обоюдному усилению. Чаще одна из них демонстрирует свое доминирующее положение, а вторая усиливается намного меньше или даже ослабевает;

9) Во всех случаях в процессе слияния ячеек каждая из них вплоть до диссипации сохраняла атрибуты отдельной КЯ: свою область максимальной отражаемости, вокруг которой имеются замкнутые изолинии отражаемости, а также отдельную куполообразную вершину.

10) Для анализа развития конвективных облаков необходимо рассматривать весь комплекс радиолокационных параметров, включая интегрированные по высоте и объему характеристики, так как увеличение или уменьшение одного или двух параметров не может однозначно отражать усиление или диссипацию облака.

В случае исследования развития близкорасположенных ячеек, оказывающих взаимное влияние на развитие друг друга, необходимость в комплексном анализе, базирующемся на применении более информативных объемных радиолокационных параметров, грозоразрядной и спутниковой информации, становится еще более актуальной.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 17-05-00965 и 16-05-00197.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Ефремов В. С., Вылегжанин И. С. (2015). Новые радиолокаторы для исследований и активного воздействия на облака / В сб.: Труды второй международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата Ставрополь, 2015. — Ставрополь: ФГКОУ ВПО "Северо-Кавказский федеральный университет". С. 265—270.

Абшаев М. Т. (1984). Структура и динамика развития грозо-градовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. Вып. 53. С. 6—22.

Абшаев М. Т., Имамджанов Х. А. (1976). Строение и эволюция мультячейковых грозоградовых облаков Ферганской долины // Труды ВГИ. Вып. 33. С. 100—114.

Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Котелевич А. Ф., Сирота Н. В. (2011). Автоматизированная система управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» / В сб.: Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. — Нальчик: ВГИ. С. 211—225.

Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М., Пометельников В. А. (2010). РД 52.37.731-2010. Организация и проведение противоградовой защиты. — Нальчик: ВГИ. 86 с.

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Малкарова А. М., Барекова М. В. (2014). Руководство по организации и проведению противогорадовых работ. — Нальчик: ООО «Печатный двор». 500 с.

Аджиев А. Х., Абшаев А. М., Тумгоева Х. А., Геккиева Ж. М. (2016). Исследования быстроразвивающихся опасных атмосферных процессов и разработка системы их мониторинга в интересах обеспечения безопасности жизнедеятельности // Известия ЮФУ. Технические науки. Раздел IV. Физика атмосферы. С. 182—193.

Краус Т. В., Синькевич А. А., Глухам А. С. (2012). Радиолокационные исследования слияния облаков // Метеорология и гидрология. Вып. 9. С. 42—57.

Changnon S. A. (1976). Effects of urban areas and echo merging on radar echo behavior // J. Appl. Meteor. V. 15. P. 561—570.

Chin H.-N. S., Wilhelmsen R. B. (1998). Evolution and structure of tropical squall line elements within a moderate CAPE and strong low-level jet environment // J. Atmos. Sci. V. 55. P. 3089—3113.

Chisholm A. J., Renick J. H. (1972). Supercell and multicell Albetra hailstorms // London Pres, On Cloud physics conf. P. 67—71.

Dennis A. S., Schock C. A., Koscielski A. (1970). Characteristics of hailstorms of western South Dakota // J. Appl. Met. V. 9. P. 127—135.

Dimitrovski Z., Spiridonov V. (2014). A case of left-hand splitting of supercell convective storm and three-dimensional simulation, WMO scientific and technical programmes. IOM-116_TECO-2014. 16 p.

Krauss T. W., Sinkevich A. A., Ghulam A. S. (2011). Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia // JKAU: Met., Env. & Arid Land Agric. Sci. V. 22. № 2. P. 23—39 (2011 A.D./1432 A.H.). DOI: 10.4197/Met. 22-2.2.

Lee B. D., Jewett B. F., Wilhelmsen R. B. (2006). The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation // Wea. Forecasting. V. 21. P. 433—448.

Lopez R. E. (1978). Internal structure and development processes of C-scale aggregates of cumulus clouds // Mon. Wea. Rev. V. 106. P. 1488—1494.

Marwitz J. D. (1972). The structure and motion of severe hailstorms. Part I: Supercell storms. Part II: Multicell storms // J. Appl. Met. V. II. № 1. P. 166—179, 189—201.

Sinkevich A. A., Terrence W. Krauss (2014). Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging // J. of Atmospheric Research., Volume 142, 1 June 2014, Pages 124—132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres>.

Simpson J., Westcott N. E., Clerman R. J., Pielke R. A. (1980). On cumulus mergers // Arch. Meteor., Geophys. and Bioclimatol. V. 29. P. 1—40.

Simpson J., Woodley W. L., Miller A. H., Cotton G. F. (1971). Precipitation results of two randomized pyrotechnic cumulus seeding experiments // *J. Appl. Meteor.* V. 10. P. 526—544.

Tao W. K., Simpson J. (1984). Cloud interactions and merging: Numerical simulations // *J. Turpeinen O.* (1982). Cloud interactions and merging on day 261 of GATE // *Mon. Wea. Rev.* V. 110. P. 1238—1254.

Westcott N. E. (1984). A historical perspective on cloud mergers // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 65. P. 219—227.

Westcott N. E. (1994). Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging and subsequent growth // *Mon. Wea. Rev.* V. 122. P. 780—790.

Wiggert V. G., Lockett J., Ostlund S. S. (1981). Rainshower growth histories and variations with wind speed, echo motion, location and merger status // *Mon. Wea. Rev.* V. 109. P. 1467—1494.

Woodley W. L., Jill J., Barnston A., Simpson J., Biondini R., Flueck J. (1982). Rainfall results of the Florida Area Cumulus Experiments, 1970—1976 // *J. Appl. Meteor.* V. 21. P. 139—164.

СИСТЕМА МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ГРОЗ

А. В. Снегуров, В. С. Снегуров

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7
e-mail: info@alwes.ru

Поступила в редакцию 11.09.2017
Поступила после доработки 11.11.2017

В 2013—2015 гг. аппаратно-программный комплекс (АПК) экспериментальной грозопеленгационной системы (ГПС) версии «Алвес 9.07» (Снегуров, 2010а; Снегуров и др., 2012а, б) получил развитие функциональных возможностей и увеличение территории контроля грозовой активности.

Цель настоящей работы представить структуру и параметры АПК ГПС как инструмента обнаружения гроз службами штормового оповещения и изучения грозовых процессов и параметров электромагнитного излучения (ЭМИ) грозовых разрядов.

Структура и параметры АПК ГПС

Для расширения функциональных возможностей АПК ГПС изменена структура аппаратной части комплекса и внесены изменения в базовое программное обеспечение (ПО) версии «Алвес 9.07». Блок-схема АПК ГПС версии «Алвес 9.07.14» представлена рис. 1 (Снегуров и др. 2016а). Организация приема данных регистрации ЭМИ молниевых разрядов двумя коммуникационными серверами (ПО «Server 9.3.14») позволяет повысить скорость обмена информацией между Сервером и Индикаторами грозовой опасности версии «Alwes 7.04» (далее по тексту Индикатор). Программное обеспечение Вычислителя и SQL сервера установлено на отдельном сервере (ПО «Server 9.4.14»), что значительно разгружает коммуникационные

серверы от дополнительной нагрузки, связанной с обработкой исходной информации и пополнением базы данных АПК ГПС (Снегуров и др. 2016б). В результате увеличилась скорость обработки данных Вычислителем. Дополнительно установлен Сервер (Server 9.5.14) сбора данных доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ) о метеоявлениях, о высоте верхней границы облаков по наблюдениям ИСЗ, архивации результатов регистрации гроз регистраторами Vaisala (www.Vaisala.com) (в частности, LS8000 в НИЦ «Планета» и «ВГИ»), Blitzortung (www.blitzortung.org), WLLN (ТОГА, <http://webflash.ess.washington.edu/>) и их обработки. Программа «Client 9.7.14» предназначена для представления данных ГПС, объединенных данных ГПС, ДМРЛ, ИСЗ, других гронопеленгационных сетей на мониторах пользователей. Она является HTML страницей, размещенной в сети Интернет на сайте www.lightnings.ru.

Установка второго коммуникационного сервера для сбора данных регистрации ЭМИ молний дополнительных Индикаторов позволила расширить территорию контроля грозовой активности на северо-восток Северо-Западного ФО, Урал и часть Западной Сибири. На рис. 2 приведена карта с координатами пунктов регистрации гроз, оснащенных Индикаторами версии «Alwes 7.04». Они предназначены для регистрации в реальном времени источников ЭМИ (в том числе грозовых разрядов) в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне, для работы в составе однопунктовых и многопунктовых АПК (в том числе версии «Алвес 9.07.14») для определения координат грозовых разрядов и их параметров. Индикаторы установлены на сети гидрометеорологических и геофизических наблюдений Росгидромета.

Отличительной особенностью Индикатора версии «Alwes 7.04» от предыдущей «Alwes 7.01» является замена персонального компьютера (ПК) на малогабаритный, экономичный в энергопотреблении и не требующий обслуживания микроконтроллер (Снегуров и др., 2009). Отсутствие вращающихся узлов и деталей в микроконтроллере (винчестеры, кулеры) значительно повышает надежность Индикатора, расширяет условия эксплуатации.

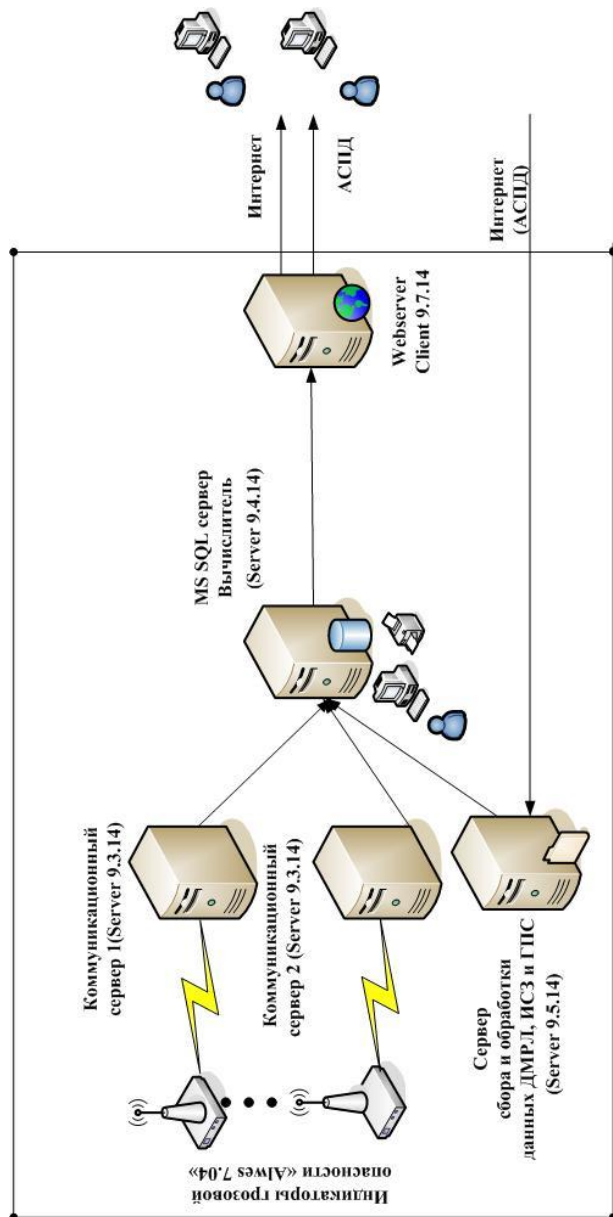


Рис. 1. Блок-схема АПК ГПС «Алвес 9.07.14»



Рис. 2. Схема расположения Индикаторов грозовой опасности.



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид антенн Индикатора, приемника GPS (а) и блоков контроллера и питания (б).

Замена ПК на микроконтроллер потребовала разработки нового специального ПО как для Индикатора, так и для АПК ГПС, изменения конструкции антенны и схемы размещения блоков Индикатора. Диаметр радиопрозрачного корпуса антенны остался прежним (50 мм), а его высота уменьшена до 500 мм. Внутри корпуса установлены антенна для приема электрической составляющей ЭМИ молний, блоки преобразователей напряжения питания, усилители и фильтры.

Длина кабеля питания увеличена до 60 метров. Антенна GPS приемника может крепиться к антенне для приема электрической составляющей ЭМИ (рис. 3а) и соединяется коаксиальным кабелем с приемником, размещенным совместно с контроллером в металлическом корпусе (рис. 3б).

В составе Индикатора предусмотрена установка роутера, который предназначен для управления работой модема. Совместно они обеспечивают передачу данных регистрации ЭМИ молниевых разрядов и времени регистрации по каналам связи на коммуникационные серверы. В Индикаторах возможно применение внутреннего (встроенного в корпус Индикатора) и внешнего роутеров. Функционально работа Индикатора не изменяется, меняется способ питания роутера. При внешнем размещении роутер питается от дополнительного блока питания. Во встроенном варианте питание роутера осуществляется от блока питания контроллера.

Установка антенны Индикатора проводится в условиях, исключающих влияние внешних предметов на характеристики распространения электромагнитных полей и источников ЭМИ. Антенна Индикатора устанавливается на открытой площадке (ровной поверхности крыши здания) на удалении, превышающих три высоты ограждений, мачт, деревьев и т. д.

Блок микроконтроллера с GPS приемником устанавливаются в помещении, оснащенном электропитанием и заземлением. Для связи Индикаторов с АПК ГПС используется ведомственная сеть связи (ВСС) или Интернет (рис. 3б).

Микроконтроллер обеспечивает аналого-цифровую обработку входных сигналов. В версии «Alwes 7.04.1» обрабатывается

аналоговый сигнал электрической составляющей (E_z) ЭМИ молниевых разрядов. В версии «Alwes 7.04.2» дополнительно обрабатываются два аналоговых сигнала с магнитных антенн H_x и H_y .

В АПК ГПС используется разностно-дальномерный метод измерения координат грозовых разрядов, в котором рабочим параметром является разность времени прихода (РВП) атмосферика (электромагнитное излучение молниевых разряда) в территориально разнесенные пункты регистрации. Синхронизация измерений осуществляется по секундной метке навигационных систем GPS и/или Глонасс. Для этого в Индикаторах используются два приемника — сверхдлинноволновый для приема и обработки временных форм атмосфериков в СДВ диапазоне и приемник GPS и/или Глонасс для получения секундной метки PPS (*Pulse per second*).

Программа микроконтроллера Индикатора определяет положение характерной точки (максимум амплитуды поля, нулевой переход и т. п.) на временной форме атмосферика относительно ближайшей секундной метки, абсолютное время появления этой точки во временной форме, амплитуду электрического (магнитного) поля, длительность переднего фронта, полярность и длительность первой полу волны атмосферика.

Неточность привязки характерной точки временной формы атмосферика к секундной метке PPS GPS-приемника в территориально разнесенных пунктах ГПС приводит к ошибкам измерения координат грозовых разрядов. Подробный анализ погрешностей временной привязки к разным характерным точкам атмосфериков приводится в работе Кононова И. И. с соавторами (2011), в которой показано, что на ЕТР проводимость почвы в меньшей степени влияет на изменение положения характерной точки, расположенной на переднем фронте сигнала. Временное положение текущей, проходящей через заданные относительные уровни на переднем фронте первой полу волны, при увеличении расстояния на каждые 100 км и проводимостях почвы 10^{-2} — 10^{-3} См/м изменяется на 0,37—0,81 мкс. Положение характерной точки на максимуме и первом нулевом переходе может изменяться на 1,2—1,5 мкс.

Ранее было показано, что стандартное отклонение (с надежностью 95 %) времени привязки к секундной метке PPS GPS-приемника максимума сигнала на переднем фронте импульса генератора, встроенного в имитатор, изменяется от 0,8 до 1,8 мкс (Снегуров, Снегуров, 2007, 2010б). Синхронная регистрация атмосфериков тремя одинаковыми Индикаторами версии «Alwes 7.01», которые построены на базе персональных компьютеров, и установлены в одном пункте, показала, что стандартное отклонение разности времени прихода атмосфериков для пар Индикаторов изменяется в пределах от 1,6 до 2,9 мкс. В эксперименте использовались GPS-приемники, формирующие импульсы секундной метки PPS с длительностью переднего фронта не более 15 нс.

Таким образом, по экспериментальным данным минимальная аппаратная погрешность привязки характерной точки атмосферика к секундной метке PPS GPS-приемника составляла, примерно, 3 мкс.

Аналогичные эксперименты для пар Индикаторов версии «Alwes 7.04», построенных на базе микроконтроллеров, показали, что стандартное отклонение разности времени прихода атмосфериков (с надежностью 95 %) изменяется от 1 до 3,1 мкс. Следовательно, переход от ПК к микроконтроллеру не вносит существенных изменений в рабочие параметры Индикатора «Alwes 7.04».

Для оценки радиуса действия Индикатора можно воспользоваться выходными данными регистрации гроз АПК ГПС. В таблице 1 представлена выборка данных из электронных таблиц SQL-сервера, которая содержит координаты (широта-долгота в градусах) отдельных грозовых разрядов, зарегистрированных ГПС на различных расстояниях от пункта № 17 (порядковый номер в базе данных Индикатора в п. Воейково), дату и время регистрации с точностью до микросекунды (мкс), пеленг в градусах и номера Индикаторов, данные которых участвуют в расчетах координат грозового разряда. Программа проводит выбор пунктов для вычисления координат разрядов исходя из ряда условий, в частности, оптимальной геометрии их расположения, обеспечивающей минимальные ошибки измерений.

Таблица 1

Пример регистрации грозовых разрядов ГПС на различных удалениях

Широта, град	Долгота, град	Дата—время UTC (гггг.мм.дд чч.мм.сс:мм.сс)	Пеленг, град	Расстояние, км	№ П1	№ П2	№ П3	№ П4
60,10	30,63	2017-06-22 14:12:02.5226320	347	18	17	39	16	52
59,15	29,90	2017-06-22 07:55:35.1752600	206	100	17	39	14	2
58,28	32,00	2017-08-13 10:08:02.2389080	159	200	17	25	46	2
57,28	29,87	2017-06-27 12:47:16.7768880	188	300	17	21	14	4
57,51	35,80	2017-07-15 15:58:24.1832250	135	400	17	38	39	21
63,62	25,20	2017-08-13 05:43:46.1825140	322	500	17	14	52	18
55,24	25,77	2017-07-11 16:17:35.3068280	207	600	17	52	21	16
53,64	30,60	2017-08-13 06:34:36.4993170	180	701	17	52	45	25
62,64	42,60	2017-07-17 03:04:57.5996160	71	701	17	45	16	26
54,12	22,91	2017-07-11 14:47:07.4180260	212	800	17	52	25	21
58,90	46,52	2017-06-23 14:51:37.1637820	105	900	17	68	70	13
54,27	17,79	2017-08-11 21:12:57.7777600	225	1000	17	37	36	14
58,91	50,19	2017-08-10 18:29:04.1134180	105	1104	17	45	16	38
50,22	22,36	2017-06-10 14:15:49.3953800	202	1203	17	37	38	55
50,73	17,89	2017-06-16 00:50:54.6748740	213	1301	17	28	39	37

Широта, град	Долгота, град	Дата—время UTC (гггг.мм.дд чч:мм:сс.мкс)	Пеленг, град	Расстояние, км	№ П1	№ П2	№ П3	№ П4
47,73	25,26	2017-06-05 13:44:04.8143800	192	1403	17	12	4	25
49,46	15,82	2017-07-05 19:26:55.7567360	213	1501	17	13	45	21
63,17	60,45	2017-06-04 16:26:25.4869300	91	1600	17	70	46	28
46,04	19,97	2017-06-04 19:23:25.9617250	200	1700	17	62	4	25
47,72	12,41	2017-07-07 18:25:23.9049930	214	1801	17	39	38	55
43,89	20,76	2017-06-07 00:02:11.6646690	197	1906	17	36	29	65
42,70	22,37	2017-06-07 22:20:25.8367610	193	2000	17	4	37	32
53,53	63,74	2017-06-09 11:16:19.4503870	123	2111	17	26	29	13
40,34	25,53	2017-06-04 00:29:54.2341880	187	2210	17	37	28	25
45,19	6,21	2017-06-26 20:49:04.2671970	215	2305	17	45	21	32
45,98	2,71	2017-06-21 14:00:58.8719540	219	2403	17	70	39	38
52,74	69,71	2017-06-08 21:24:56.3729050	125	2492	17	52	62	29
82,57	6,59	2017-07-17 09:47:23.8060800	329	2607	17	39	14	46
35,50	32,18	2017-05-21 14:30:11.9699160	179	2720	17	4	55	46
46,63	66,22	2017-06-09 15:40:00.8632050	136	2737	17	68	26	13
33,20	25,66	2017-03-08 07:37:52.9756320	185	2997	17	46	71	9

Например, координаты грозового разряда на расстоянии 100 км (пеленг 206 градусов) от п. Воейково рассчитывались по данным Индикаторов в В. Луках (п. № 39), В. Волочке (п. № 14), В. Новгороде (п. № 2) и Воейково (п. № 17). Координаты грозового разряда на удалении 2997 км (пеленг 185 градусов) рассчитывались по данным Индикаторов в городах Вологда (п. № 46), Никольск (п. № 71), Ставрополь (п. № 9) и п. Воейково (п. № 17). Выборка включает случаи регистрации отдельных разрядов с интервалом около 100 км на расстоянии от 18 до 2997 км.

Данные в табл. 2 показывают, что Индикатор регистрирует грозы с расстояний более 2500 км. Около 82 % случаев приходится на расстояния до 1150 км. В этой зоне стандартное отклонение погрешности измерения дальности до грозовых разрядов с надежностью 95 % менее одного км. На расстояниях от 1150 до 2550 км погрешность возрастает почти до 3-х км. Малое количество грозовых разрядов, зарегистрированных в зоне до 50 км, связано с естественным распределением грозовых процессов на контролируемой территории. За период с 22 июня по 12 сентября 2017 г. Индикатор № 17 участвовал в измерениях координат более чем в 100 000 грозовых разрядов.

Электромагнитная совместимость Индикаторов, МАРЛ-А и ДМРЛ-С

Определенный практический интерес представляют экспериментальные исследования электромагнитной совместимости различных технических средств, установленных на метеорологических и аэрологических станциях. Ниже приведены результаты исследования возможности совместного размещения активных радиолокационных и пассивных грозопеленгационных средств. В эксперименте использовались данные о времени проведения наблюдений аэрологической станцией МАРЛ-А, доплеровским метеорадиолокатором ДМРЛ-С и результаты регистрации электромагнитных импульсов в СДВ диапазоне Индикатором грозовой

опасности версии «Alwes 7.04», установленных в Петрозаводске на территории Карельского ЦГМС.

Таблица 2

Распределение суммарного числа грозовых разрядов,
зарегистрированных Индикатором № 17 (п. Воейково)
в зоне от 0 до 2550 км

Расстояние, км	Суммарное число разрядов		Стандартное отклонение, км
	шт.	%	
0—50	722	0,7	0,94
51—150	8779	8,8	1,00
151—250	19732	19,7	0,95
251—350	13284	13,2	0,92
351—450	8191	8,2	0,96
451—550	5116	5,1	0,98
551—650	5388	5,4	0,98
651—750	5290	5,3	0,98
751—850	4809	4,8	0,92
851—950	4195	4,2	0,98
951—1050	3566	3,6	0,92
1051—1150	3124	3,1	1,00
1151—1250	2858	2,9	1,07
1251—1350	2668	2,7	1,22
1351—1450	2350	2,3	1,23
1451—1550	2012	2,0	1,49
1551—1650	1689	1,7	1,77
1651—1750	1461	1,5	1,89
1751—1850	1212	1,2	2,04
1851—1950	928	0,9	2,13
1951—2050	799	0,8	2,31
2051—2150	633	0,6	2,21
2151—2250	494	0,5	2,56
2251—2350	377	0,4	2,47
1351—2450	294	0,3	2,34
2451—2550	307	0,3	2,81

Расстояние между антеннами МАРЛ-А и Индикатора не превышало 3 метров, а между антеннами ДМРЛ-С и Индикатора ~ 170 метров. Излучаемая импульсная мощность МАРЛ-А составляла 120 Вт, а ДМРЛ-С ~15 кВт.

Для оценки влияния работы МАРЛ-А и ДМРЛ-С на антенну Индикатора проанализированы данные регистрации источников ЭМИ в период с 1 по 9 сентября и 16 сентября 2014 года. Из архива АПК ГПС сделана выборка данных по числу импульсов за минутные и часовые интервалы в течение указанного выше периода и местоположения грозовых очагов. Характерное распределение числа импульсов источников ЭМИ за минутные интервалы регистрации Индикатором в Петрозаводске 01.09 2014 г. приведено на рис. 4, который показывает значительное повышение количества импульсов ЭМИ в периоды работы аэрологической станции МАРЛ-А: с 00:00 до 01:00, с 11:00 до 12:00 и около 23:00 UTC. Если проанализировать карты распределения гроз по данным ГПС за период проведения эксперимента то можно отметить, что грозовые процессы наблюдались на расстояниях более 300—500 км и значительных изменений в фон не вносили.

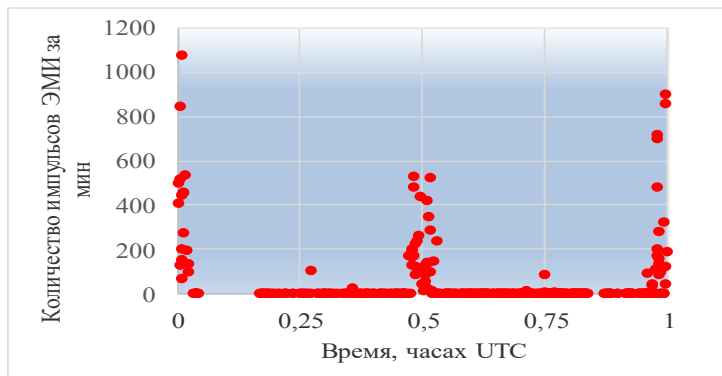


Рис. 4. Пример распределения минутных сумм числа импульсов ЭМИ, зарегистрированных Индикатором 1.09.2014 г. на аэрологической станции в Петрозаводске.

В распределении минутных сумм электромагнитных импульсов, приведенных на графике рис. 4, проявляются максимумы в период работы аэрологического локатора МАРЛ-А, но не наблюдается увеличения минутных сумм импульсов, связанных с практически непрерывной работой ДМРЛ-С.

В период с 29 сентября по 3 октября 2014 г. на ДМРЛ-С в Петрозаводске проводился плановый ремонт. В этот связи представляли интерес данные регистрации импульсов ЭМИ Индикатором грозовой опасности за период с 01 по 09 и 16-е сентября, когда работал ДМРЛ-С и за период его ремонта. Задача состояла в оценке средних значений числа импульсов ЭМИ в минуту и стандартного отклонения по указанным интервалам. В одном варианте обрабатывались все данные за сутки, в другом из обработки исключались данные за период работы МАРЛ-А (00:00-01:00; 10:00-13:00 и 22:00-24:00). Результаты обработки представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Результаты обработки данных регистрации импульсов ЭМИ
Индикатором на аэрологической станции Петрозаводска в периоды
совместной работы с МАРЛ-А, ДМРЛ-С и автономно**

Период	Технические средства	Среднее число импульсов ЭМИ в минуту	Стандартное отклонение с надежностью 95 %	Число случаев
1 ÷ 9 сентября 2014 г., 16 сентября 2014 г.	Индикатор, МАРЛ-А, ДМРЛ-С	16,3	69,5	5399
	Индикатор, ДМРЛ-С	2,8	16,2	4373
29 сентября ÷ 03 октября 2014 г.	Индикатор, МАРЛ-А	29,9	127,5	2015
	Индикатор	2,6	10,7	1498

Обработка данных показал (см. табл. 3), что во время ремонта ДМРЛ-С, за весь период наблюдений (с учетом времени работы МАРЛ-А) среднее значение числа импульсов в минуту (29,9) и стандартное отклонение (127,5) оказались почти в два раза больше, чем в период работы ДМРЛ-С (соответственно 16,3 и 69,5). Практически отсутствует различие между средними значениями числа импульсов в минуту для периодов работы ДМРЛ-С (2,8) и его ремонта (2,6) в случаях, когда данные за время наблюдений МАРЛ-А исключались из обработки. В период работы ДМРЛ-С отклонение от средних значений числа импульсов в минуту в полтора раза больше (16,2), чем в период ремонта (10,7).

Полученные данные указывают на значительное влияние работы МАРЛ-А на число импульсов ЭМИ, регистрируемое Индикатором. Низкий уровень или отсутствие помех от работы ДМРЛ-С обусловлены, видимо, значительным удалением (170 метров) антенны радиолокатора от антенны Индикатора.

Оценка эффективности антенн Индикаторов

Для оценки эффективности антенн Индикаторов грозовой опасности (№№ 1, 3, 4, 5, 6), установленных над поверхностью металлической крыши зданий (высота установки 8—10 м над поверхностью земли) и антенны Индикатора (№ 2), размещенной на высоте 10 м в средней части металлической вышки ретранслятора (его общая высота 30 метров), в июне 2015 г. проведен эксперимент по синхронной регистрации атмосфериков, указанными выше Индикаторами.

В первом случае эффективность антенн (в %) определялась по количеству разрядов, зарегистрированных каждым Индикатором относительно Индикатора (№ 1) с максимальным числом зарегистрированных разрядов (третья сверху строка в табл. 4). Во втором — определялось отношение количества случаев участия каждого Индикатора в расчетах координат молний к Индикатору (№ 3) с максимальным числом случаев участия в расчетах. Данные в табл. 4 показывают значительное снижение эффективности антенны

Индикатора № 2 (до 1—2 %), прикрепленной к металлической конструкции ретранслятора. Различие в количестве разрядов, зарегистрированных Индикаторами № 1, 3, 4, 5 и 6, можно объяснить расположением грозовых очагов относительно пунктов регистрации и разными действующими высотами антенн.

Таким образом, оптимальными остаются варианты размещения антенн Индикаторов над поверхностью крыши, на верхней части мачт и металлических конструкций.

Таблица 4

Результаты оценки эффективности антенн Индикаторов

№ Индикатора	Число грозовых разрядов	Эффективность относительно Индикатора №1	Число случаев участия Индикатора в расчетах координат грозовых разрядов	
			шт.	%
1	196156	100	4424	97
2	4140	2	45	1
3	155400	79	4571	100
4	68019	35	1903	42
5	107545	55	3914	86
6	106465	54	3657	80

**Технология получения данных и оценки динамики
грозовой активности**

Программа микроконтроллера Индикатора формирует выходные данные, которые по каналам связи поступают на коммуникационные серверы (рис. 1), далее на SQL-сервер и вычислитель. После синхронизации данных измерений с Индикаторов по РВП атмосфериков вычисляются координаты грозовых разрядов, которые совместно с параметрами ЭМИ записываются в таблицы данных. Данные ДМРЛ, после предварительной обработки, поступают на SQL-сервер.

В результате SQL-сервер накапливает данные о местоположении грозовых разрядов, параметрах ЭМИ и метеоявлениях по ДМРЛ. Кроме этого SQL-сервер может пополняться данными ИСЗ о высоте верхней границы облаков, данными однопунктовых и многопунктовых систем пеленгации гроз. Данные о местоположении грозовых разрядов и метеоявлениях передаются на Webserver, где объединяются на единой картографической основе и публикуются на сайте www.lightnings.ru, а также передаются по каналам ВСС Росгидромета в НИУ и прогностические центры.

ГГО в 2016 г. разработана версия программного обеспечения и инструкция по использованию данных ГПС в синоптической практике (www.lightnings.ru), организован открытый доступ в Интернете на первую страницу и для подразделений Росгидромета на вторую (закрытую) страницу сайта <http://www.meteorf.ru/product/info/> и www.lightnings.ru.

Для загрузки данных ГПС перед входом на страницу **www.lightnings.ru** требуется провести настройку браузера для разрешения определения местоположения оператора (синоптика). При соответствующей настройке браузера, после загрузки указанной выше страницы, на экране появится карта распределения ячеек размером 4×4 км различного цвета, в зависимости от числа грозовых разрядов в них, и различного цвета контура ячейки в зависимости от времени. Интерфейс построен таким образом, что дежурный синоптик получает информацию в двух вариантах (рис. 5). В первом варианте накапливаются данные о местоположении грозовых ячеек и числе разрядов в них в течение последних четырех часов (по 20-и минутным интервалам). Каждому интервалу (0—20; 20—40 мин и т. д.) присваивается определенный цвет (цвет контура ячейки на рис. 6). Цветовая шкала времени приводится в левой части рисунка. Под ней дана цветовая шкала интенсивности грозы (числа грозовых разрядов в ячейке 4×4 км). Цвет ячейки определяет количество грозовых разрядов, зарегистрированных ГПС, в данной ячейке (рис. 6).

Во втором варианте (рис. 7) накапливаются данные о местоположении грозовых ячеек и о числе разрядов в них в течение последних двадцати четырех часов (в 3-х часовых интервалах).

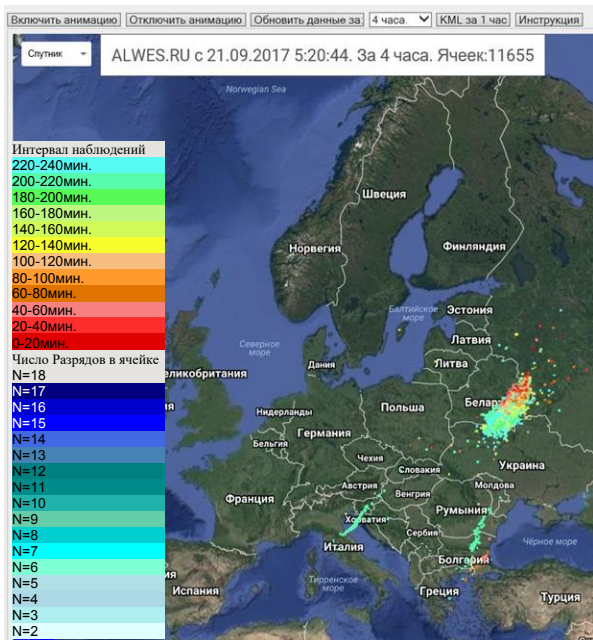


Рис. 5. Пример визуализации данных наблюдений за грозами ГПС в течение 4-х часов с 01:20:44 до 05:20:44 21 сентября 2017 года (с 20-и минутным интервалом накопления информации).

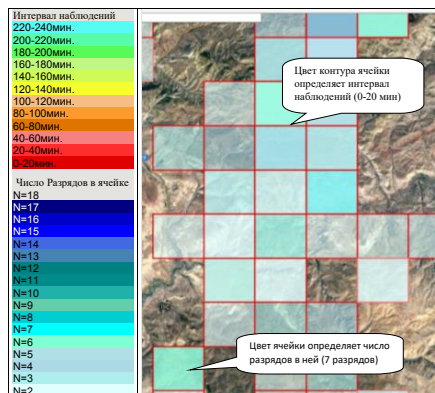


Рис.6. Шкалы цветности (левая часть рисунка), определяющие интенсивность грозы в ячейке (цвет ячейки) и время (цвет контура ячейки).

Аналогично первому варианту каждому интервалу (0—3; 4—6 ч) присваивается определенный цвет (цвет контура ячейки на рис. 6). Цветовая шкала времени для суточного варианта накопления данных приводится в левом нижнем углу. Под ней дана цветовая шкала интенсивности грозы (числа грозовых разрядов в ячейке 4×4 км). Цвет ячейки определяет количество грозовых разрядов, зарегистрированных ГПС, в данной ячейке (рис. 6).

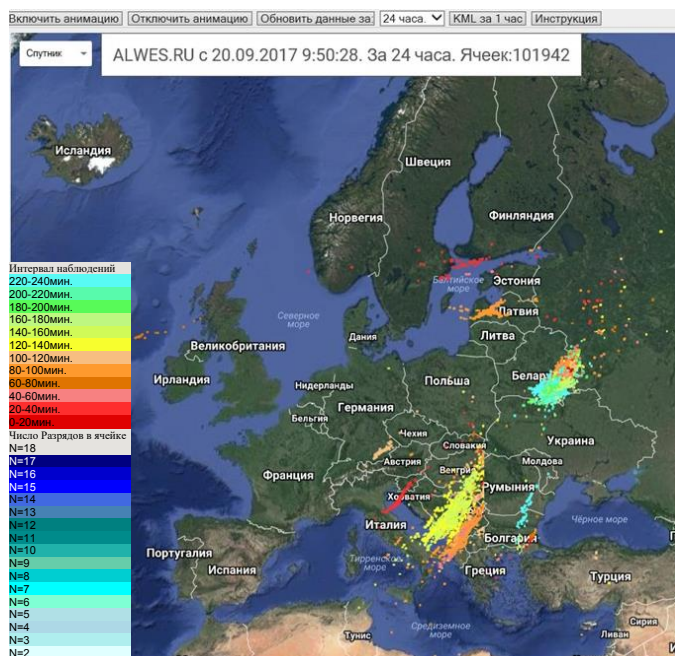


Рис. 7. Пример визуализации данных наблюдений за грозами ГПС в течение 24-х часов с 09:50:28 20 сентября 2017 года (с 3-х часовым интервалом накопления информации).

По умолчанию после загрузки страницы www.lightnings.ru на экран выводятся данные наблюдений за 4 часа. Для просмотра динамики развития грозовых процессов в ПО предусмотрен режим анимации (варианты 4 или 24 часа). Интерфейс позволяет перемещать

изображения в нужном направлении, изменять масштаб карты, выделять активные зоны, оценивать расстояния, на которое переместились грозовые ячейки и направления их перемещения.

На рис. 8 показан пример смещения грозовых ячеек в северо-восточном направлении. С момента появления в 15:00 в районе Балашова до 17:16 в районе Петровска Саратовской области грозовые ячейки распространились на северо-восток, на удаление до 80—90 км.

На рис. 9 приводится пример изменений в местоположении грозовых ячеек за сутки с 17:42 13 июня до 17:42 14 июня на территории от Донецкой и Луганской областей Украины до Саратовской области РФ. Грозовые процессы перемещались с юго-запада на северо-восток. В первой половине суточного цикла (с 17:42 до 23:42 по московскому времени 13 июня 2016 года) они наблюдались на территории Украины и только через 9—12 часов грозовые процессы начали развиваться последовательно в Воронежской, Тамбовской, а затем в Волгоградской, Липецкой и Саратовской областях (рис. 9). Для работы с программой в режиме «*KML за час*» в компьютер из Интернета необходимо загрузить и установить программу Google Earth (сайт <http://www.google.com/earth>), которая запускается по Инструкции, ссылка на которую имеется на первой странице www.lightnings.ru (рис. 5 и 7).

На рис. 10 приводится пример представления в формате «*KML*» информации о местоположении грозовых разрядов по АПК ГПС за последний час (значки красного цвета) и облачности, полученной с помощью ИСЗ. Изменение масштаба позволяет получать данные о температуре, влажности и давлении.

На второй странице сайта приводится информация о грозах по ячейкам 4×4 км АПК ГПС, объединенная по аналогичным ячейкам с данными о метеоявлениях ДМРЛ (МРЛ). Для работы с программой выбирается территория (зона) контроля (указываются координаты охраняемого объекта), выбирается из списка соответствующий МРЛ и отмечаются галочками интересующие опции (показывать грозы, надписи и карту, осуществлять звуковое предупреждение, предупреждение по e-mail о приближении гроз по данным ГПС и МРЛ).

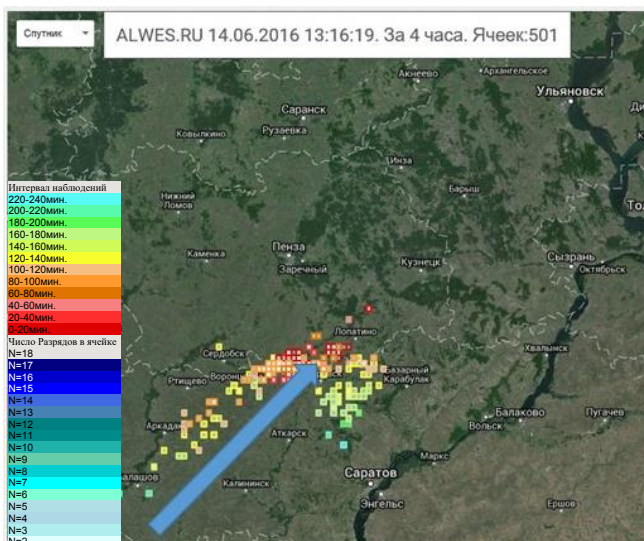


Рис. 8. Пример перемещения грозовых ячеек 14 июня 2016 г. по территории Саратовской области.

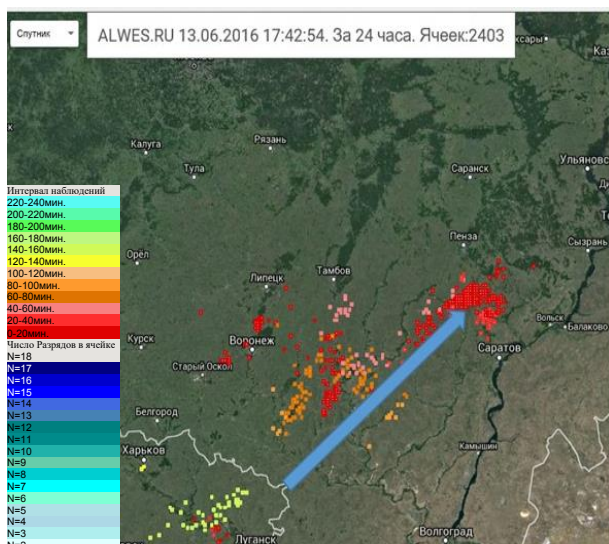


Рис. 9. Тенденция развития грозовой активности с 17:42 13 июня до 16:42 14 июня 2016 г.



Рис.

10. Пример представления в формате «KML» информации о местоположении грозовых разрядов по данным ГПС (значки красного цвета) за последний час данные по облачности, полученные с помощью ИСЗ.

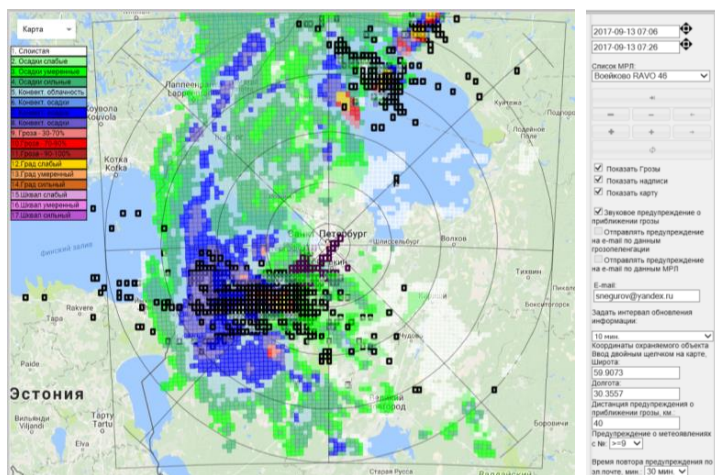


Рис.11. Пример отображения данных АПК ГПС о местоположении гроз по ячейкам 4×4 км и метеоявлений по ДМРЛ (п. Воейково) 13 сентября 2017 г. с 07:06 до 07:26 UTC.

Зона контроля грозовой активности и наличия опасных метеоявлений ограничена территорией, контролируемой АПК ГПС (ЕТР и Урал) и сетью МРЛ (ДМРЛ).

Далее, задается интервал обновления информации ГПС и МРЛ на карте. Указывается дистанция, с которой должны поступать предупреждения о приближении гроз и выбирается из таблицы, расположенной в левом верхнем углу рисунка 11, номер метеоявления по данным МРЛ с появлением которого должно формироваться предупреждение. В соответствующей графе записывается время повторного предупреждения и сохраняются установленные параметры. На карте (рис. 11) появятся данные МРЛ в виде ячеек 4×4 км различного цвета в соответствии со шкалой цветности метеоявлений и ячеек АПК ГПС с контурами черного цвета. Далее программа перейдет в режим автоматического обновления информации АПК ГПС и МРЛ в соответствии с заданным интервалом. При приближении гроз по данным АПК ГПС или метеоявления по данным МРЛ на указанное расстояние от охраняемого объекта программа инициирует звуковое оповещения и/или отправку предупреждения по электронной почте.

Заключение

Таким образом, АПК ГПС версии «Алвес 9.07.14» обеспечивает следующее:

- сбор и обработку в автоматическом режиме и реальном времени данных о параметрах электромагнитного излучения (ЭМИ) грозовых разрядов и времени их регистрации с Индикаторов грозовой опасности версии «Alwes 7.04», вычисление координат грозовых разрядов и объединение их с данными однопунктовых (ГДА-1, «Панда», «Alwes 7.04.2) и многопунктовых (LS8000 и TLS200, WWLLN, TOA) систем регистрации гроз;
- сбор и объединение с результатами наблюдений ГПС данных о метеоявлениях по ДМРЛ и о высоте верхней границы облаков по ИСЗ, визуализацию объединенных данных на единой картографической основе;

- передачу координат разрядов и/или координат ячеек 4×4 км с числом разрядов в них по каналам ВСС Росгидромета;
- визуализацию данных о местоположении молниевых разрядов и о метеоявлениях по МРЛ (ДМРЛ) на единой картографической основе в Интернет;
- создание базы данных по координатам грозовых разрядов, параметрам их электромагнитного излучения (амплитуда электрического и магнитного поля, полярность, длительность переднего фронта и первой полуволны атмосферика) по метеоявлениям и результатам регистрации гроз различными однопунктовыми и многопунктовыми системами;
- проведение дистанционного мониторинга состояния Индикаторов, их перепрограммирование;
- оповещение дежурного оператора о состоянии Индикаторов на пунктах наблюдений ГПС;
- оповещение диспетчерских служб о приближении грозовых очагов к местам проведения ремонтно-восстановительных работ на линиях электропередачи и связи, охраняемым объектам, стартовым комплексам и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кононов И. И., Иванов В. И., Крутой Д. М., Юсупов И. Е. (2011). Систематические ошибки местоопределения грозовых очагов / В сб.: Труды XVII Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь». Т. 3. — Воронеж: ВГУ. С. 1990—2002.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2007). Экспериментальная оценка влияния шумов на погрешность пеленгации грозовых разрядов / В сб.: Труды VI Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород: ИПФ. С. 259—260.

Снегуров А. В. Морозов В. Н., Попов И. Б., Соколенко Л. Г., Снегуров В. С., Шварц Я. М. (2009). Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз // Труды ГГО. Вып. 560. С. 213—242.

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

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2010б). Экспериментальные исследования влияние шумов на погрешность пеленгации грозовых разрядов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Физика Атмосферы. Спецвыпуск. С. 87—92.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2012а). Экспериментальная грозопеленгационная система /// Труды ГГО. Вып. 567. С. 188—200.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2012б). К концепции развития грозопеленгационной системы Росгидромета / В сб.: Труды У11 Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. — СПб: ГГО. С. 223—224.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2016а). Программное обеспечение «Программный комплекс грозопеленгационной системы (ПК ГПС) «Алвес 9.07.14». — Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2016612904 от 14 марта 2016 г.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2016б). РСБД «Грозопеленгация». — Свидетельство о госрегистрации базы данных № 2016620053 от 14 января 2016 г.

www.blitzortung.org

www.lightnings.ru

www.Vaisala.com

<http://webflash.ess.washington.edu/>

УДК 551.546

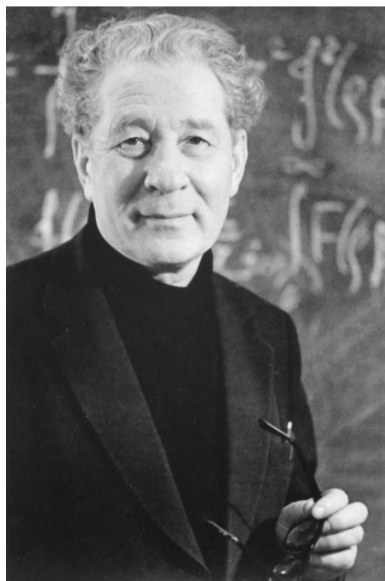
**ПАССИВНАЯ СВЧ РАДИОМЕТРИЯ ОТ ВРЕМЕНИ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДО СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

В. В. Мелентьев

Государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000 Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67
E-mail: vv.melentyev @ mail.ru

Поступила в редакцию 18.09.2017

*К 100-летию профессора
Кусиеля Соломоновича Шифрина*



Профессор Кусиель Соломонович Шифрин

Введение

Пассивное СВЧ микроволновое радиоизлучение системы "Земля-атмосфера" представляет собой часть общего теплового излучения нагретых тел. Оно зависит от физического состояния вещества (твердое, жидкое или газообразное) и определяется температурой среды и ее коэффициентом излучения, который, в свою очередь, зависит от температуры и состояния границы «нагретое тело — окружающее пространство». Классическая теория теплового излучения нагретых природных сред была разработана в конце 1940-х годов и описана во множестве классических монографий, например, в (Рытов, 1953). Основные принципы и многочисленные примеры практического применения наземных пассивных радиолокационных систем для решения различных прикладных, и прежде всего, радиоастрономических проблем обсуждались в те годы в работах (Малышкин, 1961; Николаев, Перцов, 1964; Steinberg, Leku, 1953).

Однако возможность восстановления различных геофизических параметров состояния земной поверхности и атмосферы с использованием пассивных микроволновых датчиков, установленных на борту спутника, долгое время по разным причинам казалась маловероятной. И в первую очередь из-за малой интенсивности собственных радиосигналов различных природных сред по сравнению с ИК радиометрией. Согласно приближению Рэлея—Джинса формулы Планка, которое устанавливает формулу излучения черного тела «В» для радиодиапазона, при изменении рабочей длины волны Λ от 10 м до 10 см происходит снижение уровня сигнала, а, следовательно, и измеряемой величины радиояркостной температуры ($T_{\text{я}}$) в восемь раз.

СВЧ микроволновая радиометрия на этапе возникновения и первоначального развития

Основная заслуга в теоретическом обосновании решения указанной выше, казалось бы, неразрешимой проблемы принадлежит профессору Кусилю Соломоновичу Шифрину (1918—2011) — выдающемуся советскому ученому, заведующему лабораторией

оптики свободной атмосферы отдела радиационных исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО).

К. С. Шифриным было доказано, что потерю энергии нагретого тела в радиодиапазоне можно компенсировать за счет выигрыша в высокой чувствительности микроволновых датчиков 10^{-21} Вт, существенно превышающей чувствительность ИК-радиометра.

Этот замечательный результат был получен проф. К. С. Шифриным в начале 1960-х годов и опубликован им в сотрудничестве с его учениками и последователями в виде отдельной статьи «Применение пассивной радиометрии в метеорологии» в тематическом выпуске Трудов ГГО № 222 (Шифрин, Рабинович, Щукин, 1968). Этот сборник стал первым в мире научным изданием полностью посвященным обсуждению теории и практики СВЧ микроволнового дистанционного зондирования системы «Земля — атмосфера». Без преувеличения можно сказать, что публикация К. С. Шифрина открыла новую эпоху в области космической метеорологии и океанографии, позволяя получить новую всепогодную эксклюзивную информацию для восстановления многочисленных метеорологических и океанологических параметров и количественной оценки их пространственно-временной изменчивости. Так К. С. Шифрин, будучи физиком-оптиком, стал основателем нового направления в ДЗЗ — спутникового СВЧ микроволнового дистанционного зондирования Земли из космоса. К сожалению, он не был активным пропагандистом своих выдающихся научных результатов, так что сейчас лишь немногие исследователи помнят этот факт, и в нашей статье мы пытаемся восстановить память о нем и его замечательных научных достижениях.

Обратим внимание и на то, что Труды ГГО № 222 почти мгновенно стали известны в США, где внимательно следили за всеми новейшими технологическими «ноу-хау» и научными достижениями Советского Союза. В итоге выпуск Трудов ГГО № 222 был немедленно переведен на английский язык в Израиле по заказу Министерства торговли США и Национального научного фонда (Вашингтон, округ Колумбия) и опубликован в виде монографии в

рамках Специальной программы научных переводов (Передача микроволнового излучения ..., 1970)

Американские эксперты в области геофизики пришли к пониманию преимуществ использования пассивных микроволновых радиометров значительно позже — уже после успешного начала этих работ в нашей стране, ставшей таким образом пионером в этой области ДЗЗ. По откровенному признанию всемирно известного авторитета в области ДЗЗ д-ра J. Zwally: «в середине 1960-х годов в НАСА внимательно изучали все советские публикации о новейших достижениях СССР в области спутниковых микроволновых технологий, а также в лидарном зондировании» (Zwally, 2005). Отметим здесь же, что с тех пор в отечественной литературе утвердился термин СВЧ радиометрия (радиотеплолокация), а в зарубежных публикациях используется термин пассивная микроволновая радиометрия (*passive microwave radiometry*).

Еще одним существенным препятствием, которое изначально сдерживало внедрение средств микроволнового зондирования на практике, являлась значительная изменчивость коэффициента излучения различных типов подстилающей поверхностей (Σ), и в особенности огромное разнообразие Σ поверхности суши. По этой причине разработка технологий СВЧ микроволновой диагностики системы «Земля—атмосфера» с самого начального этапа была направлена на восстановление параметров водной поверхности, поскольку ее «радио-портрет» оказывался более однородным (Кондратьев, Мелентьев, Назаркин. 1992; Мелентьев, 1996; Кондратьев, Йоханнессен, Мелентьев, 1996). Конечно, и сами измерительные средства в те времена были достаточно примитивны и соответствовали общему уровню тогдашней техники. В работе использовались самописцы, плоттеры, тепловизоры и другая подобная аналоговая регистрирующая техника. И все же, новый вид аэрокосмической информации оказался очень полезен в геофизических исследованиях и поэтому стал пользоваться спросом у самых разных потребителей (рис. 2 и 3).

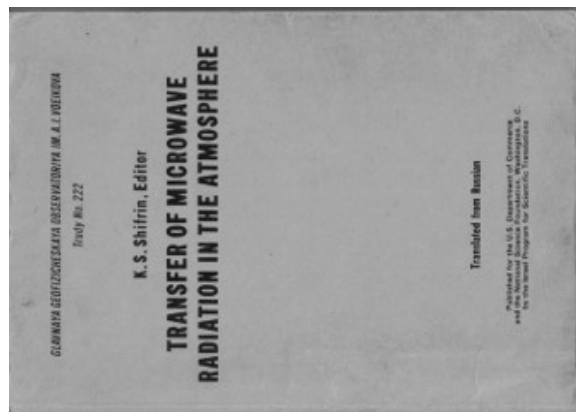
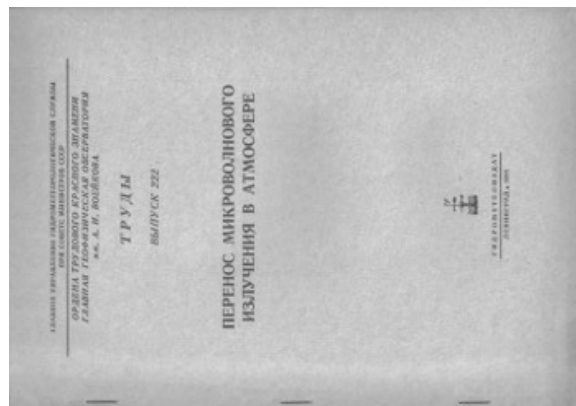


Рис. 1. Публикации первых работ К. С. Шифрина по теории СВЧ-микроволнового дистанционного зондирования системы «Земля—атмосфера».

Особо отметим, что и для разработки технологий микроволновой диагностики параметров состояния водной поверхности потребовалось решить проблему создания специальных установок для измерения спектрально-угловой изменчивости коэффициентов излучения Σ воды (рис. 4) и ледяного покрова (рис. 5). При этом ряд новых технологий для исследования Σ в контролируемых условиях были предложены нами в ГГО и нами же запатентованы (Шутко, 1986; Мелентьев, 1971).

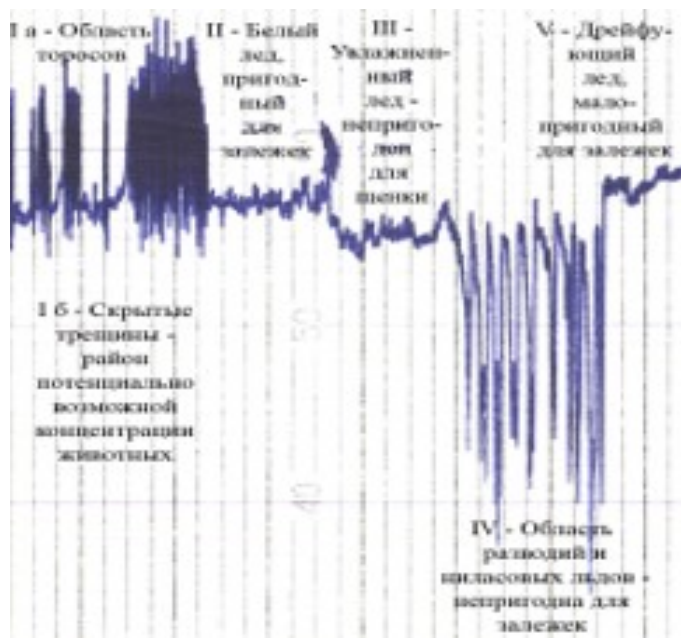


Рис. 2. Образец записи характеристик состояния морского льда, полученных с использованием СВЧ радиометра на длине $\lambda = 1,6$ см.

Самолет лаборатория ГГО Ил-18, Белое море, март 1968 года. I - гряды торосов; II - ровный однородный однолетний лед, пригодный для репродукции гренландского тюленя; III - мокрый однолетний лед, непригодный для щенки; IV - зона разводий и трещин, избегаемая морскими млекопитающими при репродукции, V - область дрейфующего льда, мало пригодная для щенки.



Рис. 3. Одна из первых СВЧ-карт состояния морского льда различной концентрации (сплоченности).
Карское море, район о. Свердруп, май 1968 г. Самолет лаборатория ГГО
Ил-18, сканер-поляриметр «Гроза», $\Lambda = 3,2$ см.



Рис. 4. Исследования коэффициента излучения Σ морской поверхности для решения военно-прикладных задач, проводившиеся в рамках натурального эксперимента с использованием опорно-поворотной системы. Финский залив, морской порт г. Ломоносова, $\Lambda = 1, 6—8, 5$ см, рупорно-параболическая антенная система.



Рис. 5. Исследования коэффициента излучения Σ пресноводного льда и мерзлых почвогрунтов в естественных контролируемых условиях. Карелия, Онежское озеро, полигон Института озераедения Академии наук СССР, $\Lambda = 0, 8$ см.

Некоторые результаты использования современных средств спутниковой микроволновой радиометрии в интересах маммалогии (териологии) и геокриологии

Развитие теоретических основ и улучшение технических возможностей измерительной аппаратуры позволило развить успех не только СВЧ дистанционной диагностики водной поверхности (температура, волнение, соленость, нефтяные загрязнения, параметры состояния пресноводного и морского льда) (Мелентьев, Черноок, 2002; Melentyev, Chernook 2002; Melentyev, Chernook, Pettersson, 2003; Melentyev, 2005; Melentyev, Chernook, 2006), но и предложить новые технологии дистанционного микроволнового зондирования характеристик состояния суши (Melentyev, Chernook, 2010; Basis, Grody, Peterson, Williams, 1998; Melentyev, Johannessen, Bobylev, Donchenko, 2000; Fily, Royer, Goita, Prigent, 2003; Melentyev, Johannessen, Bobylev, 2005; Jones et al., 2007; Melentyev, Matelenok, 2012).

Далее приводится ряд примеров практического использования средств микроволновой радиометрии, предложенных в последние десятилетия. В первую очередь отметим создание в ГГО в сотрудничестве с ОКБ Московского энергетического института сканер-поляриметра «Омега», который был использован для практической реализации технологии двухканального знако-контрастного метода (ДЗКМ) для измерений температуры поверхности океана (ТПО). Позже аналогичным комплексом аппаратуры была оснащена космическая станция "Алмаз", которая провела серию последовательных съемок SST Индийского и Тихого океана в рамках подспутникового эксперимента, организованного нами на борту научно-исследовательского судна "Академик Королев". Эта аппаратура была использована также для картирования радиоконтрастов действующих и потухших вулканов на Камчатке и Курильских островах (Кондратьев, Мелентьев, Назаркин, 1992). Вслед за этим двухканальный комплекс «Омега-V» был установлен на космических станциях "Венера-15" и "Венера-16", что позволило

провести первые в истории съемки микроволновых радиотепловых контрастов утренней планеты.

Еще один проект был направлен на разработку новейших цифровых технологий и создание фазированной антенной решетки ($\Lambda = 2, 15$ см), предназначенной для летающей лаборатории ГГО Ил-18. Эти работы были выполнены совместно с кафедрой радиофизики Ленинградского политехнического института и НПО "Азимут". Эта техническая разработка, получившая авторское свидетельство на изобретение, была использована для практической реализации метода микроволнового пассивного картирования запасов почвенной влаги, который был удостоен Государственной премии СССР.

Среди других эффективных методов применения спутниковой микроволновой радиометрии, над созданием которого мы работаем в настоящее время, назовем технологию комплексного использования мультиспектральных измерительных датчиков для экомониторинга водных объектов и обнаружения биологических «горячих точек». В рамках этих исследований был предложен новый подход в морской маммалогии (teriology), который предполагает изучение морских млекопитающих (моржи, тюлени, киты-белухи) и ледяного покрова как единой системы (Мелентьев, Черноок, 2002; Melentyev, Chernook, 2002; Melentyev, Chernook, Pettersson, 2003; Melentyev, 2005; Melentyev, Chernook, Melentyev, 2005; Melentyev, Chernook, 2006; Melentyev, Chernook, 2008). Он предусматривает комплексное использование средств ИК и СВЧ-радиометрии для выявления областей массовых скоплений морских животных, чтобы обеспечить дистанционный контроль их пищевых и репродукционных миграций. Как следует из рис. 5, спутниковая микроволновая съемка с использованием радиометра SSM/I позволяет выявить местоположение ценных залежек гренландского тюленя, которое соответствует определенному типу распределенности морского льда и фиксированным значениям его сплоченности. Эта информация является основой для последующих подсчетов численности беломорской популяции морских животных, которые выполняются на материале самолетной ИК съемки (рис. 6—8).

В 2005—2006 гг. аналогичные комплексные исследования проводились и на Беринговом море, при этом объектом изучения становился тихоокеанский морж (рис. 9). К сожалению, в этих работах использовалась информация иностранных микроволновых датчиков, хотя, напомним, что первый в мире спутник "Космос-243", оснащенный пятью СВЧ измерительными датчиками, был запущен в СССР (Кондратьев, Мелентьев, Назаркин, 1992; Мелентьев, 1996; Кондратьев, Йоханнессен, Мелентьев, 1996; Шутко, 1986).

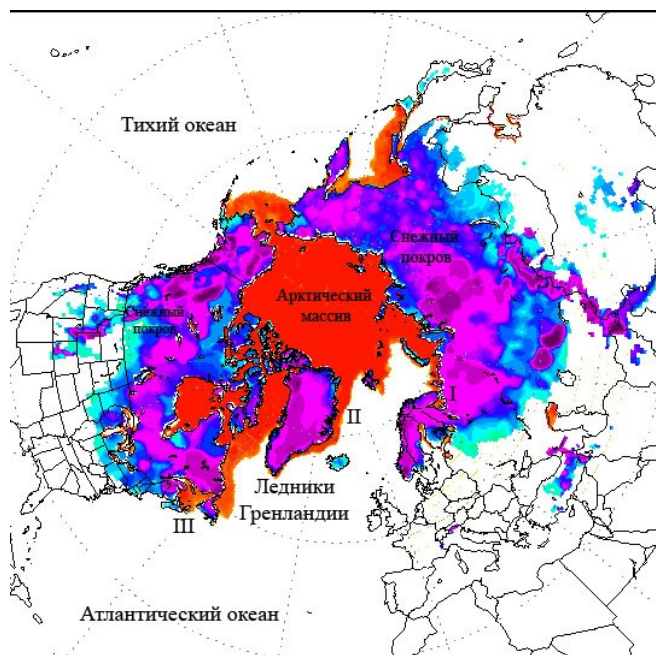


Рис. 6. Результаты спутникового СВЧ микроволнового районирования Северной Полярной Области с использованием метода «горячих точек». Данные американского спутника DMSP, комплекс аппаратуры SSM / Imager, 25 февраля 2002 г. 2002/03 – зимний сезон высокой суровости.

I, II, III – области репродукции (массовой шенки), соответственно, беломорской, ян-майенской и ньюфаундлендской популяций гренландского тюленя. Ледовые условия во все трех областях, по нашему заключению, благоприятны для шенки.

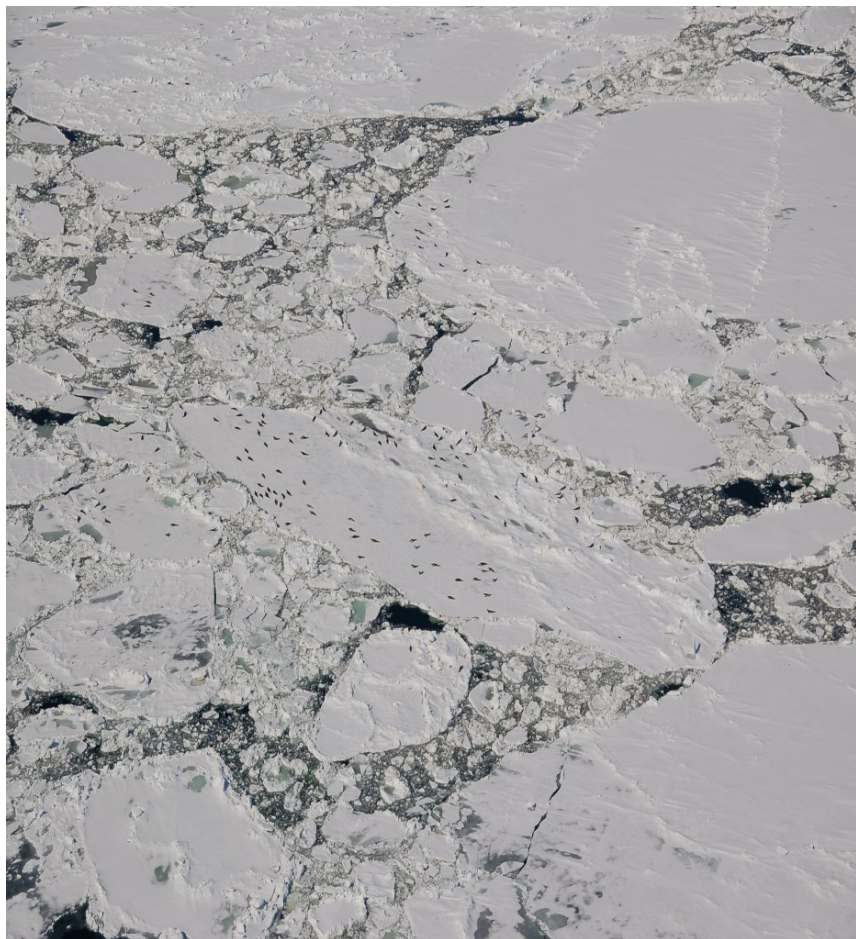


Рис. 7. Фотоизображение среднего пространственного разрешения
щенной залежки гренландского тюленя, располагающейся в Горле Белого
моря – исходная информация.

Белое море, самолет-лаборатория Л-410 «Норд».

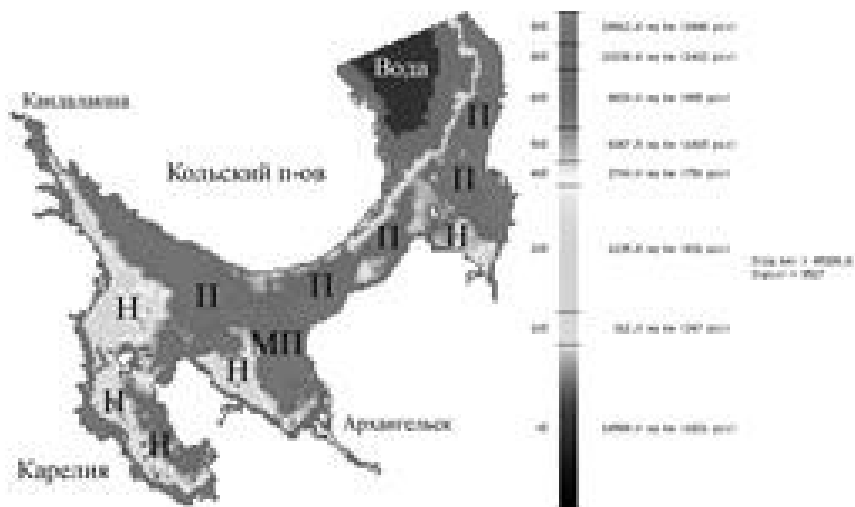


Рис. 8. Результаты спутникового СВЧ микроволнового картирования Белого моря (метод «горячих точек») с использованием аппаратуры SSM / Imager, 25 февраля 2004 г.
2003/04 – умеренный зимний сезон.

П – зоны льда, пригодные для размножения гренландского тюленя;
МП – лед, мало пригодный для щенки;
Н – лед непригодный для репродукции.

Маленькие окружности – единичные млекопитающие,
большие – группы животных (самки со щенками или взрослые самцы).

Использование метода «горячих точек», позволяет выявить места массовых скоплений морского зверя за счет контраста тепловых животных на фоне морского льда (рис. 9, 10). Усовершенствование метода «горячих точек» позволяет фиксировать, что места репродукционных скоплений морского зверя концентрируются вблизи стационарных полыней и трещин (рис. 11, 12)

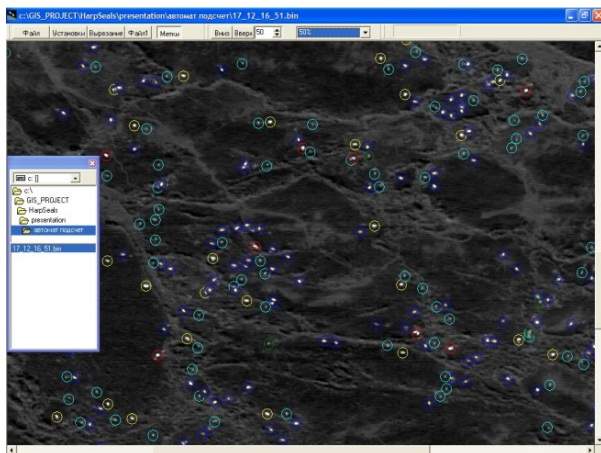


Рис. 9. Белое море, самолет-лаборатория Л-410 «Норд» - фрагмент тепловой ИК съемки шенной залежки беломорской популяции гренландского тюленя.

Большие белые точки соответствуют взрослым животным,
малые – детенышам (белькам)

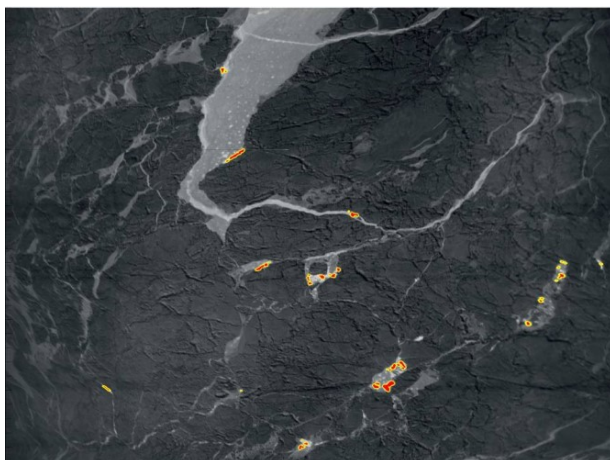


Рис. 10. Берингово море, март 2006 года, самолет-лаборатория Л-410 «Норд» – данные тепловой ИК съемки мест репродукции тихоокеанского моржа в Анадырском заливе.



Рис. 11. Данные российско-американского валидационного эксперимента «Тихоокеанский морж», проводившегося на борту ледокола «Магадан».

Берингово море, март 2006 г.

Ин ситу наблюдения позволили документально зафиксировать, как животные, пытаясь сберечь места репродукции от смерзания, разламывают лед на трещинах и полыньях.



Рис. 12. Данные российско-американского валидационного эксперимента «Тихоокеанский морж».

Берингово море, март 2006 г.

Ин ситу наблюдения позволили установить, что животные, объединяясь в группы, поддерживают области стационарных трещин пригодными для репродукции в течение всего сезона репродукции.

Еще одним примером успешного практического использования современных средств СВЧ микроволнового дистанционного зондирования являются результаты спутникового СВЧ картирования параметров вечной мерзлоты (PF) и сезонно мерзлых грунтов (SFG), полученные на данных радиометра высокого пространственного разрешения AMSR-E, установленного на спутнике «Aqua» (рис. 13) (Jones et al., 2007). Дальнейшее развитие этих исследований направлено на создание новой области космического землеведения — спутниковой микроволновой климатологии, которая базируется на анализе данных осредненных значений радиояркостной температуры ($T_{\text{я}}$) системы «Земля — атмосфера», представляющих собой сложную функцию многих геофизических параметров, таких как термодинамическая температура почвы ($T_{\text{зем}}$) и температура приземного слоя воздуха ($T_{\text{возд}}$) (Melentyev, Matelenok, 2012).

Так, данные съемки радиометра AMSR-E были использованы для физико-географической дифференциации ландшафтов Северной Полярной Области (рис. 14), а также спутникового СВЧ зонирования акватории Северного Ледовитого океана (Melentyev, Matelenok, 2012; Melentyev et al., 2013). В рамках этой работы нами были использованы географические термины, впервые введенные в ледоведение профессором Короткевичем (ААНИИ) — ледовые ("icescapes") и морские ("seascapes") ландшафты, которые, согласно предложенной нами классификации включают в себя различные градации смеси открытой воды и льда.

Так что «Seascapes» это: S 1 — прибрежные воды; S 2a, S 2b — акватории вблизи Полярного фронта; S 3 — разрывы и промоины во льду; S 3 — стационарные полыньи как части Великой Сибирского полыньи.

Соответственно «Icscapes»: I 1 — забереги; I 2 — коренной припай; I 3 — кромка льда (уплотненная или разреженная); I 4 — плавающий дрейфующий однолетний лед различной концентрации (сплоченности) $C_1 = 1-3$, $C_2 = 4-6$, $C_3 = 7-8$, $C_4 = 9-10$; I 5 — консолидированный ледовый массив;

I 6 — многолетний лед.

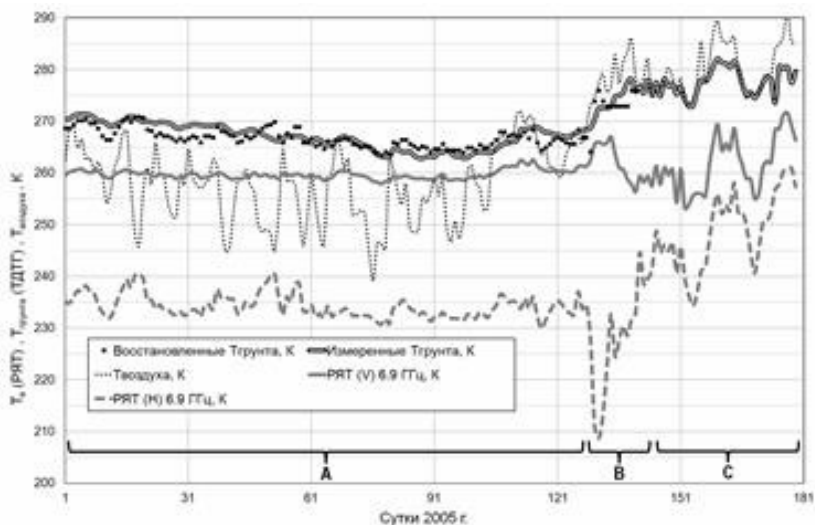


Рис. 13. Пространственно-временная изменчивость среднесуточных значений радиоярких температур ($T_{я}$) многолетних и сезонно мерзлых грунтов, полученные по данным AMSR-E ($F = 6,9$ ГГц, V / H поляризация) в их сравнении с данными ежедневных измерений термодинамической температуры мерзлых грунтов ($T_{зем}$) и воздуха ($T_{возд}$) на мерзлотной станции Аяч-Яга (Воркута).

А, В, С – суб-сезоны, выделенные для первой половины 2005 года, продолжительность которых зависит от степени суровости зимы, и параметров снега и жидких осадков (Jones et al., 2007).

Нами была предложена также технология использования данных спутниковой микроволновой съемки в геокриологии, которая предполагает проведение статического анализа значений среднесуточных, среднемесячных и среднегодовых радиоярких температур ($T_{я}$) зон распространения многолетней («вечной») мерзлоты и сезонно-мерзлых грунтов (Jones et al., 2007; Melentyev, Matelenok, 2012; Melentyev et al., 2013). Так, в работе (Melentyev et al., 2013) этот вид спутниковых измерений был использован для количественной оценки регионального климата Арктики и

субарктических территорий (рис. 15). И, в частности, анализ материалов спутниковой микроволновой съемки за 2003—2011 гг. позволил обнаружить тенденцию уменьшения среднемесячной $T_{\text{я}}$ в феврале для зоны 2 (тундра) и зоны 3 (лиственница редколесье). А, соответственно, для зон 5 (чернохвойная тайга), 6 (мелколиственные леса) и 7 (лесостепь), была выявлена негативная тенденция изменений среднемесячной $T_{\text{я}}$ как в январе, так и в феврале (Melentyev et al., 2013). Эти результаты соответствуют заключению Отчета Госкомгидромета, согласно которому в Западной Сибири в зимний сезон наблюдается уменьшение среднемесячной температуры воздуха $T_{\text{возд}}$ на $0,3^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Отметим и еще один важный результат практического использования средств спутниковой микроволновой радиометрии, позволившей выявить наличие положительной тенденции прироста среднемесячных значений $T_{\text{я}}$ в январе и феврале в зонах 5, P1 и P2, где имеется множество больших и малых водоемов (озер и рек), способных влиять на смягчение суровости зимнего сезона благодаря запасам тепла, накопленного в них в сезон открытой воды.

Таким образом, метод спутникового районирования арктических и субарктических ландшафтов с использованием СВЧ микроволновой съемки может быть использован в качестве инструмента для создания нового раздела физической географии, названного нами как "спутниковая микроволновая климатология" (Melentyev, Melentyev, Petterssen, 2013; Melentyev et al., 2013).

Отметим также, что проведенные исследования показали, что канал $F = 6,9$ ГГц, которым оснащен спутник «Aqua», не является оптимальным для классификации ландшафтов, расположенных в полярной зоне и точного дистанционного контроля положения их границ. Для их фиксации и слежения за временным и пространственным смещением под влиянием изменений климата требуется как минимум два микроволновых измерительных канала, а также применение поляризационной селекции сигнала. Эти задачи решаются нами в настоящее время в ходе проведения валидационных экспериментов на борту самолета-лаборатории «Норд» (Melentyev, Matelenok, 2013; Melentyev, Melentyev, Petterssen, 2013).

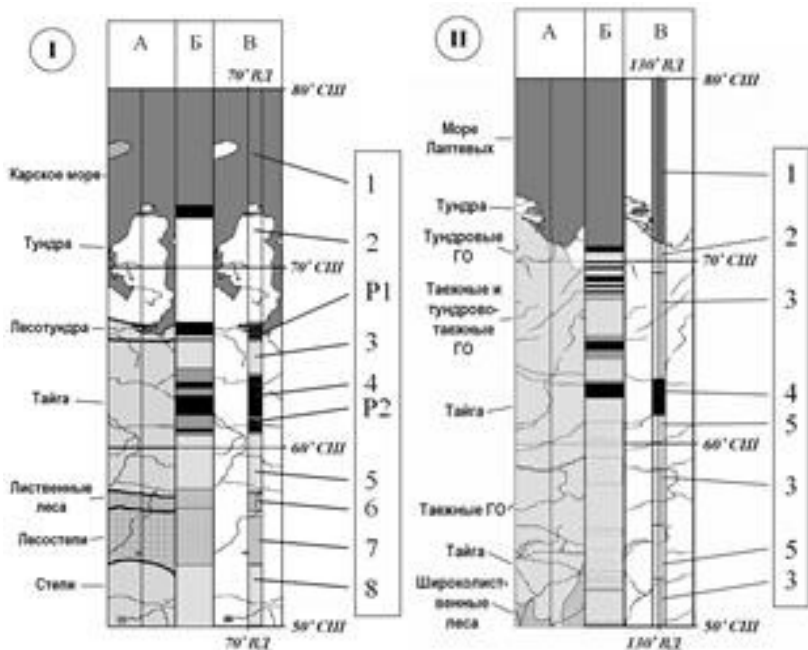


Рис. 14. Результаты физико-географического районирования районов Западной (а) и Восточной Сибири (б) на трансекте спутниковой съемки, проходящем, соответственно, по 70 ° в. д. и 130 ° в. д., полученные:

А — по данным измерений радиометра AMSR-E за 2003—2011 гг.

на канале F = 6,9 ГГц, на Н поляризация;

Б — данные традиционных измерений на почве (Melentyev, Melentyev, Petterssen, 2013; Melentyev, Melentyev, Petterssen, 2013),

В — автоматизированная обработка массива спутниковых данных с использованием алгоритма «дерева решений», крайний правый столбец — результаты визуальной классификации микроволновых планшетов:

I-1 — Карское море, II-1 — море Лаптевых, 2 — тундра, 3 — лесотундра,

5 — тайга (преобладание хвойных пород деревьев), 6 — тайга

(доминирование лиственных пород деревьев), 7 — лесостепи, 8 — степи,

Р 1, Р 2 — регионы с преобладанием крупных рек и озер, ГО — горы.

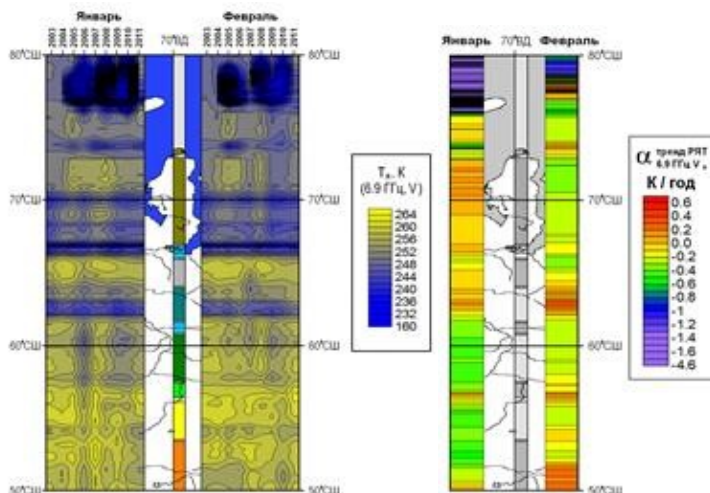


Рис. 15. Планшет пространственно-временной изменчивости среднемесячных радиоякостных температур января и февраля 2003—2011 гг., калибровочная шкала ($T_{\text{бр}}$), а также результаты количественной оценки тенденции модификации региональных особенностей климата различных морских и ледовых арктических ландшафтов Западной Сибири и Северного Ледовитого океана (Melentyev, Melentyev, Petterssen, 2013).

Благодарности

В заключение хочу поклониться светлой памяти моего учителя профессора Кусиеля Соломоновича Шифрина, а также вспомнить всех моих коллег — сотрудников отдела радиационных исследований и летной экспедиции, с кем мне посчастливилось трудиться в ГГО на протяжении двадцати лет.

Я хочу поблагодарить доктора географических наук, заведующего отделом техники дистанционных измерений НИИ ГИПРО Рыбфлот Владимира Ильича Черноока, с которым мы успешно взаимодействуем в последние годы в области использования средств СВЧ радиометрии для геоэкологических и маммологических применений.

Я также благодарю моего талантливому ученика, кандидата технических наук Игоря Владимировича Мателенка за колоссальную работу, которую он провел по созданию и тематическому дешифрированию планшетов спутниковых микроволновых съемок районов многолетней и сезонной мерзлоты Западной и Восточной Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Рытов С. А. (1953). Теория электрических колебаний и тепловое излучение. — М.: Изд. АН СССР. 316 с.

Мальшикин Е. А. (1961). Пассивный радиолокация. — М.: Воениздат 276 с.

Николаев А. Г., Перцов С. В. (1964). Пассивная тепловая радиометрия (пассивная радиотеплолокация). — М.: Советское радио. 346 с.

Steinberg G., Leku C. (1953). Радиоастрономия. Радиотехнические методы на службу астрофизики. — М.: Изд. АН СССР. 216 с.

Шифрин К. С., Рабинович Ю. И., Щукин Г. Г. (1968). Применение пассивной радиометрии в метеорологии // Труды ГГО. Вып. 222. С. 22—48.

Передача микроволнового излучения в атмосфере (1970) / под ред. Шифрин К. С. Перевод с русского. — Опубликовано для Министерства торговли США и Национального научного фонда (Вашингтон, округ Колумбия) по программе Израйля. 256 с.

Zwally J. (2005). Частное сообщение / В сб.: IGARSS. Межд. Симпозиум по дистанционному зондированию окружающей среды "Глобальный мониторинг в интересах устойчивого развития и безопасности". 20—25 июня 2005 г., Санкт-Петербург, Россия.

Кондратьев К. Я., Мелентьев В. В., Назаркин В. А. (1992). Дистанционное зондирование водных объектов и водосборных бассейнов (микроволновая печь методы). — СПб: Гидрометиздат. 248 с.

Мелентьев В. В. (1996). Методология и инструментарий самолетного и спутникового экологического мониторинга. / В монографии: «Экодинамика и экологический мониторинг Санкт-Петербургского региона в контексте глобальных изменений» — СПб: Изд. дом «Наука». С. 388—431.

Кондратьев К. Я., Йоханнессен О. М., Мелентьев В. В. (1996). Климат высоких широт и дистанционное зондирование. — Чичестер: John Wiley-Praxis/PRAXIS. 200 с.

Шутко А. М. (1986). СВЧ Радиометрия воды и поверхности земли. — М.: Изд. дом «Наука». 189 с.

Мелентьев В. В. (1971). Микроволновое излучение природных сред. / Автореферат кандидатской диссертации. — Л.: Главная геофизическая обсерватория им. Воейкова. 13 с.

Мелентьев В. В., Черноок В. И. (2002). Пассивная микроволновая спутниковая аэросъемка: методология и результаты использования для определения мест скопления гренландского тюленя в Белом море. / В сб. Труды Второй Межд. Конференции "Морские Млекопитающие Голарктики", Байкал, Россия, 10—15 сентября. С. 178—180.

Melentyev V. V., Chernook V. I. (2002). Passive microwave satellite-airborne survey: methodology and results of use for charting whelping gatherings of harp seals in the White Sea. / Proc. of the Second Int. Conference "Marine Mammals of Holarctic", Baikal, Russia, 10—15 September. P. 178—180.

Melentyev V. V., Chernook V. I., Pettersson L. H. (2003). Integrated satellite-airborne technology for monitoring ice cover parameters and ice-associated forms of seals in the Arctic. / In Monograph: Integrated Technologies for Environmental Monitoring and Information Production. Ed. N.G. Harmancioglu, and P. Geerder. NATO Science Series IY. Earth and Environmental Sciences. Vol. 23. — Boston / London: Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. P. 211—226.

Melentyev V. V. (2005) Satellite-airborne integrated studies of behavior ecology of ice form of seals (harp seals as example). / Proc. 31st Int. Symposium on Remote Sensing of Environment "Global Monitoring for Sustainability and Security. 20-25 June 2005, St. Petersburg, Russia.

Melentyev V. V., Chernook V. I., Melentyev K. V. (2005). Stationary spiralling eddies and self-cleaning processes in the White Sea in presence of climate change and their relationship with ecology of Greenland seal: results of airborne – satellite - in situ study" / In Monograph: Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change". Publisher: Springer Science + Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V. Volume 10, Number 1. January 2005. P. 115—126.

Melentyev V. V., Chernook V. I. (2006). Integrated use of multi-spectral satellite and airborne sensors as a tool for detecting biological hot spots and monitor of aquatic environment security. / Abstracts of the NATO-ARW "Integration of Information for Security", Istanbul, Turkey. 26—29 September 2006. P. 46.

Melentyev V. V., Chernook V. I. (2008). Integrated use of multi-spectral satellite and airborne sensors as a tool for detecting biological hot spots and monitor of aquatic environment security. / In Monograph: Integration of Information for Environmental Security. NATO Science for Peace and Security Series C: Environment Security. Springer 2008. № 4. P. 47—67.

Melentyev V. V., Chernook V. I. (2010). Multi-spectral satellite – airborne management of ice form marine mammals and their habitat in presence climate change with using a "hot spots" approach. / In Monograph: Spatial Complexity, Informatics, and Wildlife

Conservation. 2010 Tokyo, Springer Japan. Ed. Cushman S.A., and F. Huettmann. P. 409—429.

Basist A., Grody N. C., Peterson T. C., Williams C. N. (1998). Using the special sensor microwave/imager to monitor land surface temperatures, wetness, and snow cover // *J. Appl. Meteorol.* **37**, 3. 9. P. 888—911.

Melentyev V. V., Johannessen O. M., Bobylev L. P., Donchenko O. G. (2000). Rhythms changeability of square and thickness of perennial frozen soils parameter: experience investigation by using satellite passive microwave and radar survey. /Proc. Int. Geocryological Conference. 4—10 May 2000. Pushino. Russia. P. 128—136.

Fily M., Royer A., Goita K., Prigent C. (2003). A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-Arctic areas // *Remote Sens. Environ.* **83**, № 3. P. 328—338.

Melentyev V. V., Johannessen O. M., Bobylev L. P. (2005). Siberian permafrost and seasonally frozen grounds: parameters retrieval using microwave satellite data // Investigation of the Earth from Space. № 5. P. 1—7.

Jones L. A., Kimball J. S., McDonald K. C., Chan S. T. K., Njoku E. G., Oechel W. C. (2007). Satellite microwave remote sensing of boreal and arctic soil temperatures from AMSR-E. Trans. //Geosci. Remote Sens. **45**, № 7. P. 2004—2018.

Melentyev V. V., Matelenok I. V. (2012). Permafrost and seasonally frozen grounds in changing climate: revealing of the parameters modification with using passive microwave survey. / Proceedings of the 3-rd International SPACE World Conference. Frankfurt/Main. November 6 – 8, 2012. P. 6—8.

Melentyev V. V., Melentyev K. V., Petterssen L. H., Zakharova T. A. (2013). Marine and ice landscapes of the Arctic and Sub-arctic in the course of towering industrial activity: ability of the management with using documentation facilities of satellite ecological criminology / Abstracts EG of General Assembly of the European Geosciences Union. Vienna, Austria, 07 – 12 April 2013. (EGU2013-13678) GM4.2/SSS6.12.

Melentyev V. V., Matelenok I. V. (2013). Methodology of satellite passive microwave diagnosis of longitude-zonal and seasonal variability of frozen grounds and sea ice // Ice and snow. № 1. P. 73—82.

Melentyev V. V., Melentyev K. V., Petterssen L. H. (2013). Methodology and instrumentation of satellite ecological criminology and it applying for the remotely control the mining and transportation of oil // Regional ecology. **33**, № 3. P. 17—34.

Melentyev V. V., Melentyev K. V., Petterssen L. H., Zakharova T. A., Chernook V. I. (2013). Satellite trassology: experience of comprehensive all-the-weather SAR monitoring of the sea vessels and their tracers as indicators of the observance of international, maritime and ecological law // Regional ecology. **33**, № 3. P. 34—51. (In Russian).

МЕТОД КАЛИБРОВКИ ЛОКАТОРОВ СЕТИ ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ.

М. В. Жарашуев, В. С. Макитов, А. Х. Кагермазов, Д. Д. Кулиев

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, д. 2
mgk777@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2017
Поступила после доработки 3.08.2017

Введение

С развитием техники и технологий потребность в качестве радиолокационной продукции возрастает с каждым годом. На сегодняшний день радиолокационная сеть России насчитывает более 40 моделей метеорологических локаторов как ДМРЛ, так и МРЛ-5. При этом до 2020 года радиолокационную сеть России планируется довести до 140 локаторов типа ДМРЛ-С.

Для измерения радиолокационной отражаемости облаков и осадков необходимо знать постоянную радиолокационной станции (метеорологический потенциал) $C_{\lambda i}$. Наиболее точно реальное значение можно найти по стандартной радиолокационной мишени (Абшаев, 1975).

В качестве стандартной мишени обычно используют полый алюминиевый шар радиусом $r = 15,25$ см, имеющийся в комплекте ЗИП МРЛ-5. Может использоваться также матерчатый надувной шар радиусом не менее 15,25 см, обклеенный алюминиевой фольгой. Расчет константы МРЛ по данным измерений радиоэха стандартной мишени осуществляется по формуле (см^3):

$$C_{\lambda i} = \frac{10^{0,1N} R^4 c \tau \theta^2}{3,54\sigma}$$

или

$$10\lg Cl_i = N + 40\lg R + 10\lg t + 20\lg q - 10\lg s + 99,3,$$

где N — мощность радиоэха мишени, усредненная по множеству измерений, dB ;

R — наклонная дальность мишени, $см$;

τ — длительность импульса, $мкс$;

$\sigma = \pi r^2$ — поперечное сечение обратного рассеяния сферической мишени радиуса r , $см^2$.

В случае калибровки по мишени, отпущенной в свободный полет, осуществляются непрерывные измерения R и N в режиме сопровождения мишени до исчезновения ее радиоэха на уровне шумов. Строится кривая зависимости мощности радиоэха N от расстояния R , которая уменьшается пропорционально R^4 , и значение Cl рассчитывается по формуле:

$$10\lg Cl_0 = N + 40\lg R - const, dB,$$

где значение N может быть взято на расстоянии, например, $R = 106$ $см$ и $const = 17,92$ (при $r = 15,25$ $см$, $q = 1,5^\circ$ и длительности импульса $t = 2$ $мкс$).

Этот метод калибровки охватывает все параметры приемопередающего тракта и антенной системы МРЛ и является наиболее точным. Однако, несмотря на его преимущества, он не всегда применяется из-за проблем организации такой калибровки.

Предлагаемая методика и алгоритмы калибровки локаторов позволят по одному откалиброванному локатору провести автокалибровку всех остальных локаторов сети. В конечном итоге это позволит повысить эффективность противорадиолокационной защиты, надежность штормового оповещения и метеообеспечения авиации, эффективность радиолокационных исследований облаков и т. д.

1. Методика и алгоритм калибровки локаторов сети

Конвективная ячейка в облачной системе согласно РД 52.37.596–98 (стр. 32) выделяется как поле радиоэха, ограниченное замкнутыми

изолиниями радиолокационной отражаемости (Z , dBZ) и имеющее одну конвективную вершину (например, как гора, ограниченная замкнутыми изолиниями высот и имеющая свою вершину). В отличие от горы у облачной КЯ изменяются во времени число изолиний Z , высота, поперечные размеры, площади горизонтальных сечений, объем, пространственная конфигурация, водосодержание и вид образующихся осадков.

Задача калибровки по облакам и эталонному локатору является сложным многоэтапным процессом. Учитывая сложность этой задачи, решение этой задачи предлагается осуществлять по следующему алгоритму:

- определение области равноудаленной от двух локаторов — средней зоны (СЗ);
- выделение в поле радиоэха облачности точек, ограничивающих замкнутые изолинии радиолокационной отражаемости Z ;
- упорядочивание полученных точек — получение составных частей КЯ;
- объединение составных частей КЯ в единые поля замкнутых изолиний Z ;
- выделение в поле радиоэха вершин, ограниченных замкнутыми изолиниями Z ;
- идентификация КЯ и их нумерация в пространстве и в хронологическом порядке зарождения;
- определение конвективных ячеек, центр которых входит в СЗ;
- измерение комплекса одно-, двух- и трехмерных параметров каждой КЯ;
- сравнение и корректировка поверяемого локатора с эталонным;
- расчет направления и скорости перемещения КЯ;
- оценка степени грозо- и градоопасности КЯ, распознавание категорий ОВ;
- документирование таблицы параметров КЯ и графиков их временного хода.

Решение поставленной задачи осуществляется путем обработки трехмерных полей радиолокационных сигналов, получаемых с помощью АМРК «АСУ-МРЛ», программное обеспечение которого, позволяет получить с цикличностью 3,5 мин объемный файл обзора, содержащий осредненные и оцифрованные радиолокационные сигналы в 360 секторах азимута (с шагом 1 градус), 400 каналах дальности (с шагом 0,5 км) и 18 (или 24) углах обзора (с переменным шагом), а также полярные координаты этих сигналов (азимут, угол возвышения, радиальная дальность).

По подобным данным во всех существующих АМРК формируются различные карты (карты горизонтальных сечений на различных уровнях высот, верхней границы радиозха, максимальной отражаемости, интенсивности осадков, явлений погоды и т. д.) отображаемые на фоне карты местности.

Для реализации предлагаемой методики и алгоритмов идентификации КЯ осуществляется:

- преобразование полярных координат полученных сигналов в декартовы координаты;
- пересчет мощности радиозха в отражаемость Z (по калибровочным данным);
- формирование матрицы данных об отражаемости Z во всех точках виртуального пространства X, Y, Z размером $400 \times 400 \times 20$ км, содержащей псевдогоризонтальные сечения на 40 уровнях высот;
- построение карты максимальной отражаемости;
- последовательного сканирования точек виртуального пространства по X, Y и Z с шагом 0,5 км, с целью выделения границ КЯ (западной, восточной, северной и южной), определяемых по заданным порогам изолиний Z .

Получаемая при этом последовательность координат X, Y представляет собой пары точек начала и конца изолинии Z в каждой строке матрицы данных. Хотя в одной строке пары точек одной КЯ могут быть перемешаны с парами точек другой КЯ, составные части каждой КЯ восстанавливаются следующим образом:

- а) полученные при переборе первые две точки, соответствующие южному краю первой подъячейки КЯ № 1, имеющие координаты X_{31} ,

Y_{3l} , X_{Bl} , Y_{Bl} , где индексы «3» и «B» означают западную и восточную границы КЯ, соответственно. При этом значение Y_{3l} всегда равно Y_{Bl} ;

б) следующие две точки проверяются на принадлежность к контуру КЯ № 1. Если $X_{3l} < X_{32} < X_{Bl}$ и $Y_{3l} - 1 = Y_{32}$ или же $X_{3l} < X_{B2} < X_{Bl}$ и $Y_{3l} - 1 = Y_{32}$, то получаем следующие две точки первого контура КЯ. Если это условие не выполняется, то имеем дело, либо с концом подъячейки, либо с новой подъячейкой. Таким образом, можно получить набор пар точек, составляющих подъячейку в последовательности с юга на север и с запада на восток.

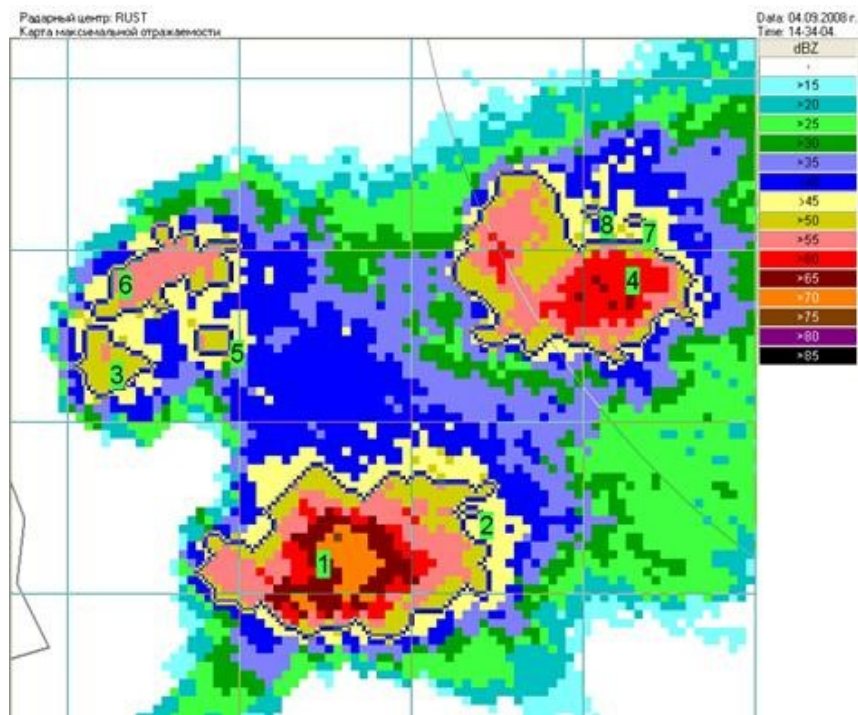


Рис. 1. Пример карты выделения и нумерации конвективных ячеек.

На следующем этапе необходимо упорядочить точки, ограничивающие подъячейку, так как на первом этапе получена не последовательность точек, а набор пар точек. Зная количество пар точек, входящих в подъячейку, можно разделить их на западные и восточные границы подъячеек и расставить по порядку. В результате этого выделяется контур подъячейки.

Для объединения подъячеек в единую ячейку необходимо сравнить северные и южные пары точек всех подъячеек со всеми параллельными точками текущей подъячейки на предмет принадлежности пар подъячеек одной КЯ и объединить каждый контур сплошными линиями, имеющими цвет, в соответствии с принятой палитрой цветов отображения полей отражаемости Z .

После выделения КЯ им присваиваются номера, начиная с № 1 в каждые сутки. При обнаружении многоячейковой облачной системы в первом цикле радиолокационного обзора, нумерация КЯ осуществляется с запада на восток, с севера на юг (т. е. № 1 присваивается самой северо-западной КЯ, а последний номер присваивается КЯ, расположенной юго-восточнее всех). В следующих циклах обзора номера присваиваются в хронологическом порядке обнаружения КЯ (см. рис. 1). Номера присваиваются КЯ, площадь горизонтального сечения которых превышает пороговую (например, более 10 км²).

После выделения и нумерации КЯ, ищем КЯ равноудаленные от двух локоаторов эталонного и поверяемого (см. рис. 2). Для этого, используя формулу расстояния между двумя точками (1), выражаем условие равноудаленности прямой от локоаторов (2). Далее, выразив x_0 (3), находим искомое уравнение прямой, равноудаленной от двух локоаторов.

$$AB = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (1)$$

$$(x_0 - x_1)^2 - (x_0 - x_2)^2 = (y_0 - y_2)^2 - (y_0 - y_1)^2 \quad (2)$$

$$x_0 = \frac{2y_0(y_1 - y_2) + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2 + x_2^2}{2(x_2 - x_1)} \quad (3),$$

где $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ — координаты локаторов эталонного и калибруемого соответственно.

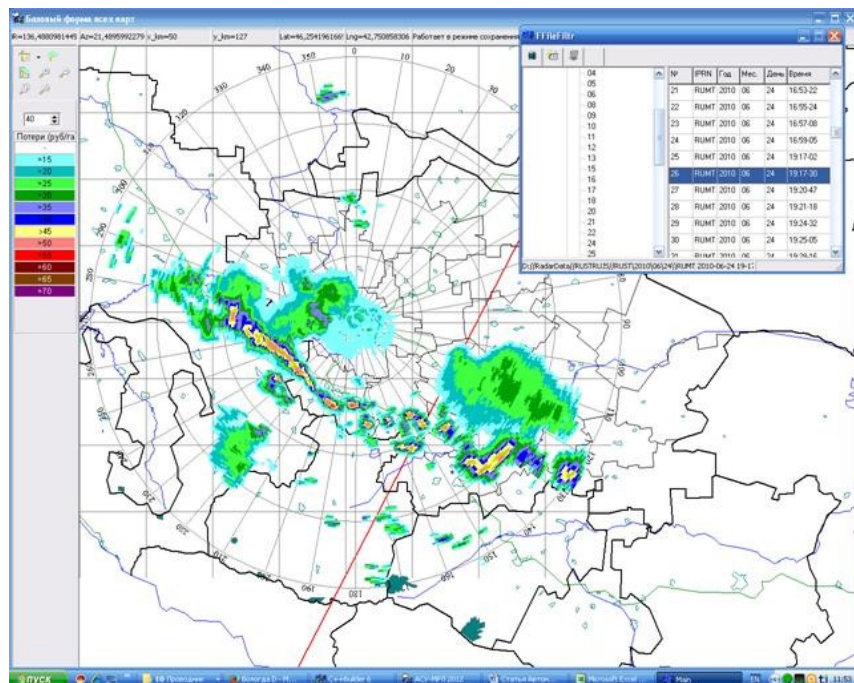


Рис 2. Карта с отображением линии, равноудаленной от двух локаторов.

Далее проверяют попадание максимального значения отражаемости конвективной ячейки в область, равноудаленную от двух локаторов ± 5 км — среднюю зону.

В основе данного метода лежит идея подсчета количества пересечений горизонтального луча, исходящего из точки максимального радиоэха конвективной ячейки со сторонами многоугольника. Точка не принадлежит многоугольнику, если количество пересечений четное.

1. Для этого перебирают все соседние пары вершин $A[n]$ и $A[n+1]$ многоугольника. Если максимальное значение отражаемости рассматриваемой КЯ по y координате лежит между текущими вершинами, то мы можем пустить параллельный оси X луч в одну из сторон.

2. Далее проверяем пересечение луча с отрезком.

Для этого:

- составим уравнение прямой, проходящей через 2 точки $A[n]$ и $A[n+1]$:

$$\frac{X - A[n].X}{A[n+1].X - A[n].X} = \frac{Y - A[n].Y}{A[n+1].Y - A[n].Y} \quad (5)$$

- выразим X из уравнения

$$X = \frac{(Y - A[n].Y) * (A[n+1].X - A[n].X)}{A[n+1].Y - A[n].Y} + A[n].X \quad (6)$$

- подставим в место X , Y координаты нашей точки.

3. Если

$$X > \frac{Y - A[n].Y}{(A[n+1].X - A[n].X) * (A[n+1].Y - A[n].Y)} \quad (7),$$

то точка находится правее (левее, если обход многоугольника против часовой стрелки) по X от отрезка $A[n] A[n+1]$ и у нас есть пересечение.

4. Если общее количество пересечений — четное число, то точка лежит снаружи многоугольника.

2. Методика сравнения данных двух локоаторов

После решения задачи выделения и нахождения равноудаленных КЯ решается задача автоматического измерения их параметров. В существующих автоматизированных радиолокационных системах (Абшаев, 2010; АСУ.001.010 РЭ стр.73; РД 52.04.320-91 стр. 264; РД 52.11.332-93 стр. 68) для измерения параметров ячейки нужно вручную локализовать КЯ (выделить ее в рамку), в пределах которой далее автоматически рассчитываются параметры КЯ, путем

сканирования всех точек пространства от уровня стояния радиолокатора до высоты 20 км над уровнем моря.

Автоматическое выделение КЯ исключает необходимость ручной локализации КЯ и дает координаты проекции КЯ на горизонтальную плоскость, по которым сканируется требуемая область пространства и, в соответствии с (Абшаев, 1975; Абшаев, 2010), измеряется около 100 одномерных, двумерных и трехмерных параметров каждой КЯ, которые записываются в накапливаемую за весь период наблюдений таблицу параметров. Но для корректировки константы лоатора были использованы всего 2 характеристики — максимальная отражаемость и высота максимальной отражаемости.

Таблица 1

**Сравнение характеристик Зеленокумского
и Ставропольского локаторов**

Дата	Локатор	Время	Z_{max}	H_{zmax}	dZ	dH
29.05.10	RUST	16:53:05	59	4	6	1,5
	RUJS	16:55:42	53	2,5		
17.06.10	RUST	13:14:55	62	4	2	2
	RUJS	13:14:25	60	6		
22.06.10	RUST	20:27:30	56	2,5	2	0,5
	RUJS	20:28:48	54	2		
24.06.10	RUST	19:17:30	54	6	4	1,5
	RUJS	19:17:02	50	4,5		
19.07.10	RUST	11:05:36	44	5	2	0,5
	RUJS	11:07:08	42	4,5		
20.08.10	RUST	22:17:03	49	4	3	0,5
	RUJS	22:18:22	46	3,5		
Среднее					3	1

Из таблицы 1 видно, что на Зеленокумском локаторе (RUJS) данные занижены относительно эталонного Ставропольского локатора (RUST) на 3 *dBz*. После калибровки поверяемого локатора его принимают за эталонный, что позволяет проводить сравнения с другими локаторами сети.

Построение графиков временного хода параметров КЯ осуществляется автоматически путем сохранения вместе с нумерацией КЯ координат центра масс, площади КЯ и таблицы параметров всех ячеек в радиусе обзора (200 км). При разделении КЯ на две номер материнской КЯ сохраняется за той, к которой ближе центр масс, а второй КЯ присваивается следующий в хронологическом порядке номер. Параметры идентифицированных ячеек отсчитываются в цикле обзора каждые 3,5 мин, вносятся в накапливаемую со временем наблюдений таблицу и наносятся на графики временного хода, позволяющие проследить эволюцию КЯ в течение всего времени их существования, включая стадии развития, квазистационарного состояния и диссипации.

Комплексный анализ полей радиоэха позволяет своевременно обнаружить зарождение новых КЯ. Если при анализе точек, входящих в КЯ, обнаружено увеличение площади поля радиоэха, то осуществляется проверка его на предмет существования в таблице параметров. Если в таблице существует КЯ с центром масс на расстоянии меньшем, чем поперечник радиоэха КЯ, то считается, что КЯ существовала, но переместилась. В случае зарождения нового пространственно изолированного радиоэха или замкнутых контуров в поле радиоэха существующих КЯ, их центр масс не соответствует по расстоянию центру масс ни одной ранее зафиксированной КЯ, то считается что, произошло зарождение новой КЯ и ей присваивается очередной номер.

Заключение

На сегодняшний день радиолокационная сеть России состоит из более чем 40 метеолокаторов как МРЛ-5, так и ДМРЛ-С, при этом до 2020 года планируется довести сеть до 140 локаторов ДМРЛ-С.

Данная методика будет актуальна для автоматической статистической оценки достоверности вторичной радиолокационной продукции сети штормооповещения. Используя данную методику, можно отслеживать систематические погрешности в показаниях локаторов, что позволит поддерживать данные сети штормооповещения в едином формате.

Предлагаемый метод и алгоритмы автоматизированной калибровки локаторов реализованы и протестированы: проанализировано множество случаев несовпадения показаний локаторов и рассчитаны необходимые изменения в коэффициентах константы локатора. При этом разница в показаниях локаторов была определена после того, как в ручном режиме службой проводился анализ и сопоставления данных от двух локаторов Зеленакумского и Ставропольского.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев М. Т., Шевела Г. Ф., Васильев Г. Ф., Ваксенбург С. И. (1975). Специализированный радиолокатор градозащиты и штормооповещения МРЛ-5 и его метеорологическая эффективность // Труды ВГИ. Вып. 33. С. 3—30.

Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М., Жарашуев М. В. (2010). Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормооповещения // Метеорология и гидрология. № 3. С. 36—45.

Автоматизированная радиолокационная система управления и обработки информации радиолокатора МРЛ-5 «АСУ-МРЛ» (2007). / Руководство по эксплуатации АСУ.001.010 РЭ. — Нальчик: ВГИ. С. 73.

РД 52.04.320–91. (1993). Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. — СПб: Гидрометеониздат. С. 264.

РД 52.11.332–93. (1997) Методические указания. Методика выполнения радиолокационных наблюдений с помощью комплексов АКСОПРИ // Вторая редакция. Авторы: Ю. В. Мельничук, В. Н. Губарчук, Н. И. Серебрянник — М.: Росгидромет. 68 с.

РД 52.37.596–98. (1998). Инструкция. Активное воздействие на градовые процессы / М. Т. Абшаев. — СПб: Гидрометеониздат. С. 32.

ОЦЕНКА ПРОГНОЗОВ СНЕГОПАДОВ, СОСТАВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ WRF, НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

*О. Г. Анискина¹, О. В. Волобуева¹, С. В. Мостаманди^{1,2},
Н. А. Новикова¹, В. С. Рябинин¹*

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79

²Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7
E-mail: olga.aniskina@mail.ru,
ovvolobueva@rshu.ru,
soleiman@mail.ru,
nina.novikova@hotmail.com.

Поступила в редакцию 18.07.2017

Поступила после доработки 11.09.2017

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные осадки оказывают большое влияние на жизнедеятельность человека. В холодный период года осадки в виде снега создают устойчивый снежный покров, который является одним из основных источников влаги в почве и надежной защитой озимых культур от вымерзания. Одновременно снегопады оказывают неблагоприятное воздействие на ряд отраслей промышленности: уменьшают метеорологическую дальность видимости и способствуют образованию снежных заносов и накатов, затрудняя движение наземного транспорта и осложняя взлет и посадку воздушных судов. Выпадение мокрого снега создает большую нагрузку на линии электропередач, что может приводить к их обрыву, нанося социальный и экономический ущерб (Пищальникова, 2014).

Вопрос прогнозирования осадков в холодное полугодие до сих пор полностью не решен и вызывает интерес, особенно, прогноз сильных

и очень сильных снегопадов (количество 6 мм/12 ч и более). Если количество осадков превышает 20 мм/12 ч, то снегопад переходит в разряд опасного природного явления. Актуальным является исследование формирования снегопадов различной интенсивности под влиянием циклонической деятельности на региональном уровне.

Сегодня в основе большинства прогнозов лежит гидродинамическое моделирование. Анализ качества прогнозов осадков посвящено много работ. В настоящее время для исследования атмосферных процессов и разработки прогнозов широкое распространение получила мезомасштабная гидродинамическая модель WRF-ARW (Weather Research and Forecasting) (Вельтищев, Жупанов, 2007). Выходной продукцией модели являются поля всех основных метеорологических величин: геопотенциал, направление и скорость ветра, температура, влажность, давление, а также осадки.

Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба, включая модель WRF-ARW для Европейской части России, проведенная Багровым (2008, 2010а, 2010б), показала, что прогнозы осадков достаточно успешны.

В работе Л. И. Кижнер с соавторами (2012) представлены результаты расчета осадков с использованием модели WRF для разных сезонов года и погодных условий при использовании различных параметризаций физических процессов. Предложен набор параметризаций, дающий лучшие результаты для территории Томской области, и сделан вывод о том, что практическая реализация моделей требует изучения особенностей их работы в различных регионах при разных синоптических ситуациях.

Анализ качества прогнозов снегопадов (Калинин, Попова, 2013; Пищальникова, 2015; Пищальникова и др., 2015) с использованием модели WRF-ARW по Пермскому краю показывает, что успешно воспроизводятся слабые, умеренные и сильные снегопады. Средняя оправдываемость прогноза сильных и очень сильных снегопадов с помощью модели WRF составляет 83—89 % в зависимости от заблаговременности прогноза. Количество осадков завышается при прогнозе на первые сутки на 20—30 %, при прогнозе на 39 ч —

на 165 %. Ошибки в определении области осадков наибольшей интенсивности связываются с ошибками в начальных данных. Также исследуется успешность прогноза снегопадов на основе модели WRF в зависимости от пространственного разрешения. Повышения качества прогноза при переходе на меньший шаг не наблюдалось, рекомендуется использовать модель с шагом по пространству 9 км.

В работе (Шихова, Связова, 2015) показано, что разные версии модели WRF при разных настройках адекватно воспроизводят крупномасштабные осадки с некоторым завышением количества, причем в весенний период завышение становится значительным (в 1,3—1,5 раза). Отмечается, что наибольшее расхождение фактических и модельных сумм осадков характерно для метеостанций, расположенных в глубоких долинах рек.

В настоящей работе впервые представлены результаты анализа успешности прогнозов снегопадов различной интенсивности, составленных с помощью модели WRF для территории Северо-Запада Европейской части России (СЗ ЕЧР).

Используемые данные

При выполнении исследований использовались синоптические приземные карты, карты барической топографии — АТ₈₅₀, АТ₇₀₀, АТ₅₀₀, АТ₃₀₀, ОТ 500/1000 за холодный период с ноября по март 2010—2016 гг., данные радиозондирования, модельные данные о количестве осадков на СЗ ЕЧР по модели WRF. Все материалы получены из архивов кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) и Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС).

По картам погоды отбирались синоптические ситуации, при которых отмечались снегопады, в том числе и сильные с количеством 6 мм/12 часов и более, на территории СЗ ЕЧР; анализировалась вертикальная и фронтальная структура циклонов, дающих эти осадки, определялись глубина циклонов, интенсивность изаллобарических очагов, траектории и скорости перемещения циклонов.

Данные радиозондирования привлекались для анализа воздушных масс, облачности и характеристик снегопадов.

Оценка качества прогнозов снегопадов производилась согласно Наставлению по краткосрочным прогнозам общего назначения (Наставление по краткосрочным прогнозам погоды, 2009). Оценивался факт выпадения снега и его количество по измерениям на 38 станциях СЗ ЕЧР, входящих в состав СЗ УГМС.

Синоптические ситуации при возникновении сильных снегопадов на СЗ ЕЧР

Согласно проведенному синоптическому анализу наиболее сильные снегопады на Европейской части России возникают при прохождении циклонов и сохраняются в течение всего времени их развития. Зона осадков только меняет свое местоположение относительно облачной системы в зависимости от направления движения циклона.

В качестве примера рассмотрим характерную синоптическую ситуацию 11—14 января 2016 года, когда количество осадков по мере перемещения циклона на отдельных станциях СЗ ЕТР увеличивалось с 6 до 33 мм/12 ч, что соответствует опасным явлениям погоды (см. рис. 1).

Циклон образовался в ложбине основного циклона, располагавшегося над Атлантикой. В 18 UTC 11 января 2016 года центр циклона находился восточнее г. Краков. Минимальное давление в его центре составляло 990 гПа. К 00 UTC 12 января центр циклона переместился на северо-восток со скоростью 30 км/ч и углубился на 2,5 гПа. Циклон перешел в стадию молодого циклона, прослеживался до уровня 850 гПа и находился под осью струйного течения на его антициклонической стороне. Скорость ветра на оси струйного течения достигала 65 м/с. К 06 UTC 12 января давление в центре циклона понизилось до 983,8 гПа. Барические тенденции в очагах падения и роста давления достигали значений $-5,1$ гПа/3 ч и $+2,6$ гПа/3 ч, соответственно. К 18 UTC 12 января циклон со скоростью 35 км/ч переместился на северо-восток и располагался южнее г. Смоленск,

давление в центре составило 981 гПа. Юг Ленинградской, Псковской и Новгородской областей находились на северо-восточной периферии циклона. Значительные осадки (15 мм/12 часов) были обусловлены перемещением теплого фронта, а затем и фронта окклюзии, связанных с этим циклоном. Наблюдалось усиление южного и юго-восточного ветра до штормового. Температура воздуха была $-5...-10^{\circ}\text{C}$.

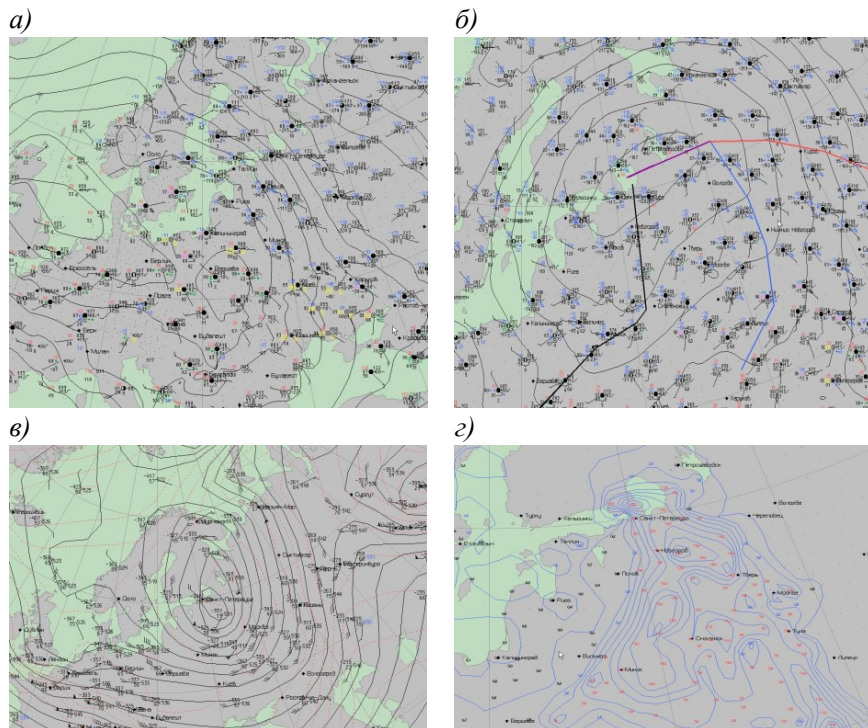


Рис. 1. Синоптические карты для ситуации сильных снегопадов:

a — приземная карта 12 UTC 12.01.2016;

б — приземная карта 18 UTC 13.01.2016;

в — АТ-500 12 UTC 14.01.2016;

з — карта осадков 18 UTC 12.01.2016.

13 января в 00 UTC циклон достиг стадии максимального развития, давление в центре понизилось до 980,1 гПа. 13 января в 18 UTC давление в центре циклона увеличилось до 987,8 гПа и циклон перешел в стадию заполнения. В северных, северо-восточных районах Ленинградской области и в Карелии наблюдались осадки от 10 до 16 мм/12 ч. 14 января в 06 UTC циклон продолжал заполняться, давление в его центре увеличилось до 992 гПа. Зона осадков сместилась на северо-восток, интенсивность осадков уменьшилась.

Анализ синоптических ситуаций за исследуемый период позволил определить наиболее характерные синоптические условия для возникновения сильных снегопадов на СЗ ЕЧР:

- выход на территорию СЗ ЕЧР циклонов с запада и юго-запада;
- средняя скорость перемещения циклона 35—40 км/ч;
- глубина циклонов менее 990 гПа;
- наличие интенсивных изаллобарических очагов падения и роста давления;
- приближение и прохождение теплых фронтов и фронтов окклюзии по типу теплого.

Чаще всего ливневые снегопады отмечались на западной периферии циклонов.

После анализа были выбраны ситуации, которые и были проанализированы с использованием гидродинамического моделирования.

Оценка прогнозов снегопадов, составленных с использованием модели WRF, с использованием наблюдений на станциях СЗ Европейской части России

Для моделирования атмосферных процессов была использована модель WRF-ARW версия 3.5.1. Область интегрирования северо-запад России, Западной Европы и Скандинавия (рис. 2), шаг по пространству 10 км, 40 уровней по вертикали. Шаг интегрирования по времени 60 с.

Моделирование проводилось для периодов с ноября по март 2010—2016 гг. В качестве начальных и граничных условий использованы данные реанализа NCEP/NCAR (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>), граничные условия обновлялись каждые шесть часов.

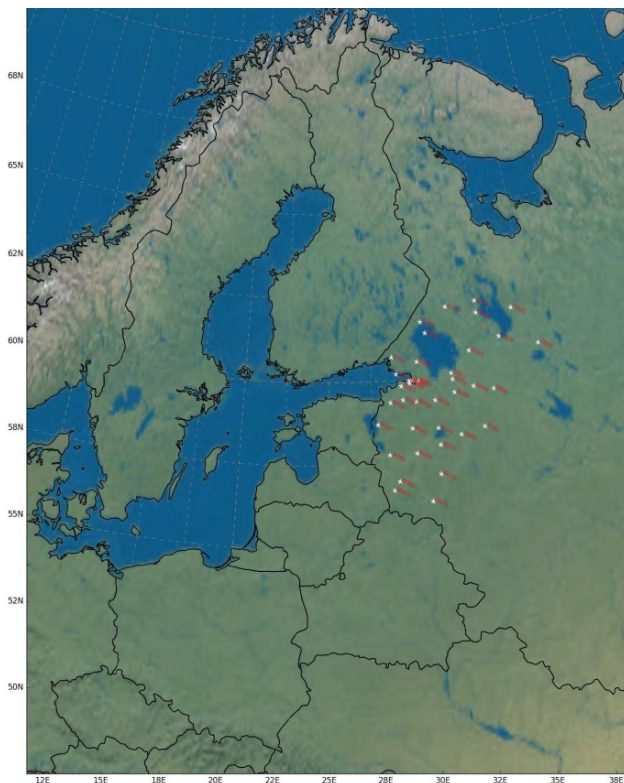


Рис. 2. Область интегрирования модели WRF. Белыми точками обозначены станции, по измерениям на которых производилась верификация прогнозов.

Модель WRF позволяет выбрать оптимальный для области моделирования набор параметризаций физических процессов. В данном исследовании использовались следующие параметризационные схемы:

- микрофизика облаков описана с использованием схемы Лин и др. (1983), которая учитывает пять видов гидрометеоров, седиментацию ледяных частиц и хорошо подходит для моделирования с высокой точностью по реальным данным;

- конвективные процессы параметризованы по схеме Каина—Фритца (Kain—Fritsch), описывающей мелкую и глубокую конвекцию на основе метода потоков масс и анализа конвективной доступной потенциальной энергии (Kain, 2004);

- распространение длинноволновой радиации описывается на основе схемы RRTM с детальным представлением спектра поглощения водяного пара, диоксида углерода и озона, учитывающей влияние аэрозолей, осадков и микрофизики облаков (Mlawer и др. 1997);

- коротковолновое излучение описывается согласно схеме Dudhia, позволяющей эффективно рассчитывать поглощение и рассеивание, как для облачного, так и для безоблачного неба (Dudhia, 1989);

- гидрологический цикл параметризован по модели Noah — расчёт температуры и влажности на четырех уровнях в глубину почвы, учёт частичного снежного покрова и описание физики мёрзлой почвы (Chen, Dudhia, 2001);

- процессы в планетарном пограничном слое описаны по схеме Меллора—Ямада—Джанича (Mellor—Yamada—Janjic), в которой решается одномерное прогностическое уравнение для кинетической энергии турбулентных пульсаций с учетом локального перемешивания по вертикали (Janjic, 1990).

Заблаговременность прогнозов 72 часа с перекрытием в 6 часов, то есть моделирование 4 раза в сутки, начиная от 00, 06, 12 и 18 UTC.

Оценка прогнозов количества осадков произведена для 283 случаев. Оценивался факт выпадения осадков и количество осадков по данным 38 станций СЗ ЕЧР. Станции обозначены белыми

точками на карте области интегрирования, приведенной на рис. 2. Оправдываемость прогнозов оценивалась сравнением прогностических значений количества осадков в узлах сетки модели WRF с фактически наблюдавшимся на близкорасположенных станциях.

Проведенный анализ случаев снегопадов показал, что сильных снегопадов с интенсивностью более 15 мм/12 ч в исследуемый период было очень мало и полученные данные об ошибках прогноза нерепрезентативны, поэтому они здесь не приводятся.

Для оценки прогноза количества осадков рассчитывались следующие статистические характеристики:

средняя абсолютная ошибка

$$\delta Q = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N |Q_{\Pi} - Q_{\Phi}|_q, \quad (1)$$

средняя (систематическая) ошибка

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N (Q_{\Pi} - Q_{\Phi})_q, \quad (2)$$

средняя квадратическая ошибка прогноза

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{q=1}^N (Q_{\Pi} - Q_{\Phi})^2}, \quad (3)$$

где

N — общее количество анализируемых прогнозов,
 Q_{Π}, Q_{Φ} — прогностическое и фактическое значение,
 соответственно.

Оценка качества прогнозов определялась по градациям прогностических ошибок для градаций: $\leq 3,0$; $\leq 8,0$; $\leq 15,0$; $\leq 30,0$ мм/12 ч (РД 52.27.284—1991).

В таблице 1 приведены ошибки прогноза количества осадков при умеренных и слабых снегопадах на 38 станциях СЗ УГМС. Из анализа ошибок, приведенных в таблице 1, видно, что с точки зрения прогноза количества осадков прогноз достаточно хороший. Стоит отметить, что суммарное количество осадков завышается.

Таблица 1

Ошибки прогнозов умеренных и слабых снегопадов на СЗ ЕЧР

$\Delta Q = Q_{\text{п}} - Q_{\text{ф}}$	δQ	ε	σ
$\Delta Q \leq 3$ мм/12 ч умеренные снегопады	1,28	0,96	1,70
$\Delta Q \leq 8$ мм/12 ч умеренные снегопады	1,60	1,25	2,03
$\Delta Q \leq 3$ мм/12 ч слабые снегопады	0,51	0,26	0,85

Также для исследования качества моделирования снегопадов были составлены матрицы сопряженности прогнозов умеренных и слабых снегопадов (таблица 2).

Таблица 2

**Таблица сопряженности для прогнозов
умеренных (2—5 мм/12 ч) и слабых (0—1 мм/12 ч) снегопадов**

	Снегопад прогнозировался	Снегопад не прогнозировался	Количество прогнозов
<i>Умеренные снегопады</i>			
Снегопад наблюдался	73	19	92
Снегопадов не наблюдался	91	100	191
Количество прогнозов	164	119	283
<i>Слабые снегопады</i>			
Снегопад наблюдался	90	75	165
Снегопад не наблюдался	13	105	118
Количество прогнозов	103	180	283

За наличие осадков принимается осредненное по близлежащим к станции узлам количество осадков $\geq 0,1$ мм/12 ч. Если осреднённое количество осадков $< 0,1$ мм/12 ч, то фиксируется факт отсутствия осадков.

На основе таблиц сопряженности определены следующие критерии успешности (Дробжева, Волобуева, 2016):

общая оправдываемость прогноза

$$P = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} 100, \quad (4)$$

оправдываемость прогноза факта наличия осадков

$$U_{+} = \frac{n_{11}}{n_{10}} 100, \quad (5)$$

предупрежденность факта наличия осадков

$$\Pi_{+} = \frac{n_{11}}{n_{01}} 100, \quad (6)$$

оправдываемость прогноза факта отсутствия осадков

$$U_{-} = \frac{n_{22}}{n_{20}} 100, \quad (7)$$

предупрежденность факта отсутствия осадков

$$\Pi_{-} = \frac{n_{22}}{n_{02}} 100, \quad (8)$$

где n_{11} — число случаев оправдавшихся прогнозов наличия явления: явление прогнозировалось и фактически наблюдалось;

n_{21} — число случаев неоправдавшихся прогнозов наличия явления: явление прогнозировалось, но фактически не наблюдалось;

n_{01} — общее число случаев, когда явление прогнозировалось;

n_{12} — число случаев неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления: явление не прогнозировалось, но фактически наблюдалось; n_{22} — число случаев оправдавшихся прогнозов отсутствия явлений: явление не прогнозировалось и фактически не наблюдалось;

n_{02} — общее число случаев, когда явление не прогнозировалась;

n_{10} — общее число случаев, когда явления было;

n_{20} — общее число случаев, когда явления не было.

Также был рассчитан критерий точности прогнозов по А. М. Обухову

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12}}{n_{10}} - \frac{n_{21}}{n_{20}} \right), \quad (9)$$

где отношения $\frac{n_{12}}{n_{10}}$ и $\frac{n_{21}}{n_{20}}$ являются относительными ошибками прогноза наличия или отсутствия снегопада. Критерий Q показывает долю успешных прогнозов и меняется в пределах от 1 (идеальный прогноз) до -1 (все прогнозы ошибочны).

Значения критериев успешности прогнозов умеренных и слабых снегопадов приведены в таблице 3.

Анализ результатов

Анализ ошибок прогнозов снегопадов на территории СЗ ЕЧР и критериев успешности показал, что наиболее удачно прогнозируются умеренные снегопады с количеством осадков 2—5 мм/12 ч.

Предупрежденность наличия и отсутствия снегопадов, как слабых, так и умеренных, превышает характеристики других аналогичных моделей (Кижнер и др., 2013).

В целом модель WRF завышает прогностическое количество снегопадов.

Наиболее успешно прогнозируются осадки вблизи центральной части циклона. Прогнозируемое количество осадков в тыловых частях циклонов, в зонах атмосферных фронтов оказалось завышенным, что может быть связано с усилением ветра при этих ситуациях до 10—13 м/с, а в отдельных случаях и до 18 м/с, что не воспроизводится моделью.

Таблица 3

**Критерии успешности прогнозов умеренных и слабых
снегопадов на СЗ ЕЧР**

Критерии успешности прогнозов	Значения критериев, %
<i>Умеренные снегопады</i>	
Общая оправдываемость прогнозов	61,1
Оправдываемость прогноза факта наличия умеренных снегопадов	79,3
Предупрежденность факта наличия умеренных снегопадов	44,5
Оправдываемость прогноза факта отсутствия умеренных снегопадов	52,4
Предупрежденность факта отсутствия умеренных снегопадов	84,0
Критерий точности прогнозов А. М. Обухова	0,41
<i>Слабые снегопады</i>	
Общая оправдываемость прогнозов	68,9
Оправдываемость прогноза факта наличия слабых снегопадов	54,5
Предупрежденность факта наличия слабых снегопадов	87,4
Оправдываемость прогноза факта отсутствия слабых снегопадов	89,0
Предупрежденность факта отсутствия слабых снегопадов	58,3
Критерий точности прогнозов А. М. Обухова	0,16

Однако эти ошибки могут быть связаны и с неточностью измерений из-за сноса снега, а также с тем, что для тыловой части циклона характерна очень большая пространственная неоднородность внутримассовых ливневых осадков, как в самом факте их выпадения, так и в количестве. Это обусловлено горизонтальными масштабами конвективных ячеек, формирующих кучево-дождевое облако, а также структурой кучево-дождевых облаков, что также может проявляться в ошибках измерений и моделирования.

При прогнозировании внутримассовых осадков в теплых секторах циклонов модель завышает их количество. Следует отметить систематическое завышение прогнозируемых осадков на станциях Пушкинские Горы и Великие Луки, расположенных на юге Псковской области на высоте 118 и 98 м над уровнем моря, соответственно. Это завышение осадков может быть связано как с недоучетом ветрового режима, так и с влиянием орографии.

Кроме оценки прогнозов количества твердых осадков на конкретных станциях было проведено сопоставление прогностических и фактических полей количества осадков по территории СЗ ЕЧР — поля достаточно хорошо согласуются, что также позволяет говорить о возможности использования модели WRF.

В дальнейшем требуются дополнительные исследования для выявления влияния ошибок измерений на оценку качества прогнозов твёрдых осадков на территории СЗ ЕЧР.

Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования прогноза такого опасного явления погоды, как снегопад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Багров А. Н. (2008). Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник. № 35. С. 3—20.

Багров А. Н. (2010а). Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе одиннадцати отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба (в период с октября 2007 г. по сентябрь 2008 г.) // Информационный сборник. № 37. С. 16—30.

Багров А. Н. (2010б). Результаты сравнения успешности прогнозов элементов приземной погоды, рассчитанных на основе одиннадцати отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба (в период с ноября 2008 г. по октябрь 2009 г.) // Информационный сборник, № 37. С. 44—60.

Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. (2007). Информация о модели общего пользования WRF-NMM. — М.: Росгидромет. ГВЦ. 124 с.

Дробжева Я. В., Волобуева О. В. (2016). Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность. — СПб: Адмирал. 116 с.

Калинин Н. А., Попова Е. В. (2013). Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15-16 марта 2013 года // Ученые Записки Российского государственного гидрометеорологического университета. № 32. С. 7—16.

Кижнер Л. И., Нахтигалова Д. П., Барт А. А. (2012). Использование прогностической модели WRF для исследования погоды Томской области // Вестник Томского государственного университета. № 358. С. 219—224.

Пицальникова Е. В. (2014). Аналитический обзор современного состояния проблемы влияния циклонической деятельности на условия формирования обильных осадков в холодный период года // Географический вестник, № 1 (28). С. 69—77.

Пицальникова Е. В. (2015). Условия формирования обильных снегопадов на территории Пермского края // Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Пермь. 130 с.

Пицальникова Е. В., Калинин Н. А., Ветров А. Л., Шихов А. Н., Связов Е. М., Быков А. В. (2015). Прогноз сильного и очень сильного снегопада на Урале на основе модели WRF. Пермский государственный национальный исследовательский университет, [Электронный ресурс]. URL: <https://meteo@psu.ru>.

Шихов А. Н., Связов Е. М. (2015). Оценка сумм осадков за холодный период на западном Урале с помощью модели WRF // Географический вестник. № 3 (34). С. 67—73.

Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. (2009). РД 52.27.724—2009. — Обнинск: «ИГ-СОЦИН». 50 с.

РД 52.27.284—1991. (1991) Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. — М.: Росгидромет. 150 с.

Chen F., Dudhia J. (2001). Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. // Mon. Wea. Rev. V. 129. P. 569—585.

Dudhia J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model // *J. Atmos. Sci.* V. 46. P. 3077—3107.

Janjic Z. I. (1990). The step-mountain coordinates: physical package // *Monthly Weather Review*. V. 118. P. 1429—1443.

Kain J. S., (2004). The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update // *Journal of Applied Meteorology*. 43. № 1. P. 170—181.

Lin Y.-L., Farley R. D., Orville H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model.// *J. Climate Appl. Meteor.* V. 22. P. 1065—1092.

Mlawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J., Clough S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. // *J. Geophys. Res.* V. 102 (D14). P. 16663—16682.

ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ МОДЕЛИ WRF ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ НА ЮГО-ЗАПАДЕ ИРАНА

М. А. Маддаха, И. Н. Русин, А. М. Ахунд-Али

Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле
199178 Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., д. 33–35
i.rusin@spbu.ru

Поступила в редакцию 29.05.2017
Поступила после доработки 3.08.2017

Введение

Штормовые циклоны, сопровождающиеся проливными дождями, могут вызывать локальные наводнения и сильно осложнять жизнь людей. Надежное прогнозирование интенсивных атмосферных осадков позволяет оценивать риск наводнений и способствует снижению уязвимости общества к воздействию этих опасных природных явлений. Все больше исследователей применяют для изучения интенсивных осадков численные модели, предназначенные для прогноза погоды. Однако адаптация модели для прогнозирования осадков в конкретном регионе остается чрезвычайно сложной задачей.

Целью данной работы является оптимизация модели WRF для моделирования сильных дождей на юго-западе Ирана. Оптимизация проводится с целью выбора оптимального набора схем параметризации для предсказания не только количества осадков, но и их пространственного распределения.

Исследуемая территория с севера и востока окружена горами Загрос, а с юга омывается Персидским заливом. Осадки выпадают в основном зимой из воздушных масс, которые переносятся к востоку со стороны Средиземного моря. Большая часть влаги выпадает в горах

в виде сильных ливней, в результате которых может происходить переполнение горных рек, что создает угрозу наводнений на равнинных территориях юго-запада Ирана.

Для обеспечения надежного функционирования основных водорегулирующих сооружения Ирана требуются прогностические и фактические данные о времени выпадения и распределении осадков по территории.

Использованные ресурсы и методы верификации

Моделирование атмосферных процессов над территорией юго-западного Ирана проводилось с использованием численной модели WRF-ARW, версия 3.6.1. Эта модель включает в себя широкий набор параметризаций в области физического описания всех необходимых подсеточных процессов. Модель состоит из 6 блоков:

- I) Микрофизика (*Микр.*),
- II) Конвекция (*Конв.*),
- III) Радиация (*Рад.*), включающая коротковолновые (*КВ*) и длинноволновые (*ДВ*) потоки,
- IV) Планетарный пограничный слой (*ППС*),
- V) Приземный слой (*Приз.*) и
- VI) Процессы на подстилающей поверхности и в почве (*Пов.*)(Skamarock et al., 2008).

В научном сообществе не существует единого мнения по поводу превосходства тех или иных схем параметризаций модели WRF-ARW. Адаптация модели WRF к новому региону выполняется с целью оптимизации схемы расчета. Результативность модели WRF для территории Ирана ранее была исследована в ряде работ, в которых было показано, что прогноз факта выпадения или отсутствия осадков оправдывается в 80 % случаев (Guryanov et al., 2014; Ghassabi et al., 2016; Taghavi et al., 2013 и др.). Также было установлено, что качество прогноза зависит от выбора схем параметризаций: *Конв.*, *Микр.* и *ППС*. Физически это вполне объяснимо и неоднократно подтверждено в научных исследованиях (Кондове, 2016; Nasrollahi et al., 2012). Параметризация микрофизики (*Микр.*) обеспечивает описание

реализации скрытой теплоты конденсации, а также процессов образования и выпадения осадков (Skamarock et al., 2008).

Корректное описание конвекции (*Конв.*) необходимо для учета вертикального перераспределения тепла и влаги в независимых потоках воздуха с фазовыми переходами водяного пара (Nasrollahi et al., 2012).

Параметризация пограничного слоя (*ППС*) описывает турбулентный тепло- и влагообмен и определяет корректное описание влияния подстилающей поверхности на атмосферные процессы.

В указанных выше работах было изучено качество моделирования осадков моделью WRF на длительные сроки для всей территории Ирана.

Однако для адаптации модели к конкретной экономически важной территории необходимо оценить возможности краткосрочного прогнозирования осадков с высоким горизонтальным разрешением. Для изучения влияния выбора схем параметризации на результаты прогноза были выполнены 8 численных экспериментов (см. табл. 1).

Таблица 1

Набор параметризаций физических процессов в проведенных численных экспериментах

Численный эксперимент	Схемы параметризации			
	<i>Микр.</i>	<i>Конв.</i>	<i>ППС</i>	<i>Приз.</i>
WRF1	Lin	KF	YSU	R_MM5
WRF2	Lin	GD	MYJ	Eta
WRF3	WSM6	BMJ	MYJ	Eta
WRF4	WSM6	GD	YSU	R_MM5
WRF5	Thompson	KF	MYJ	Eta
WRF6	Thompson	BMJ	YSU	R_MM5
WRF7	Thompson	BMJ	MYJ	Eta
WRF8	WSM6	KF	MYJ	Eta

В таблице использованы следующие обозначения:

Микр.: Lin — схемы Лин (Lin et al., 1983), WSM6 — спектральная схема 6 (Hong, Lim, 2006) Thompson — схема Томпсона (Thompson et al., 2008).

Конв.: GF — схема Грела—Фрейтас (Grell, Freitas, 2014), BMJ — схема Беттса—Миллера—Янича (Janjić, 1994), KF — схема Каина—Фритша (Kain, 2004). Эта параметризация используется только для двух крайних областей (D15 и D5), но не используется для внутреннего домена (D1,7).

ППС: YSU — схема университета Ёнсей (Hong et al., 2006), MYJ — схема Меллора—Ямады—Янича (Janjić, 1994).

Приз.: R_MM5 — схема модифицированной MM5 (Jimenez et al., 2012), Eta — Janjić Eta Monin—Obukhov (Monin, Obukhov, 1954; Janjić, 2002).

Блоки **Радиация и Пов.** для всех экспериментов были выбраны едиными: **ДВ Рад.** — схема RRTM (Mlawer et al., 1997), **КВ Рад.** — схема Dudhia (Dudhia, 1989), **Пов.** — унифицированная модель Noah (Chen, Dudhia, 2001).

Для корректного описания процессов используется равноугольная коническая проекция Ламберта в декартовой системе координат.

Все параметризации и их комбинации выбраны на основании анализа литературных источников (Giannaros et al., 2014; Hong et al., 2006; Jiménez et al., 2012; Nasrollahi et al., 2012; Skamarock et al., 2008; Taghavi et al., 2013).

В численных экспериментах была использована трехступенчатая телескопизация (рис. 1). Три области расчетов были расположены так, чтобы наилучшим образом учесть свойства рельефа Ирана. Внешний домен (D15) покрывает территорию 1800×1800 км с шагом сетки 15 км. Он охватывает большую часть Ближнего Востока для того, чтобы правильно описать синоптические условия, определяющие погоду региона. Первый вложенный домен (D5) охватывает территорию 1100×1100 км с шагом сетки 5 км и представляет западный Иран. Сетка третьего домена (D1,7) покрывает территорию 440×380 км, имеет шаг 1,7 км и охватывает юго-запад Ирана, включая центральную часть гор Загрос.

В качестве начальных и граничных условий для каждого случая расчетов были использованы данные глобальной модели Final (FNL) (<http://www.rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>) без ассимиляции данных наблюдений с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ по долготе и широте и 27 изобарическими уровнями. Эти файлы содержат информацию за 4 срока наблюдений (00, 06, 12, 18 ВСВ). Топографические данные для внутренних доменов (D5 и D1,7) представлены с шагом $30''$, для внешнего домена (D15) — с шагом $2'$. Все домены имеют 35 уровней по вертикальной гибридной координате η с верхним уровнем 50 гПа.

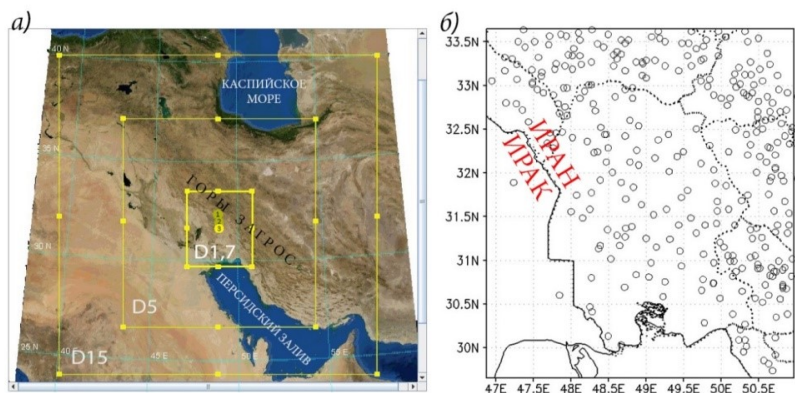


Рис. 1. Настройка доменов WRF:

а) внешний (D15) и вложенные (D5 и D1,7) домены;

б) домен D1,7 с шагом сетки 0,017 градусов.

Кружками обозначены станции, регистрирующие осадки.

В данном исследовании были рассмотрены 6 случаев выпадения сильных атмосферных осадков (более 40 или 50 мм за сутки), которые вызвали локальные наводнения на юго-западе Ирана и нанесли значительный ущерб экономике региона.

Всего проведено 48 численных экспериментов (6 случаев по 8 комбинаций в каждом).

Для каждого эксперимента модель WRF запускалась на 30 часов, начиная с 12 ч ВСВ. Первые 6 часов использовались для подавления спинового эффекта, а следующие 24 часа (от 18 ч 00 мин предыдущего дня до 18 ч 00 мин ВСВ данных суток) — для оценки.

Для оценки результатов расчетов были использованы фактические данные о количестве осадков за сутки по 50 метеорологическим станциям, размещенные на сайте Иранской метеорологической организации <http://www.irimo.ir/eng/wd/720-Products-Services.html>. Дополнительно к анализу привлекались данные 250 осадкомерных станций, в том числе 18 климатологических. Таким образом, общее количество станций составило ~ 300, но в каждом конкретном случае случая их число менялось в зависимости от наличия и надежности данных наблюдений (см. в табл. 2).

Таблица 2

Информация об использованных в работе данных наблюдений

№	Дата	Количество выпавших осадков (мм/сут.)	Количество станций	Число надежных наблюдений	Максимальное количество осадков (мм/сут.)
1	02.05.2013	> 40	12	119	123
2	21.12.2012	> 50	42	259	103
3	26.11.2012	> 40	35	194	98
4	20.11.2011	> 50	38	208	131
5	27.01.2011	> 50	40	209	113
6	30.11.2008	> 50	58	193	102

Для оценки качества прогнозов в области D15 были выбраны результаты моделирования в ближайших к координатам станций узлах сетки. В двух внутренних доменах (D5 и D1,7) из девяти узлов сетки, окружающих каждый пункт наблюдений, в качестве результата расчета осадков был выбран тот узел, в котором значения осадков были ближе всего к наблюдавшемуся значению. Такая процедура оценки, предложенная в работе (Giannaros et al., 2015), позволяет

избежать недооценки качества прогноза по модели за счет небольшого смещения осадков, вызванного расположением сетки.

Для верификации прогнозов в данной работе приняты как количественные, так и качественные оценки, основанные на построении матриц сопряженности. Количественный анализ выполнялся на основе расчета общепринятых статистических критериев, а именно: относительная (RE) и средняя абсолютная (MAE), систематическая (ME) и квадратическая (RMSE) ошибки прогнозов, коэффициенты корреляции Пирсона (CC) между прогностическими и фактическими полями метеорологических величин (Исаев и др., 2015; Moazami et al., 2016).

Значения RE и ME позволяют для каждого домена оценить используемые при расчетах конфигурации модели WRF с точки зрения завышения или занижения реальных данных осадков, в то время как оценки RMSE и MAE дают информацию о качестве расчета количества осадков по исследуемой области.

Критерий CC характеризует ошибку расположения областей осадков и не зависит от количества осадков (координаты, поле осадков).

Для качественной оценки совпадения рассчитанных и наблюдавшихся осадков по всем пунктам наблюдений использован коэффициент успешности прогнозов или индекс Gilbert Skill Score (GSS) (Schaefer, 1990), который вычисляется с использованием элементов, описанных в таблице сопряженности (см. табл. 3):

$$GSS = \frac{A-E}{A+B+C-E} \quad (1)$$

$$\text{где } E = \frac{(A+B) \times (A+C)}{N} \quad (2)$$

Матрица сопряженности (табл. 3) строится таким образом, чтобы учесть все возможные комбинации прогнозируемых и наблюдаемых событий (случаев выпадения осадков):

A – событие предсказано и произошло,

C – событие произошло, но предсказано не было,

B – событие предсказано, но не произошло,

D – событие не предсказано и не произошло.

Таблица 3

Матрица сопряженности результатов прогнозирования и наблюдений

		Наблюдение	
		Да	Нет
Прогноз	Да	A	B
	Нет	C	D

Оценка GSS включает коррекцию воздействия ложных осадков – E . Значения GSS колеблются от $-1/3$ до 1. При $GSS = 0$ моделирование осадков считается случайным, положительные значения GSS указывают на уровень точности, а идеальным прогнозом осадков считается, когда GSS равняется 1.

Результаты и обсуждение

В рамках данного исследования, статистические индексы GSS были рассчитаны для событий типа «осадки больше (меньше) порогового значения». В качестве пороговых значений выбраны количества осадков 5, 10, 20, 30 и 40 мм/сутки. Оценки ME, RE, MAE, RMSE и CC были рассчитаны для пяти градаций: 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 (полуоткрытые интервалы, т. е. 0–10 понимается как 0,10) и т. д.) и более 40 мм/сут. После проведения численных экспериментов на основе анализа оценок ошибок удалось определить комбинацию параметризаций физических процессов, дающую наилучшие оценки прогноза осадков.

Как видно из рис. 2, во всех доменах значения осадков в градациях 0–10 и 10–20 завышены от полутора до трех раз соответственно, и занижены в полтора раза в градациях больше 20 мм/сут. (рис. 2а и 2г).

Значения CC по всем доменам положительные, хотя в градациях 20–30 мм/сут. они варьируются от $-0,05$ до $0,21$ (рис. 2в). В домене D5 ошибки прогноза осадков на всех градациях наименьшие. В этом домене, как и в других, наибольшие ошибки от 16 до 35 мм/сут. наблюдаются в градациях свыше 40 мм/сут. (рис. 2б и 2д).

По анализу коэффициента успешности GSS (рис. 2з) так же лучшим доменом по всем градациям является D5. Для всех градаций значение GSS положительное, что показывает способность модели успешно прогнозировать осадки.

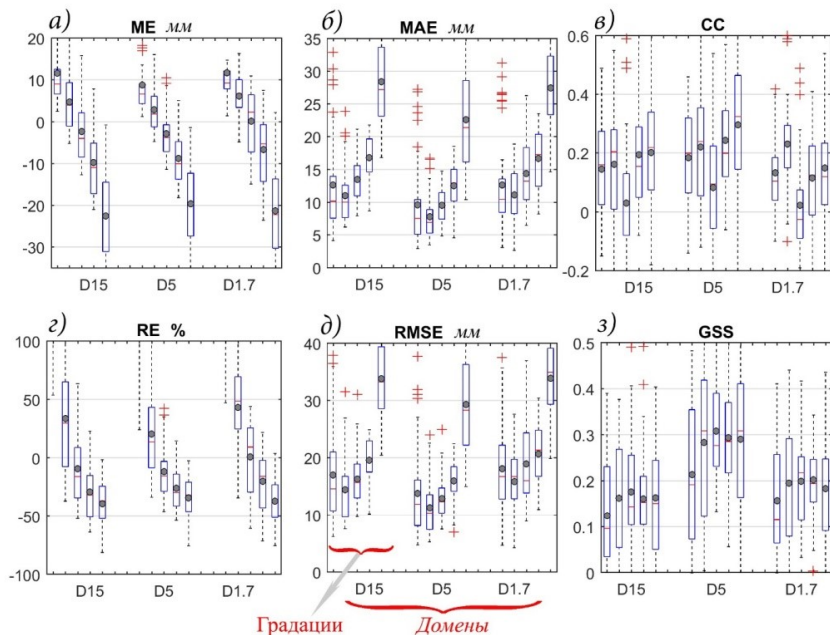


Рис. 2. Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); MAE (б); CC (в); RE (г); RMSE (д) и качественного анализа GSS (з) для трёх доменов (D15, D5 и D1,7).

Прямоугольниками выделена область, заключенная между первым и вторым квантилем; серыми кружками отмечено среднее значение, выносными – область 10–90 %, символом «+» — выбросы.

На рис. 3 представлены графики статистических оценок по D5 для разных комбинаций параметризаций, которые показывают, что WRF5 позволяет дать самый лучший прогноз осадков в грациях свыше 20 мм/сут. Для граций ниже 20 мм/сут. лучшие результаты даёт WRF7.

Обобщая результаты проведенных экспериментов, можно сделать вывод о том, что оптимальной конфигурацией является комбинация параметризаций WRF5.

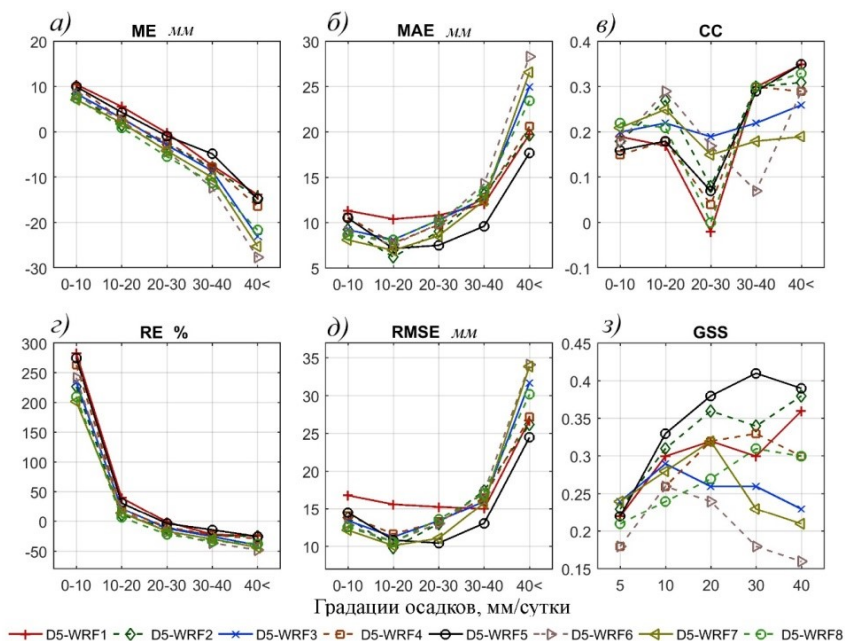


Рис. 3. Оценки ME (а); MAE (б); CC (в); RE (г); RMSE (д) и GSS (з), усредненные по всем случаям по разным грациям осадков для каждой комбинации в домене D5.

Результаты сопоставления измеренных и рассчитанных осадков для всех вариантов конфигурации D5–WRF5 (число случаев $N = 1182$, $R^2 = 0,51$ и $CC = 0,71$) приведены на рис. 4а. Анализ

результатов расчетов показывает, что для слабых и средних дождей (0–25 мм/сут.) модель завышает количество выпавших осадков, а для сильных дождей (более 25 мм/сут.) занижает их (рис. 4б и 4в).

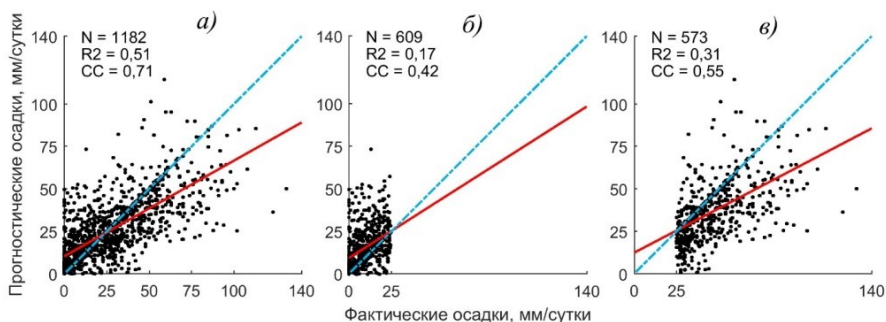


Рис. 4. Сравнение фактических осадков и осадков, рассчитанных для всех случаев конфигурации модели D5–WRF5:

а) все градации, б) 0–25мм/сут., в) более 25 мм/сут.

Заключение

Численные эксперименты показали, что для рассматриваемой территории модель WRF более чувствительна к схемам конвекции, чем к схемам микрофизики.

Статистический анализ полученных результатов показал, что для прогноза сильных осадков (свыше 25 мм/сут.) на территории юго-западного Ирана оптимально использовать конфигурацию модели WRF5 с шагом 5 км, которая использует следующие параметризации: *Микр.* – Thompson, *Конв.* – KF, *ППС* – MYJ, *Приз.* – Eta, *ДВ Рад.* – RRTM, *КВ Рад.* – Dudhia и *Пов.* – Noah. Однако даже в таком варианте модели расчетные значения количества осадков оказываются ниже фактических, полученных по данным наблюдений на метеорологических станциях.

Преимущество схемы параметризации KF, как и отмечено в работе (Кондове, 2016), может быть связано с тем, что, она учитывает

комплексы микрофизических параметров, благодаря чему возможно описание мезомасштабных процессов, восходящих потоков и осадкообразования лучше, чем в других схемах.

Преимущество схемы параметризации Thompson может быть связано с тем, что она описывает образование в облаке как водяных капель, так и ледяных кристаллов, а также эффективно учитывает превращение облачного льда в снег.

Преимущество более высокого пространственного разрешения не очевидно. Потенциал для улучшения прогностических качеств модели при более высоком пространственном разрешении может быть потерян за счет таких, например, ошибок, как ошибки инициализации. Этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании.

Авторы выражают благодарность ресурсному центру «Вычислительный центр СПбГУ» (<http://cc.spbu.ru>), за предоставленную возможность провести необходимый объем расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Исаев Э. К., Мостаманди С. В., Анискина О. Г. (2015). Оценка влияния параметризаций физических процессов в гидродинамической модели WRF на качество прогноза атмосферных процессов в районе со сложным рельефом на примере территории Киргизии // Ученые записки РГГМУ. Вып. 40. С. 30—41.

Кондове А. Л. (2016). Сравнение схем физических параметризаций в модели WRF // Ученые записки РГГМУ. Вып. 44. С. 149—156.

Русин И. Н., Маддах М. А. (2017). Количественные характеристики максимальных осадков юго-западного Ирана // Труды ГГО. Вып. 585. С. 142—157.

Chen F., Dudhia J. (2001). Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. // Monthly Weather Review. 129(4). P. 569—585.

Dudhia J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. // Journal of the Atmospheric Sciences. 46(20). P. 3077—3107.

Ghassabi Z., Alikamali G., Meshkati A. H., Hajam S., Javaheri N. (2016). Time distribution of heavy rainfall events in south west of Iran //Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. T. 145. P. 53—60.

Giannaros T. M., Kotroni V., Lagouvardos K. (2015). Predicting lightning activity in Greece with the Weather Research and Forecasting (WRF) model //Atmospheric Research. T. 156. – C. 1-13.

Grell G. A., Freitas, S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling // Atmos. Chem. Phys. V. 14. P. 5233—5250. doi:10.5194/acp-14-5233-2014.

Guryanov V. V., Maddah M. A., Perevedentsev Y. P. (2014). Torrential Rain Forecast using the Mesoscale Model WRF-ARW // Biosci., Biotechnol. Res. Asia, V. 11. P. 181—187. doi: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/1459>

Hong S. Y., Lim J. O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) // J. Korean Meteor. Soc. V. 42(2). P. 129—151.

Hong S. Y., Noh Y., Dudhia J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. // Monthly Weather Review, V. 134(9). P. 2318—2341.

Janjić Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. // Monthly Weather Review. V. 122(5). P. 927—945.

Janjić Z. I. (2002). Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. // NCEP office note/ V. 437 P. 61.

Jiménez P. A., Dudhia J., González-Rouco J. F., Navarro J., Montávez J. P., & García-Bustamante E. (2012). A revised scheme for the WRF surface layer formulation. // Monthly weather review. V. 140(3). P. 898—918.

Kain J. S. (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. // Journal of Applied Meteorology. V. 43(1). P. 170—181.

Lin Y. L., Farley R., Orville H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. // J. Climate Appl. Meteor. V. 22. P. 1065—1092.

MLawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J., Clough S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. V. 102(D14). P. 16663—16682.

Moazami S., Golian S., Kavianpour M. R., Hong Y. (2014). Uncertainty analysis of bias from satellite rainfall estimates using copula method // Atmospheric Research, 137, 145—166.

Monin A. S., Obukhov A. M. F. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. // Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR. V. 151(163). P. 187.

Nasrollahi N., AghaKouchak A., Li J., Gao, X., Hsu K., Sorooshian S. (2012). Assessing the impacts of different WRF precipitation physics in hurricane simulations // Weather and Forecasting. V. 27(4). P. 1003—1016.

Schaefer J. T. (1990). The critical success index as an indicator of warning skill // Weather and Forecasting. V. 5. P. 570—575

Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. // NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, DOI: 10.5065/D68S4MVH.

Taghavi F., Neyestani A., Ghader, S. (2013). Short range precipitation forecasts evaluation of WRF model over IRAN // The Journal of the Earth and Space Physics. V. 39. №. 2

Thompson G., Field P. R., Rasmussen R. M. Hall, W. D. (2008). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization // Monthly Weather Review. V. 136(12). P. 5095—5115.

О МЕТОДИКЕ КОНТРОЛЯ ДАННЫХ О СОСТАВЛЯЮЩИХ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА, ПОЛУЧАЕМЫХ НА СЕТИ РОСГИДРОМЕТА ПО ПРОГРАММЕ РЕГИСТРАЦИИ

*Л. В. Луцько, А. Н. Махоткин,
А. Е. Ерохина, А. П. Бычкова*

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

Введение

Контроль поступающих с сети материалов актинометрических наблюдений является важнейшей составляющей системы сбора, обработки и подготовки информации к длительному хранению и использованию при проведении различного рода исследований климатологического характера, а также в решении прикладных задач актинометрии. Целью контроля является обеспечение достоверности данных, предназначенных для занесения в архивы режимно-справочного банка данных «Актинометрия» (ведется в ГГО) и для передачи в Госфонд Росгидромета согласно РД 52.19.704-2013.

В предлагаемой работе рассматривается разработанная в ГГО методика контроля данных, получаемых на сети Росгидромета по наиболее информативной программе непрерывных круглосуточных измерений составляющих радиационного баланса (программе регистрации).

Как известно, контроль достоверности результатов измерений проводился в течение всего периода функционирования актинометрических станций в соответствии с существовавшими

представлениями о закономерностях поведения радиационных характеристик.

Наиболее полное обобщение рекомендаций по контролю актинометрической информации, выработанных к 60-м годам XX века, представлено в Руководстве (1961) — для данных непрерывной регистрации, а также в Руководстве (1962) — для материалов срочных наблюдений. Несмотря на то, что эти документы отражают особенности применяемых в тот период технических средств и технологий, закономерности поведения радиационных характеристик и отработанные подходы к проведению контроля не утрачивают актуальности и при современных технологиях.

Поэтому при разработке рассматриваемой методики использовались как ранее полученные сведения о закономерностях пространственно-временного распределения составляющих радиационного баланса, выработанные на базе статистического анализа материалов наблюдений актинометрической сети после 1950 г. (Радиационный режим, 1961), так и расчетные характеристики солнечной радиации (Сивков, 1968). Кроме того, приняты во внимание также результаты исследований межэлементных связей между отдельными актинометрическими характеристиками, опубликованные в работах: Дьяченко Л. Н. (1958), Гагуа В. П. (1968), Бычковой А. П. с соавторами (2002); Ерохиной А. Е. (2005), Морозовой И. В. (2010).

В настоящее время автоматизированный контроль достоверности суточных и месячных сумм суммарной радиации проводится при подготовке ежеквартальных бюллетеней радиационных данных мировой актинометрической сети путем сопоставления с данными о продолжительности солнечного сияния (Морозова, Мясников, 1993).

Методика контроля большинства измеряемых на сети актинометрических характеристик представлена в работе Е. В. Горбаренко с соавторами (2014). Эта методика в значительной степени автоматизирована и используется при проведении контроля материалов регулярных наблюдений, выполняемых в условиях Метеорологической обсерватории МГУ.

Представляемая методика контроля данных регистрации актинометрических величин отличается от вышеупомянутых тем, что предназначена для широкой сети Росгидромета. В методике получили дальнейшее развитие положения, изложенные в РД 52.04.562-96. Она также включает новые алгоритмы анализа сумм (часовых, суточных, месячных) радиационного баланса и его составляющих.

Частичная автоматизация контроля осуществляется с помощью разработанной в ГГО специализированной программы, которая используется в ГГО, в ряде УГМС и на отдельных станциях.

Терминология, используемая в работе, соответствует установленной ОСТ 52.04.10-82.

Основные принципы методики контроля

Методика, используемая в ГГО, включает контроль месячных, суточных и часовых сумм радиационного баланса и его составляющих и предназначена для контроля данных непрерывной круглосуточной регистрации составляющих радиационного баланса, выполненной с помощью табельной установки актинометрической регистрирующей (УАР), автоматизированного актинометрического комплекса (ААК) зарубежного производства и актинометрического измерительного комплекса (АИК) российско-белорусского производства. Методика контроля данных ААК и АИК отличается от методики контроля данных УАР тем, что у комплексов ААК и АИК дополнительно проверяется правильность положения места нуля в измерительных каналах.

В соответствии с действующей в Росгидромете технологической схемой движения актинометрической информации контроль проводится месячными массивами за каждый полный календарный месяц (РД 52.19.704–2013).

Процесс проведения контроля включает ряд последовательных этапов, первым из которых является проверка правильности использованных переводных множителей приборов, от которых в значительной степени зависит достоверность материалов измерений.

Следующим этапом является сопоставление месячных сумм радиации со значениями, полученными в предыдущие годы. На этом этапе проверяющий получает представление о том, которому из видов радиации следует уделить особое внимание при контроле.

На последнем этапе проводится проверка конкретных значений суточных и часовых сумм различных видов радиации, как непосредственно измеряемых актинометрическими датчиками, так и рассчитываемых на базе измеряемых. Для контроля на этом этапе используется разработанная ГГО специализированная программа (ПО-К), которая представляет месячный массив проверяемых данных в удобных для контроля форматах.

Переводные множители приборов и место нуля в измерительных каналах

Проверка переводных множителей, от правильности применения которых зависит достоверность всего месячного массива данных, является важным этапом контроля. Для этого в ГГО, а также и на сети ведется «Журнал переводных множителей», в котором для каждого прибора указываются его номер, значение переводного множителя, дата поверки либо контроля.

Переводный множитель, используемый для обработки первичных данных измерений, может изменяться либо в случае замены прибора, либо по результатам очередной поверки. Как правило, решение об изменении переводных множителей приборов принимают в УГМС, руководствуясь следующим: переводный множитель не изменяют, если от месяца к месяцу его значение колеблется в пределах 3% у актинометра, 5 % у пиранометра, 10 % у балансомера (РД 52.04.562-96, 1997).

Рассмотрение переводных множителей одного и того же прибора в течение года от месяца к месяцу может указать в некоторых случаях на ошибочные значения и необходимость дополнительных поверок. Если переводный множитель изменился на величину, более указанной, то необходимо подтверждение такого изменения дополнительной поверкой.

Обычно чувствительность прибора со временем уменьшается, что приводит к увеличению переводного множителя, который является величиной, обратной чувствительности. Уменьшение переводного множителя (увеличение чувствительности) чаще всего говорит о появлении дефекта в чувствительном элементе датчика, например, о нарушении теплового контакта термобатареи с корпусом. Опасность неуверенного теплового контакта в том, что он появляется и исчезает вследствие термических деформаций деталей прибора, неизбежных при изменениях температуры, и приводит к неконтролируемым колебаниям чувствительности. Чаще всего этот дефект усугубляется со временем, и такой прибор рекомендуется заменить.

Место нуля проверяется у автоматизированных комплексов ААК и АИК в измерительных каналах прямой солнечной, суммарной, рассеянной и отраженной радиации. Проверка производится по данным, измеренным в ночное время суток при высоте солнца ниже минус 5° . Это ограничение объясняется тем, что при меньшем погружении солнца под горизонт на земную поверхность поступает радиация, рассеянная небосводом, наблюдаемая в виде зари. Положение места нуля считается удовлетворительным, если показание датчика в ночное не выходит за пределы $\pm 1,3 \text{ Вт/м}^2$. В противном случае на станции должны улучшить заземление датчика.

2. Месячные суммы радиации

Месячные суммы каждого вида радиации в процессе контроля сопоставляют со значениями имеющегося ряда наблюдений.

С этой целью в ГГО для каждой станции сформирован электронный журнал месячных сумм радиации, в котором указаны упорядоченные по годам месячные суммы прямой солнечной (S), рассеянной (D), суммарной расчетной (Qr), суммарной измеренной (Q), отраженной (R) радиации, радиационного баланса полного (Br), радиационного баланса в тени ($B - S'$), длинноволнового баланса (Bd), альbedo подстилающей поверхности (Ak), продолжительности солнечного сияния (ССС). Журнал постоянно пополняется текущими

данными о месячных суммах. Для каждого вида радиации ежегодно пересчитывается средняя многолетняя месячная сумма, определяются максимальное и минимальное значения за имеющийся ряд лет.

При контроле месячных сумм для всех актинометрических величин приводится их сопоставление с экстремальными значениями (минимальной и максимальной суммой из имеющегося ряда). Для значений, выходящих за пределы экстремальных, анализируют условия, при которых выполнены измерения в течение рассматриваемого месяца (по информации, содержащейся в сопроводительном письме, либо в титульном листе месячного массива данных). Несмотря на то, что такие оценки являются ориентировочными, для некоторых видов радиации они служат дополнительной информацией и помогают при дальнейшем контроле.

Далее месячную сумму прямой солнечной радиации (S) сопоставляют с месячной продолжительностью солнечного сияния (ССС). В большинстве случаев значения S и СССР меняются синхронно. При нарушении синхронности ставят под сомнение либо переводный множитель, либо правильность работы устройства, осуществляющего нацеливания актинометра на солнце.

Сравнивают между собой месячные суммы двух видов суммарной радиации: измеряемой Q и расчетной Q_r , вычисляемой как сумма рассеянной радиации D и прямой солнечной на горизонтальной поверхности S' . Разность между их значениями ($Q_r - Q$), превышающая 5 %, говорит о необходимости проверки правильности переводных множителей актинометра и обоих пиранометров.

Правильность значений месячных сумм отраженной радиации R оценивают по величине альбеда A_k . В месяцы с устойчивым снежным покровом среднемесячное значение A_k как правило не ниже 70 %. В периоды становления и схода снежного покрова среднемесячные значения A_k зависят от количества дней без снега, от состояния тающего снега или оголившейся почвы и др. Для таких периодов среднемесячные значения A_k не нормируются. При отсутствии снежного покрова A_k зависит от типа поверхности и ее особенностей на метеорологической площадке каждой станции. Без растительности — это тип почвы, при наличии растительности — ее вид, густота. Для контроля отраженной радиации R на каждой станции на основе имеющихся рядов наблюдений должны быть определены свои

значения альбедо A_k , характерные для устойчивых состояниях подстилающей поверхности. В качестве ориентировочных значений A_k для различных типов подстилающей поверхности могут использоваться следующие: травяной покров — $12 \div 26$ %, песок — $18 \div 35$ %, без растительности — $8 \div 14$ % (Русин, 1979).

Месячные суммы радиационного баланса B зависят от облачности, высоты солнца, температуры воздуха, температуры и состояния подстилающей поверхности. Как и для других актинометрических величин, измеренное значение месячной суммы радиационного баланса сопоставляют с многолетними средним, максимальным и минимальным значениями. Месячные суммы длинноволнового радиационного баланса B_d должны быть отрицательными.

3. Программа формирования данных для контроля и подготовка их к проведению контроля

С 2011 г. в ГГО для проведения контроля данных, получаемых по программе регистрации, используется специализированная программа (ПО-К), позволяющая существенно облегчить процесс контроля.

Программа ПО-К обеспечивает вызов на контроль данных, обработанных используемой на сети Росгидромета системой SONE, независимо от технических средств, с помощью которых выполнены измерения: УАР, ААК или АИК.

Программа ПО-К представляет обработанные материалы измерений в виде таблиц и графиков межэлементных связей составляющих радиационного баланса в формате Excel на четырех листах:

- на листе «ТМ13» — текущие данные
- на листе «S» — значения часовых сумм прямой солнечной радиации;
- на листе «D» — соотношения между суточными суммами рассеянной и прямой солнечной радиации;
- на листе «B» — график связи часовых сумм радиационного баланса и суммарной радиации.

Самым важным при контроле является лист «ТМ13» (см. табл. 1).

Пример таблицы (фрагмент), сформированной

День	Time	H	Ak	B	Bp	Br	Qrp	Brp	Bф	D	Dp	Q	R	Rp
24 июня	1	-19,5		-17	-17	-17		-17	-16					
	2	-16,9		-14	-14	-14		-14	-16					
	3	-12,1		-17	-17	-17		-17	-16					
	4	-5,4		-12	-12	-12		-12	-16					
	5	3,0	22	-9	-9	-8	11	-8	-9	10	10	16	4	2
	6	11,8	22	-3	-3	27	60	27	24	30	30	60	13	13
	7	21,7	22	-3	-3	96	157	96	90	58	58	157	35	35
	8	31,8	22	-31	-31	159	222	159	133	32	32	222	49	49
	9	42,0	21	-38	-38	212	278	212	171	28	28	278	58	58
	10	51,8	21	-38	-38	246	318	246	198	34	34	319	67	67
	11	60,2	21	-44	-47	267	347	264	218	36	36	347	73	73
	12	65,5	21	-49	-54	283	368	278	232	36	36	367	77	77
	13	65,5	21	-56	-59	281	369	278	232	32	32	367	77	77
	14	60,2	20	-52	-61	279	365	270	230	27	34	359	72	73
	15	51,8	20	-47	-47	248	327	248	204	28	32	323	65	65
	16	42,0	20	-38	-38	212	284	212	175	34	34	280	57	57
	17	31,8	20	-35	-32	159	220	159	132	29	29	222	44	44
	18	21,7	20	-30	-30	75	133	75	74	28	28	133	27	27
	19	11,8	21	-12	-12	12	52	12	19	28	28	52	11	11
	20	3,0	21	-14	-14	-11	19	-11	-3	16	16	20	4	4
	21	-5,4		-17	-17	-17		-17	-16					
	22	-12,1		-9	-9	-9		-9	-16					
	23	-16,9		-9	-9	-9		-9	-16					
	24	-19,5		-9	-9	-9		-9	-16					

Таблица 1

программой ПО-К на листе «ТМ13»

S	Si	Sp	Sip	Time	Hd	HR	HB	Hs	V1	I1	T1	V2	I2	T2
			0	1	0	0	-10	0	10	1	60			
			0	2	0	0	-8	0	10	1	60			
			0	3	0	0	-10	0	10	1	60			
			0	4	0	0	-7	0	10	1	60			
12	1	12	1	5	12	3	-5	12	10	1	60	21	0	45
144	30	144	30	6	37	18	-2	142	10	1	60	21	0	60
267	99	267	99	7	72	47	-2	264	10	1	60	21	0	60
359	190	359	190	8	40	67	-18	355	10	1	60	21	0	30
372	250	372	250	9	35	80	-22	368	10	1	60			
361	284	361	284	10	42	92	-22	357						
358	311	358	311	11	45	100	-27	354						
364	332	364	332	12	45	106	-31	360						
370	337	370	337	13	40	107	-34	366						
381	331	381	331	14	42	100	-35	377						
374	295	374	295	15	40	90	-27	370						
372	250	372	250	16	42	78	-22	368						
365	194	359	191	17	36	60	-18	355						
283	105	283	105	18	35	37	-17	280						
115	24	115	24	19	35	15	-7	114						
69	3	69	3	20	20	5	-8	68						
			0	21	0	0	-10	0	10	1	60			
			0	22	0	0	-5	0	10	1	60			
			0	23	0	0	-5	0	10	1	60			
			0	24	0	0	-5	0	10	1	60			

На листе «ТМ13» представлен полный состав текущей информации за каждый день данного месяца: часовые суммы измеренных и расчетных величин, значения высоты солнца на середину каждого часа, сведения об атмосферных явлениях. Формат листа «ТМ13» позволяет определять значения сумм радиации для восстановления пропущенных и исправления обнаруженных сомнительных. Для этого предусмотрена возможность внести новое значение, которое проверяющий считает правильным, и оценить результат по положению этой величины на графике либо по разности с рассчитанным по аппроксимационной формуле.

Сведения о высоте солнца, отсутствующие в формируемых системой SONE материалах регистрации, очень важны для контроля, как фактор, определяющий в конечном итоге область возможных значений большинства актинометрических величин, а также их взаимосвязей. Поэтому значения высоты солнца (Н) указываются на листе «ТМ13» непосредственно после столбцов «День» и «Time». За ними следуют:

«Ак» — среднечасовые значения альбедо подстилающей поверхности, %,

B_v , B_p — часовые суммы радиационного баланса без прямой солнечной радиации по данным измерений и в столбце для исправлений соответственно,

B_g , B_{gr} — часовые суммы радиационного баланса по данным измерений и в столбце для исправлений соответственно,

$Q_{гр}$ — часовые суммы суммарной радиации расчетной,

$B_{ф}$ — часовые суммы радиационного баланса, рассчитанные по аппроксимационной формуле, представленной на графике листа «В»,

D и D_p — часовые суммы рассеянной радиации по данным измерений и в столбце для исправлений соответственно,

Q — часовые суммы суммарной радиации, измеренные не затененным пиранометром,

R , R_p — часовые суммы отраженной радиации по данным измерений и в столбце для исправлений соответственно,

S , S_i — часовые суммы прямой солнечной радиации и прямой солнечной радиации на горизонтальной поверхности соответственно,

Sp, Sip — часовые прямой радиации и прямой солнечной радиации на горизонтальной поверхности в столбцах для исправлений.

Для исправленных величин в таблице рассчитываются новые значения исходных данных для ввода в соответствующий файл каталога VOD системы SONE. Они отображаются в столбцах Hd, HR, HB, Hs, однако активируются после ввода в эти столбцы переводных множителей.

В последних справа столбцах листа «ТМ13», обозначенных как v1, i1, T1 ... T5, приведены сведения об атмосферных явлениях: вид, интенсивность, продолжительность (всего для пяти явлений за сутки).

Формат листа «ТМ13» представляет широкие возможности для контроля, позволяя получать различного рода дополнительную информацию в численном выражении и/или в графической форме.

Например, введение столбца для разности ($Q_g - Q$) и анализ хода этой величины в часы без солнца и при солнце может дать информацию о правильности переводных множителей датчиков Q, D и S, так и о правильности работы следящей системы в течение дня.

Так, если при отсутствии S значения разности ($Q_g - Q$) незначительны, а при наличии S увеличиваются, то наиболее вероятно, что переводные множители у пиранометров Q и D правильные, а у актинометра — сомнительной. Причиной расхождений Q_g и Q в этом случае может быть также неточное нацеливание актинометра на солнце (сбои в работе следящей системы).

На листе «ТМ13» за любой день может быть построен график суточного хода часовых сумм различных видов радиации. Такой график наглядно представляет характер взаимосвязей отдельных актинометрических параметров, выявляя возможные их нарушения (см. пример на рис.1).

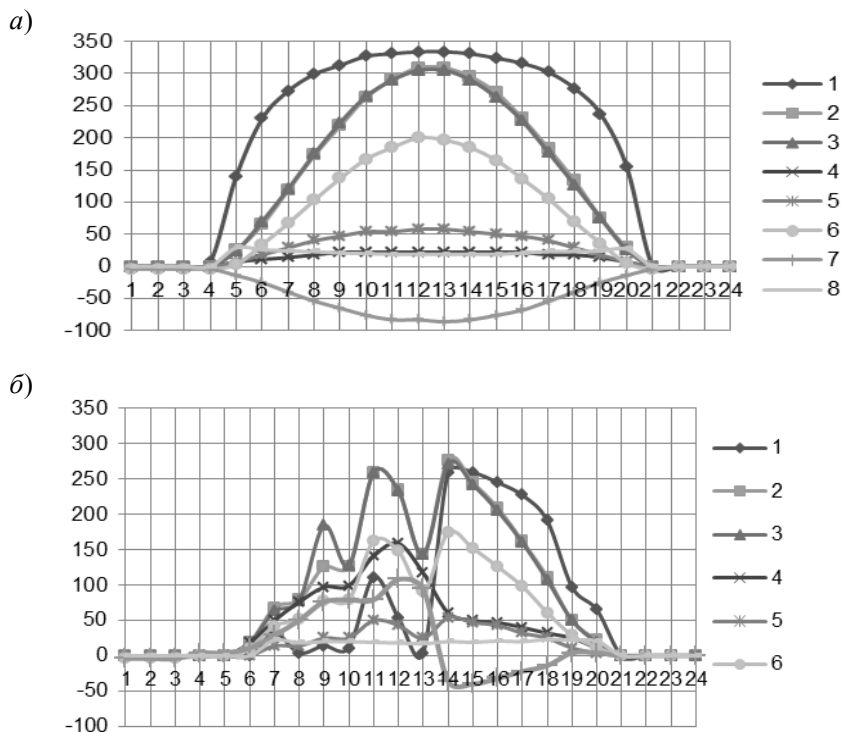


Рис. 1. Суточный ход составляющих радиационного баланса (часовые суммы) в малооблачный день (а) и при наличии облачности (б) .
 1 — прямая солнечная радиация, 2 — суммарная радиация (измеренная),
 3 — суммарной радиация (расчетная), 4 — рассеянная радиация,
 5 — отраженная радиация, 6 — радиационный баланс, 7 — радиационный баланс в тени, 8 — прямая солнечная радиация на горизонтальной поверхности.

Контроль значений прямой солнечной радиации

Для контроля данных по прямой солнечной радиации программа ПО-К представляет на листе «S» график связи измеренных значений

часовых сумм S с высотой солнца H на момент середины часового интервала.

На графике, помимо значений, измеренных в данный месяц, проведена граничная кривая, ограничивающая область максимально возможных на уровне земной поверхности часовых сумм прямой солнечной радиации ($S_{\max}$), рассчитанных по данным С. И. Сивкова (1968). Точки, располагающиеся над граничной кривой, считаются сомнительными. В примере, представленном на рис. 2, такая точка имеется.

Действительно, при проверке обнаружилась ошибка, допущенная оператором в процессе ручного ввода первичных данных перед проведением автоматизированной обработки с помощью системы SONE, используемой на сети.

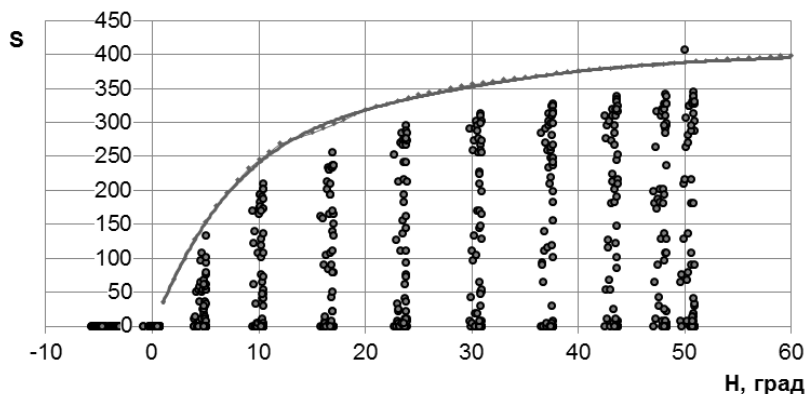


Рис. 2. Пример графика для контроля часовых сумм прямой солнечной радиации ($S \times 100$, МДж/м²).

Кривая соответствует максимально возможным значениям S .

Анализ данных наблюдений показал, что для станций, расположенных на территории России, отношение $S/S_{\max}$ должно составлять не менее 0,80.

Так, в примере на рис. 2 из числа точек, расположенных под граничной кривой, наиболее близко к ней находится точка при высоте солнца $43,6^\circ$, в которой значение S равно 338. Для этой точки

величина $S/S_{\max}$ равна 0,89, что является вполне удовлетворительным, и такой результат позволяет не ставить под сомнение величину переводного множителя актиометра.

В случае, когда отношение $S/S_{\max}$ ниже 0,80, его сопоставляют с данными других месяцев. Если заниженные значения $S/S_{\max}$ повторяются, то это указывает на завышенное значение чувствительности актиометра, используемого при обработке данных, и на необходимость поверки.

Низкие значения отношения $S/S_{\max}$ могут наблюдаться при аномально высокой мутности атмосферы (в условиях сильного задымления при продолжительных и/или обширных пожарах на лесных либо болотных территориях и т.п.), о чем указывается в материалах наблюдений.

Контроль данных рассеянной радиации

При проверке ежедневных данных первым шагом является проверка отсутствия значений часовых сумм D , превышающих максимальное из наблюдавшихся на территории России, которое составляет 2,88 МДж/м² (в таблицах это 288 100×МДж/м²). Значение $D > 2,88$ считается сомнительным. Причиной его появления может являться неполное затенение пиранометра.

Для часовых сумм D контроль возможен только при безоблачном небе. Причиной является сильная зависимость рассеянной радиации от количества облаков, их форм и расположения на небосводе относительно солнечного диска, огромное разнообразие которых практически не позволяет выработать определенные критерии контроля текущих часовых сумм D , измеренных в условиях облачного неба.

При безоблачном небе контроль часовых сумм D выполняется сопоставлением со значениями S с использованием сведений, приведенных в монографии С. И. Сивкова (1968), по данным которой составлена таблица значений часовых сумм рассеянной радиации D и прямой солнечной S в зависимости от высоты солнца и прозрачности атмосферы. В приведенном в табл. 2 примере для D указаны по два значения: при подстилающей поверхности без снега и при покрытой снегом.

Часовые суммы S, D без снега и Dc при снеге в условиях ясного неба, $100 \times \text{МДж/м}^2$

Таблица 2

Прозрачность атмосферы	H	1	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90
Низкая	S	6	30	65	103	136	176	209	236	251	261	266
	D	2	11	21	30	37	49	59	65	69	73	75
	Dc	2	10	23	38	50	68					
Нормальная	S	14	65	122	168	199	241	271	291	304	314	319
	D	2	10	20	28	33	38	43	48	48	50	50
	Dc	3	13	25	38	48	60					
Высокая	S	26	115	193	234	266	307	332	344	357	362	367
	D	2	10	16	20	23	27	30	32	33	33	33
	Dc	3	14	25	30	38	53					

При поверхности, покрытой снегом, значения D заметно выше, чем без снега. Объясняется это тем, что солнечная радиация, отраженная снегом, рассеивается в атмосфере и частично возвращается к земной поверхности.

Несмотря на то, что условия безоблачного неба наблюдаются довольно редко, значения часовых сумм D , полученные при безоблачном небе, могут многое сказать о правильности процесса измерений и об используемой в работе чувствительности (K) пиранометра.

Прежде чем давать оценку достоверности данных измерений D в безоблачные дни, необходимо убедиться в том, что выбранный день является безоблачным. Сведения об облачности, на основании которых дается объективная оценка ясности дня, в данных регистрации отсутствуют, а качественная характеристика ясности дня, которую дает наблюдатель, не всегда бывает точна.

Проверить правильность оценки ясности дня помогает график дневного хода часовых сумм D и S , который строят для рассматриваемого дня по данным на листе «ТМ13».

Признаками безоблачного дня являются: плавный ход кривых S и D в течение всего дня; значения часовых сумм радиации симметричны относительно полудня (12—13 ч); величина D/S , указанная на листе « D » близка к 0,1. Пример графика, построенного за один из дней, неправильно отмеченный шифром «ясно», представлен на рис. 3, на котором указанные признаки безоблачного дня не просматриваются: нарушена плавность кривых, их ход не симметричен, а величина D/S превысила значение 0,1, характерное для условий безоблачного неба, и составила 0,126, подтверждая тем самым присутствие облаков. Таким образом, этот день не был безоблачным, и оценка ясности дня шифром, означающим отсутствие облачков, в материалах наблюдений была дана неправильно.

В то же время налицо признаки правильности измеренных значений S и D . В частности, в 14 и 17 ч отчетливо просматривается снижение S и увеличение D , вызванные появлением облаков. При уменьшении облачности в 15 ч характер изменения величин S и D противоположный.

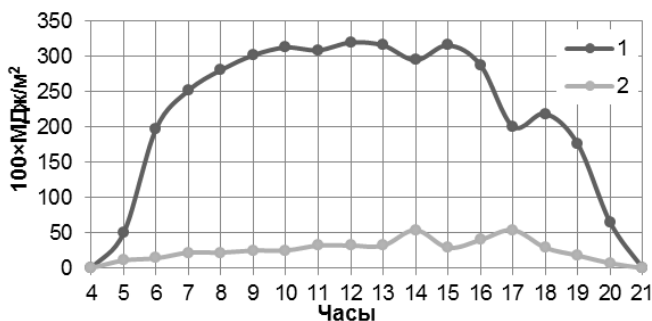


Рис. 3. Дневной ход часовых сумм S и D.
Самара, 14 июня 2015 г.

При сплошной облачности, когда прямая солнечная радиация отсутствует, часовые суммы величин D и Q должны быть одинаковыми. Расхождения между ними, превышающие 10 %, свидетельствуют о неточности используемой в работе чувствительности этих пиранометров и необходимости их поверки.

В условиях переменной облачности контроль часовых сумм рассеянной радиации ввиду их изменчивости практически невозможен.

При этом контроль суточных сумм D возможен. Для этого программа ПО-К автоматически формирует на листе «D» график связи величин D и D/S, а также таблицу их значений за рассматриваемый месяц.

Связь между отношением D/S и величиной S выражается практически всегда степенной функцией типа $D/S = ax^{-b}$, где x – суточная сумма S (см. рис. 4).

Анализ материалов многолетних наблюдений показывает, что степенная функция связи этих величин характерна для каждого месяца года, даже в осенне-зимний период при низких высотах солнца. Это иллюстрируется рис. 5, на котором по данным одной из станций представлены графики связи отношения D/S и суточными суммами S для всех месяцев года.

Установлено, что на большинстве станций при максимальном значении суточной суммы S значение D/S близко к 0,1 в течение года (независимо от календарного месяца). Эта величина принята в качестве критерия достоверности рассматриваемых величин.

Как показывает рис. 5 (врезка), аппроксимационные кривые не всегда достигают уровня D/S , равного 0,1. Это объясняется преобладанием дней с наличием облачности. Однако в каждом месяце есть точки, лежащие вблизи линии 0,1.

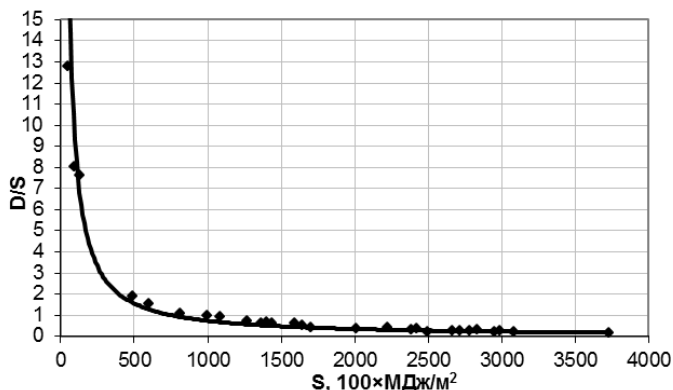


Рис. 4. Пример связи между отношениями суточных сумм D/S и суточными суммами S .

Самара, июль 2015.

$$D/S = 1320,2 \cdot x^{-1,0848}, R^2 = 0,9659$$

Точки, лежащие ниже уровня $D/S = 0,1$, относятся к числу сомнительных и должны быть подвергнуты более тщательному рассмотрению с учетом условий измерений. Значение D/S ниже 0,1 может быть получено либо при завышенном значении S , либо при заниженном D . При отсутствии завышения S (методика рассмотрена выше) сомнительным является заниженное значение D , которое могло быть получено либо при загрязнении колпака пиранометра, либо при отложении на нем гидрометеоров (иней, изморози, росы и т. п.). Такие искажения характерны в основном для зимних месяцев.

В летние месяцы точки, располагающиеся ниже границы $D/S = 0,1$, практически отсутствуют.

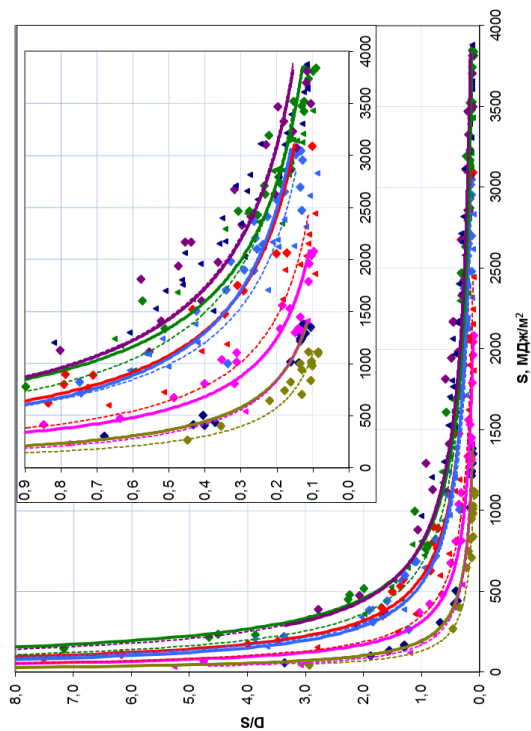


Рис. 5. Связь отношения D/S с сумочными суммами S в различные месяцы года:
 «хаки» – январь и декабрь, розовый – февраль и ноябрь, красный – март и октябрь, голубой – апрель и сентябрь, зеленый – май и август, фиолетовый – июнь и июль.
 Сплошные линии – аппроксимационные кривые в месяцы первого полугодия, пунктирные – месяцы второго полугодия.

Станция Самара, по данным УАР, 2012 г.

Изложенное относится к периоду с устойчивым состоянием подстилающей поверхности. В переходные периоды, когда снег лежит местами, имеет место неопределенность, поскольку указываемая в материалах наблюдений степень покрытия поверхности снегом (менее либо более 50 % поверхности) относится только к метеорологической площадке. В этот период в первом приближении считают, что величина D принимает значения, лежащие между двумя крайними: при отсутствии снежного покрова и при его наличии.

При контроле данных D , независимо от условий измерения, аппроксимационная кривая связи суточных сумм D/S и S , построенная по данным проверяемого месяца, сопоставляется с кривыми одноименного месяца других лет (см. рис. 6). В представленном примере все кривые располагаются достаточно близко друг к другу. При этом кривая проверяемого 2015 года проходит между кривыми 2012 и 2013 годов. Интересно отметить, что кривые за 2010 и 2011 годы почти совпадают, несмотря на то, что максимальные суточные суммы величины S в эти годы различны: 40 и 45 МДж/м² соответственно.

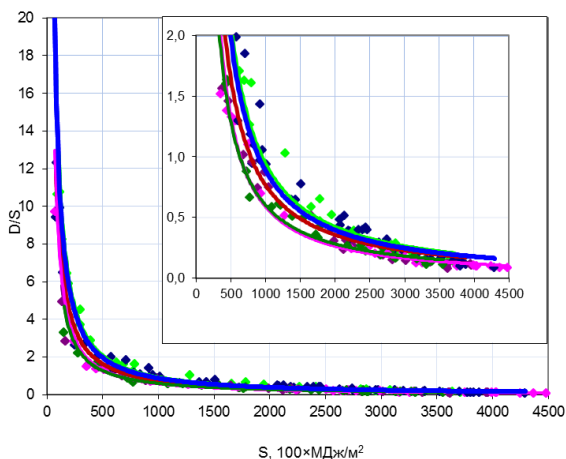


Рис. 6. Связь отношения D/S и суточными суммами S в июле: 2010 г. – фиолетовый, 2011 – розовый, 2012 – светло-зеленый, 2013 – красный, 2014 – зеленый, 2015 – голубой.

Станция Иркутск, по данным УАР и ААК.

Несмотря на различающееся в разные годы расположение кривых, при высоких значениях S величины D/S совпадают между собой, что отчетливо просматривается на врезке на рис. 6. Это является признаком достоверности рассматриваемых материалов измерений.

Контроль радиационного баланса

Выбор межэлементных связей для контроля значений радиационного баланса

Критерии контроля значений радиационного баланса (B), полученных по данным непрерывной круглосуточной регистрации составляющих, выработаны на базе материалов предыдущих публикаций, содержащих богатый и весьма ценный материал в области исследований характеристик радиационного баланса. Наибольший интерес в этом отношении представляют результаты работ (Дьяченко, 1958; Радиационный режим..., 1961; Руководство..., 1962; Гагуа, 1968; Ерохина, 2005).

Некоторые из этих исследований были выполнены по материалам срочных наблюдений и представляют результаты в основном месячных обобщений. Однако полученные в них основные закономерности могут использоваться также для контроля данных, получаемых как табельной установкой актинометрической регистрирующей (УАР), так и автоматизированными комплексами ААК и АИК.

В частности, должно выполняться требование: значение часовой суммы радиационного баланса должно быть не выше максимально возможного значения, составляющего $2,9 \text{ МДж/м}^2$.

При контроле можно ориентироваться на следующие соотношения, характерные для средних условий территории РФ:

- значения B бывают отрицательными в течение суток в декабре — в широтной зоне севернее 56° , в январе — севернее 58° , в феврале — севернее 66° ;
- в условиях отсутствия снега при ясном небе переход от положительных значений B к отрицательным вечером происходит в

среднем за 1 ч 10 мин до захода солнца. При наличии устойчивого снежного покрова этот промежуток времени увеличивается до 1 ч 30 мин. После захода солнца наблюдается резкое уменьшение B .

В упомянутых работах для восстановления пропущенных значений рекомендуется использовать связь радиационного баланса B с суммарной радиацией Q либо связь величины B с коротковолновым балансом B_k , определяемым как разность $(Q-R)$.

В настоящей работе при выборе метода контроля B были проанализированы материалы наблюдений ряда станций для трех периодов:

- за все 12 месяцев года,
- в периоды устойчивого снежного покрова,
- при отсутствии снежного покрова.

В каждом из указанных периодов отдельно анализировались данные, полученные при открытом солнечном диске и при диске, закрытом облаками. Связи между часовыми суммами величин рассматривались как в хронологическом порядке (по месяцам), так и в зависимости от высоты солнца (H) в полдень 15-го числа месяца.

В результате были установлены связи между:

- B и Q (обозначена как BQ);
- B и $B_k = Q - R$ (обозначена как BQR);
- радиационным балансом без прямой солнечной радиации $(B - S')$ и разностью $D - R$ (обозначена как $B*DR$).

Оказалось, что в большинстве случаев радиационный баланс наиболее тесно связан с суммарной радиацией Q (см. табл. 3), и эта связь была принята в качестве основной при контроле значений радиационного баланса B .

Связь часовых сумм радиационного баланса B с суммарной радиацией Q в течение календарного месяца, как правило, может быть выражена линейной функцией типа $B = aQ + b$, в которой a и b — постоянные коэффициенты.

Параметры a и b этой формулы зависят в основном от типа подстилающей поверхности на метеорологической площадке и ее состояния в течение месяца. Установлено, что на всех станциях коэффициент « a » при снежном покрове имеет значения от 0,1 до 0,2; а

при поверхности, покрытой травой — от 0,6 до 0,7. Параметры формулы $B = aQ + b$, полученной по данным с 2010-го по 2016-й, приведены в таблице 4.

Таблица 3

Типы связей радиационного баланса с другими составляющими				
Выборка	Условия			Выбрано
	Данные за все месяцы	при снеге	без снега	
по месяцам по Н	BQ	<i>Все условия</i>		B = f(Q) B = f(Q)
		BQ	BQ и BQR BQ	
по месяцам по Н	B*DR	<i>При солнце</i>		B = f(Q) B = f(Q)
		BQ B*DR	BQR и BQ BQ	
по месяцам по Н	BQ	<i>Без солнца</i>		B = f(Q) B = f(Q)
		BQ	BQ	

Таблица 4

Параметры уравнения связи радиационного баланса В с суммарной радиацией Q при различных условиях

Год	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
	<i>январь, снег, H = 16,3</i>			<i>февраль, снег, H = 24,5</i>			<i>май, трава, H = 56,3</i>		
2016	0,187	-8	0,39	0,159	-8	0,46	0,638	-15	0,98
2015	0,225	-13	0,38	0,247	-13	0,45	0,634	-17	0,97
2014	0,213	-9	0,40	0,176	-9	0,35	0,644	-17	0,89
2013	0,172	-9	0,29	0,163	-11	0,44	0,611	-12	0,96
2012	0,198	-8	0,35	0,196	-7	0,37	0,653	-10	0,91
2011	0,285	-10	0,29	0,181	-13	0,25	0,628	-12	0,86
2010	0,189	-9	0,33	0,244	-12	0,32	0,652	-18	0,87
среднее	0,210	-9		0,195	-10		0,637	-14	
min	0,172	-13		0,159	-13		0,611	-18	
max	0,285	-8		0,247	-7		0,653	-10	

Контроль текущих данных радиационного баланса

При контроле часовых сумм радиационного баланса анализируется график связи часовых сумм радиационного баланса B с суммарной радиацией Q за рассматриваемый месяц, на котором представлена аппроксимационная формула и критерий R^2 , характеризующий достоверность аппроксимации (см. рис. 9).

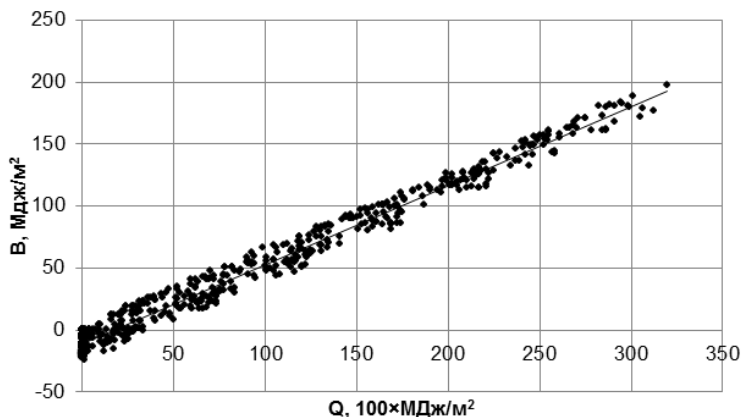


Рис. 8. Пример графика связи часовых сумм радиационного баланса B и суммарной радиацией Q в летний период при подстилающей поверхности, покрытой травой.

$$y = 0,6363x - 10,792$$

$$R^2 = 0,9822$$

При контроле материалов станции за конкретный месяц коэффициент «а» уравнения линейной регрессии сопоставляют со значениями этого коэффициента в другие годы.

Если коэффициенты формулы проверяемого месяца значительно отличаются от других лет, это указывает на неточность переводных множителей приборов. В таком случае рекомендуется провести проверку приборов, особенно балансомера, актинометра и

пиранометра рассеянной радиации и ввести соответствующие исправления в материалы измерений.

В период становления или схода снежного покрова отдельно рассматривают графики, построенные за дни без снега и при снеге (см. рис. 9).

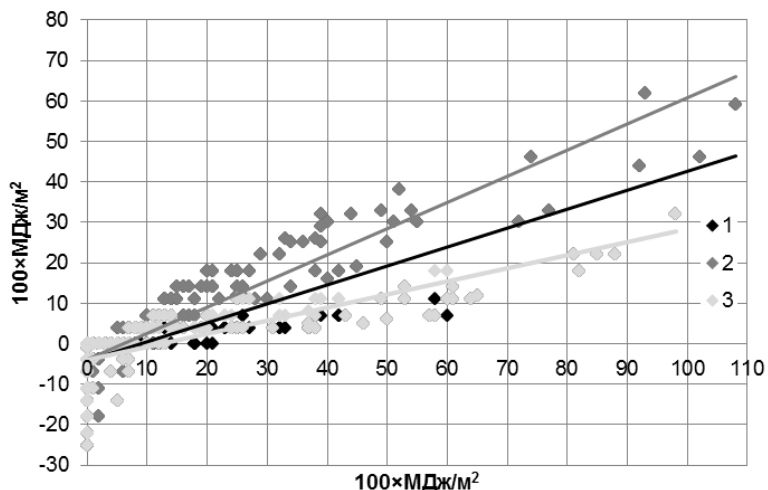


Рис. 9. Связь часовых сумм V со значениями Q в переходный период:

- 1 – за все дни месяца ($y = 0,4686x - 4,1461$, $R^2 = 0,6058$);
- 2 – в дни без снежного покрова ($y = 0,6473x - 3,7896$, $R^2 = 0,8096$);
- 3 – при снежном покрове ($y = 0,2255x - 4,063$, $R^2 = 0,4816$).

Как правило, значения V , измеренные без снега (2), располагаются выше измеренных при снеге (3). Значения коэффициентов «а», равные соответственно 0,23 и 0,65, согласуются с указанными выше средними статистическими. Точки, заметно отклоняющиеся от аппроксимационной прямой, анализируют более подробно, проверяя на листе «ТМ13» наличие атмосферных явлений, не была ли какая-либо величина восстановленной, смотрят записи в титульном листе либо в сопроводительном письме.

В ясный или малооблачный день возможна более детальная проверка данных, которая позволяет выявить не только грубые ошибки, но и установить их причины. Для этого рассматривают суточный ход часовых сумм радиационного баланса и его составляющих и сопоставляют их между собой. Пример графика суточного хода радиационного баланса и его составляющих представлен на рис.10.

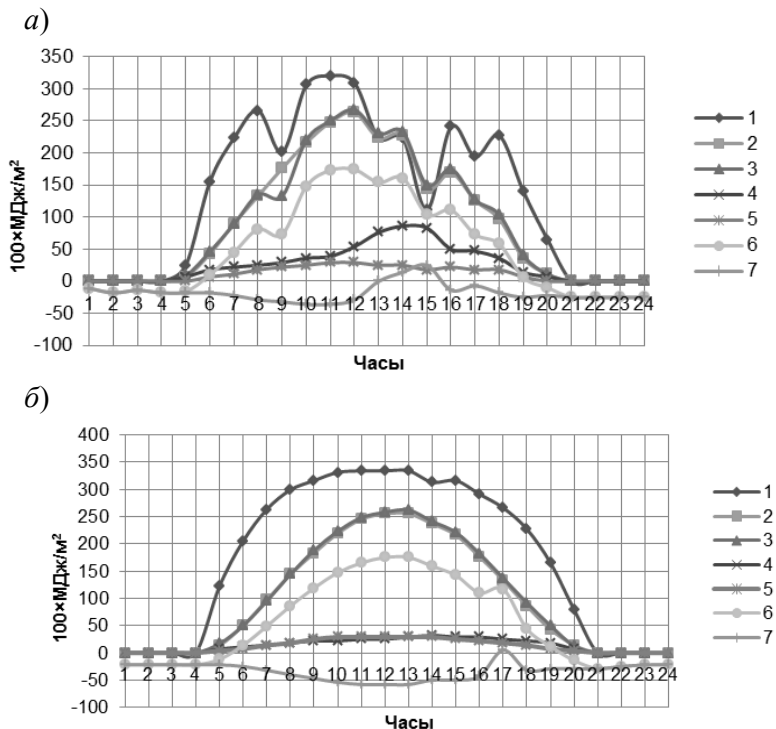


Рис. 10. Суточный ход прямой солнечной (1), суммарной измеренной Q (2), суммарной расчётной Q_r (3), рассеянной (4), отражённой (5) радиации, радиационного баланса (6), радиационного баланса в тени (7):

а) – при нарушении нацеливании актинометра на солнце;

б) – при нарушении затенения балансомера.

На рис. 10а в 09 часов наблюдается увеличенная разность между измеренной суммарной радиацией Q и расчетной Q_r , определяемой как сумма $D + S \cdot \sin H$. При этом уменьшены значения прямой солнечной радиации и радиационного баланса (полного), рассчитанного как сумма $(B - S') + S \cdot \sin H$, где $(B - S')$ – значение по затененному балансомеру. Поскольку ход остальных компонентов не нарушен, то сомнительна правильность нацеливания актинометра с 08:30 до 09:30.

На рис. 10б в 17 часов наблюдаются заметное увеличение B и $(B - S')$ на фоне равномерного хода остальных составляющих. Это свидетельствует о браке в показаниях балансомера из-за нарушения затенения с 16:30 до 17:30.

В дни с переменной облачностью детальная проверка часовых сумм затруднена из-за резких изменений составляющих. В таких случаях ограничиваются качественной оценкой, при которой показательным является четко выраженный ход часовых сумм величины $(B - S')$ противоположно прямой солнечной радиации S .

Заключение

Разработанная ГГО методика контроля достоверности материалов непрерывной регистрации составляющих радиационного баланса является логическим продолжением работ, выполнявшихся большим числом ученых на протяжении становления и развития актинометрической сети в нашей стране.

В этой методике использованы результаты как ранее выполненных исследований зависимостей радиационных характеристик от условий измерений и межэлементных связей, так и полученных в процессе развития методики контроля в ГГО. В методике учтены также особенности новых средств измерений, появившихся на сети в последние годы.

Методика охватывает весь путь получения информации, начиная от переводных множителей, используемых для перевода первичных показаний актинометрических датчиков в значения энергетической освещенности (радиации), создаваемой соответствующим источником излучения: солнцем, небесным сводом, подстилающей поверхностью.

Предусматривает анализ данных различного временного разрешения: месячных суточных и часовых суммы радиации.

Методика обеспечивает выполнение контроля прямой солнечной, рассеянной радиации и радиационного баланса. Прошедшие контроль данные прямой и рассеянной радиации обеспечивают достоверность также и суммарной радиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гагуа В. П. (1968). Методика косвенного определения часовых величин радиационного баланса. Труды ГГО. Вып. 233. С. 87—98.

Горбаренко Е. В., Абакумова Г. М., Летова Л. И. (2014). Возможные критерии контроля достоверности актинометрических измерений // Труды ГГО. Вып. 571. С. 205—211.

Дьяченко Л. Н. (1958). Связь между радиационным балансом и суммарной радиацией // Метеорология и гидрология. № 8. 1958. С. 54—58.

Ерохина А. Е. (2005). К вопросу о методах контроля достоверности результатов измерений радиационного баланса / В сб.: VI Сибирское совещание по климатологическому мониторингу». Томск 14-16.09.2005. Тезисы докладов. — Томск:

Ерохина А. Е., Луцко Л. В. (2006). Исследования возможностей автоматизации контроля достоверности рассеянной радиации, измеряемой на актинометрических станциях / В сб.: Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР-2006). — СПб: СПбГУ.

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.

Морозова И. В. (2010). Возможные аспекты использования формулы Сивкова // Труды ГГО. Вып. 561. С. 154—163.

ОСТ 52.04.10-82. (1984). Актинометрия. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин. — Л.: Гидрометеиздат. 24 с.

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

РД 52.04.562-96. (1997). Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 5. Ч. 1. — М.: Росгидромет. 222 с.

РД 52.19.704-2013. (2013). Краткие схемы обработки гидрометеорологической

информации — Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 80 с.

Руководство гидрометеорологическим станциям по регистрации радиации. (1961). — Л.: Гидрометеиздат. 73-102 с.

Руководство по контролю актинометрических наблюдений. (1962). — Л.: Гидрометеиздат. 149 с.

Русин Н. П. (1979). Прикладная актинометрия. — Л.: Гидрометеиздат, 231 с.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА Д. Н. ЛАВРИЩЕВА ДЛЯ ПРОГНОЗА РАДИАЦИОННЫХ ТУМАНОВ НА АЭРОДРОМЕ УСТЬ-КАМЕНОГОРСК

О. В. Волобуева, И. В. Кок, Н. А. Новикова

Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79
E-mail: nina.novikova@hotmail.com,
ovvolobueva@rshu.ru

Поступила в редакцию 18.07.2017
Поступила после доработки 11.09.2017

Введение

Туман относится к опасным для авиации явлениям погоды. Актуальность исследования связана с тем, что метеорологические условия оказывают существенное влияние на выполнение всех видов полетов, применение летательных аппаратов, состояние аэродромов, эксплуатацию авиационной техники, работу личного состава и средств обеспечения полетов. Для обеспечения безопасности полетов на всех аэродромах организуется система штормового оповещения и предупреждения об опасных и особо опасных явлениях погоды. Оповещение и предупреждение об опасных и особо опасных явлениях погоды пользователей метеорологической информацией на аэродроме является одним из основных видов оперативной работы дежурных смен метеослужбы.

Успешность предсказания туманов сильно зависит от того, насколько изучено влияние физико-географических особенностей на образование тумана.

Установлено, что радиационные туманы на аэродроме Усть-Каменогорск наблюдаются круглогодично, но в теплые месяцы года (с мая по сентябрь) из-за малой вероятности возникновения

прогнозирование радиационных туманов по методу Д. Н. Лаврищева не производится.

Туманы делятся на фронтальные, образование которых связано с термодинамическими процессами в области фронтальных разделов, и внутримассовые. Наибольшее значение применительно к задаче разработки методов краткосрочного прогноза туманов имеет их генетическая классификация (Воробьев, 1991). Любой туман возникает, как правило, под действием нескольких факторов, из которых один является превалирующим. На этом основании и построена генетическая классификация туманов.

Для аэродрома Усть-Каменогорск характерно образование внутримассовых туманов, большинство из которых, по заключению специалистов-синоптиков аэропорта, радиационные, возникающие в ночные часы при дополнительном увлажнении воздуха за счет испарения с поверхности реки Иртыш.

Радиационные туманы относятся к туманам охлаждения. Понижение температуры воздуха является одной из основных причин конденсации водяного пара, как вблизи земной поверхности, так и в свободной атмосфере.

Радиационные туманы образуются в результате охлаждения земной поверхности и прилегающего слоя воздуха под влиянием излучения и турбулентного перемешивания. Понижение температуры земной поверхности вследствие излучения составляет в среднем около $1\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$.

Обычно считают, что при образовании радиационных туманов массовая доля водяного пара при охлаждении воздуха до точки росы остается практически постоянной. Понижение температуры воздуха ниже точки росы сопровождается конденсацией водяного пара, которая приводит к уменьшению массовой доли водяного пара и парциального давления водяного пара. Для образования тумана необходимо, чтобы воздух охладился ниже точки росы настолько, чтобы сконденсировалось определенное количество водяного пара.

Благоприятными условиями для образования радиационных туманов служат:

— отсутствие облачности или наличие облачности только верхнего яруса (увеличение количества облачности и снижение ее нижней границы приводят к усилению противоизлучения атмосферы и уменьшению эффективного излучения земной поверхности, что не способствует ее охлаждению;

— высокая относительная влажность в начальный момент (чем выше относительная влажность, тем меньше величина охлаждения, необходимого для достижения состояния насыщения и образования тумана);

— слабый ветер 1—3 м/с или штиль, слабое увеличение ветра с высотой (такие условия способствуют турбулентному переносу продуктов конденсации от земной поверхности вверх и их поддержанию во взвешенном состоянии в приземном слое воздуха. В процессе перемешивания толщина слоя тумана увеличивается. Если воздух совершенно неподвижен, то перенос влаги обусловлен только молекулярными процессами, и туман может не возникнуть);

— вогнутый рельеф местности (долина, котловина), где ночью стекающий с более высоких мест охлажденный воздух застаивается и дополнительно выхолаживается.

Испарение влаги с заболоченных низин вечером, когда поверхность воды (заболоченной почвы) еще теплее воздуха, способствует образованию радиационного тумана.

Наиболее часто благоприятные условия для возникновения радиационных туманов создаются в антициклонах, их отрогах, барических гребнях и седловинах, реже — в поле пониженного давления с небольшими барическими градиентами (Богаткин, 2010).

Несмотря на наличие большого числа методик расчета туман по-прежнему остается наиболее трудно прогнозируемым явлением, так как прогноз его требует дополнительного учета орографических особенностей данного места.

На аэродроме Усть-Каменогорск для прогноза радиационного тумана используется метод Д. Н. Лаврищева.

Цель работы: исследовать условия образования радиационного тумана на аэродроме Усть-Каменогорск и оценить возможность дальнейшего использования метода Д. Н. Лаврищева для его прогноза.

Исходные данные

В данной работе для анализа и прогноза туманов использовались данные метеорологических наблюдений метеостанции аэродрома Усть-Каменогорск и синоптические материалы за период 2012—2016 гг.: дневники погоды АВ-6, оперативные данные из журнала расчета радиационных туманов по методу Д. Н. Лаврищева, карты погоды (приземные и барической топографии).

Дневники и карты погоды привлекались для анализа синоптических ситуаций и классификации туманов; оперативные данные из журналов расчета — для оценки оправдываемости прогнозов тумана.

Регистрация радиационного тумана как явления проводилась инструментально. При этом радиационные туманы не подразделялись на слабые, умеренные, сильные и очень сильные, так как на аэродроме Усть-Каменогорск, как и во всем Казахстане, туманы таким образом не подразделяют.

Роль местных факторов в механизме образования тумана

Аэропорт г. Усть-Каменогорска расположен в северо-восточной части города на высоте 294 м на правом берегу реки Иртыш в 20 км от Усть-Каменогорской ГЭС и в 10 км от впадения в Иртыш реки Ульбы. Зарегулированный сток Иртыша полностью нарушает температурный режим реки на протяжении 25—30 км ниже плотины ГЭС. Этот участок реки в холодное время года превращается в открытый водоем. Река Ульба тоже не замерзает из-за сброса теплых сточных вод предприятиями города Усть-Каменогорска (Климат Усть-Каменогорска, 2009).

Южнее города после сооружения плотины Усть-Каменогорской ГЭС на Иртыше в 1953 году образовалось водохранилище. Ширина Усть-Каменогорского водохранилища вместе с заливами от 1000 до 1500 метров.

До 1953 года количество дней с туманом в среднем составляло 30—35 дней в году. После строительства и запуска Усть-

Каменогорской ГЭС в 1953 г. число дней с туманом увеличилось до 60—65 дней. Наибольшая повторяемость туманов приходится на месяцы с ноября по февраль. По времени суток появление туманов наиболее часто перед восходом солнца и вскоре после захода солнца. Средняя продолжительность тумана в день с туманом 5 часов. По многолетним данным в течение года наблюдается до 166 дней с дымкой (Климатическая характеристика..., 2010).

Ниже плотины ГЭС в районе Усть-Каменогорска на удалении до 25 км Иртыш не замерзает даже в самые суровые зимы. Ширина незамерзающего участка Иртыша в районе аэропорта составляет 500—800 м.

Средняя повторяемость и продолжительность тумана в районе Усть-Каменогорского аэропорта за зимние месяцы 1955—1977 гг. дает достаточно хорошее представление о влиянии открытой водной поверхности на образование туманов. В Усть-Каменогорске от октября к ноябрю происходит значительное увеличение как средней месячной повторяемости (от 4 случаев в октябре до 8 случаев в ноябре), так и средней месячной продолжительности тумана (от 16 часов в октябре до 44 часов в ноябре).

Влияние реки на образование тумана проявляется более четко при сравнении его повторяемости за два периода: до сооружения плотины ГЭС и после ее строительства. Разность между температурой воды в Иртыше и минимальной температурой воздуха часто составляет более 12 °С.

При таких условиях образовавшийся туман переносится с реки Иртыш, находящейся в 1,5—2,0 км от аэродрома. При этом испарение с поверхности Иртыша может существенно влиять на образование тумана в районе аэропорта, что подтверждает предположение о влиянии испарения с поверхности реки на образование тумана в районе аэропорта после сооружения плотины ГЭС.

В результате анализа исходных данных за период 2012—2016 гг. выявлено, что наибольшая активность радиационных туманов в районе аэродрома Усть-Каменогорск наблюдается с октября по март. В эти месяцы устанавливается малоградиентное барическое поле у земли с низкими температурами, слабыми ветрами и малооблачной

погодой. При этом следует подчеркнуть, что самая большая повторяемость тумана из указанных месяцев бывает в марте — 55 дней. Месяцем с наименьшим числом дней с радиационными туманами является апрель — 11 дней (таблица 1).

Таблица 1

**Число дней с радиационными туманами по месяцам
за период 2012—2016 гг.**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Всего за год
2012	15	4	12	3	—	—	—	—	—	3	3	6	46
2013	5	2	10	—	—	—	—	—	—	6	8	7	38
2014	6	2	9	—	—	—	—	—	—	—	10	9	36
2015	5	11	10	6	—	—	—	—	—	1	9	10	52
2016	16	11	14	2	—	—	—	—	—	5	2	10	60
Всего	47	30	55	11	—	—	—	—	—	15	32	42	232

Всего за 5 лет с 2012 по 2016 годы на аэродроме Усть-Каменогорск было зафиксировано 232 дня с радиационными туманами.

Наибольшее число случаев с туманами приходится на 2016 год (60 случаев). На исследуемой территории существенно меняется годовой и суточный ход температуры, а в 2016 году была аномально теплая зима, что не характерно для этого региона. Год с наименьшим числом случаев радиационных туманов — 2014, всего за год наблюдалось 36 случаев.

В месяцы с наибольшей повторяемостью наблюдается два максимума времени начала образования тумана: один — вскоре после захода солнца от 17 до 20 часов местного времени, другой — близкий к восходу солнца. Первый максимум образования тумана в эти месяцы дает основание предполагать роль влияния испарения с открытой водной поверхности на образование тумана на аэродроме Усть-Каменогорск.

Установлено, что связующим звеном во взаимодействии испарения с водной поверхности с туманообразующими процессами являются слабые местные ветры в пограничном слое атмосферы.

Местная циркуляция в районе Усть-Каменогорска возникает зимой, когда регион находится в отроге Сибирского антициклона на его западной периферии без явно выраженного барического градиента. Местная циркуляция обусловлена локальным барическим градиентом, который создается вследствие разности температуры воздуха над долиной незамерзающего Иртыша и покрытыми снегом окрестностями. Местная циркуляция имеет характер типа горно-долинной.

Таблица 2

**Повторяемость тумана (%) в районе аэродрома
в зависимости от направления ветра у поверхности земли**

Направление ветра, градусы	Туман на ВПП	Туман на расстоянии	Общее число случаев
10—90	3,5	—	2,3
100—180	1,8	3,4	2,3
190—260	0,9	1,7	1,2
270—360	10,4	23,3	14,7
Штиль	83,5	71,5	79,5
Всего	66,5	33,5	100

Из таблицы 2 видно, что туманы на взлетно-посадочной полосе (ВПП) образуются в основном при штилях (83,5 %), северо-западных направлениях ветра у поверхности земли (10,4 %) и при других направлениях (6,2 %). Скорость ветра при этом во всех случаях не превышает 3 м/с. Туманы на расстоянии (над рекой) отмечаются в 33,5 % случаев, причем, только в 28 % случаев они ухудшают видимость на ВПП до значений менее 1000 м при слабых скоростях северо-западных и восточных направлений. В отдельные дни отмечается неоднократное (3—5 случаев) ухудшение видимости на ВПП, так называемый «туман волнами».

Таким образом, из всего вышеизложенного следует, что в большинстве случаев влияние испарения с открытой водной поверхности реки Иртыш прослеживается в обогащении влагой приземного слоя воздуха и выражается через сложный процесс

взаимодействия местных факторов и туманообразующих процессов в механизме образования тумана.

Турбулентный теплообмен. Спокойный воздух является очень плохим проводником тепла. Поэтому при полном отсутствии ветра за счет медленных процессов молекулярной диффузии ночью будет выхолаживаться только тонкий слой воздуха, непосредственно прилегающий к почве. Это может привести к выпадению росы или инея, в отдельных случаях — к образованию наземного тумана, но не может привести к образованию тумана сколько-нибудь значительной мощности. Теплообмен, прежде всего, определяется степенью перемешивания нижнего слоя воздуха, т. е. развитием турбулентности атмосферных движений и наличием слоя инверсии температуры. Наиболее благоприятным для образования тумана является ветер до 2—3 м/с. Более сильный ветер препятствует образованию радиационных туманов.

Помимо скорости ветра степень развития турбулентности и, следовательно, степень теплообмена между подстилающей поверхностью и воздухом зависит от изменения ветра с высотой и от устойчивости стратификации воздушной массы, т. е. от характера изменения температуры воздуха с высотой.

Для рассматриваемого региона особенно характерно наличие приземных инверсий в слое до 200 м.

На аэродроме Усть-Каменогорск дни с туманами обычно характеризуются наличием низкой (до 50—100 м) инверсии температуры. Если инверсионный слой располагается на высотах более 200 м, то туман не образуется, так как водяной пар переносится в более высокие слои. Сложность описания этих процессов затрудняет точный учет влияния ветра на ночное выхолаживание нижнего слоя воздуха и образование радиационных туманов из-за отсутствия в исследуемом регионе в настоящее время температурно-ветрового зондирования атмосферы (Чурсин, 2016).

Состояние подстилающей поверхности. Величина охлаждения подстилающей поверхности в большой степени зависит от теплопроводности. Наиболее сильно охлаждается поверхность сухого

свежевыпавшего снега, сухой почвы и в меньшей степени — мокрого снега, влажной почвы.

Количественные характеристики свойства почвы и снежного покрова необходимы для прогноза радиационных туманов. Немаловажную роль в преобладании радиационных туманов в исследуемом регионе играет состояние подстилающей поверхности, что подтверждается статистическими показателями климатических характеристик образования туманов в Усть-Каменогорске. Так, более 27 % туманов образуется при наличии снежного покрова и только 8 % — при его отсутствии.

Влияние рельефа местности. Особенности рельефа местности играют большую роль в образовании местных радиационных туманов, поэтому они должны быть наиболее тщательно исследованы для более высокой оправдываемости прогнозов туманов.

Особенностью радиационных туманов является их наиболее частое образование в пониженных формах рельефа — межгорных котловинах (Климат Усть-Каменогорска, 2009).

Таблица 3

**Повторяемость (число случаев) радиационных туманов
на аэродроме Усть-Каменогорск за период 2012—2016 гг.
при различных синоптических процессах**

год	Барические системы				
	антициклон	гребень	седловина	малоградиентное поле	ложбина
2012	3	38	2	—	3
2013	9	24	—	1	4
2014	4	31	—	—	5
2015	6	41	—	—	6
2016	9	36	—	2	8
всего	31	170	2	3	26

На основании результатов исследования А. С. Чурсина (2016), который выделил 8 синоптических процессов, для которых характерно образование радиационных туманов, и статистических данных за последние пять лет была составлена таблица 3, в которой

отражены основные, характерные для аэродрома Усть-Каменогорск, синоптические условия образования радиационных туманов.

Наиболее часто радиационные туманы образуются в барических гребнях (170 случаев) и в антициклонах и их отрогах (31 случай). Это связано, как говорилось выше, с тем, что местная циркуляция в районе Усть-Каменогорска возникает зимой, когда регион находится в отроге Сибирского антициклона на его западной периферии без явно выраженного барического градиента. Наименьшее число случаев радиационных туманов наблюдается в поле пониженного давления с небольшими барическими градиентами — 5 случаев.

Прогноз радиационного тумана на аэродроме Усть-Каменогорск

Исследователями-прогнозистами: Н. В. Петренко, А. С. Зверевым, Б. В. Кирюхиным, П. Д. Душкиным и другими — разработаны различные методы прогноза туманов (Богаткин, 2010). Такое многообразие методов обусловлено не только важностью правильной оценки возможности возникновения тумана, но и существенной зависимостью туманов и их появления от местных условий.

В практике обеспечения авиации, в том числе и на аэродроме Усть-Каменогорск, достаточное распространение получил метод Д. Н. Лаврищева. Суть метода заключается в следующем. Рассчитывается минимальная температура воздуха $T_{\min}$ в ночные часы и температура туманообразования T_t . Если $T_{\min}$ ожидается ниже T_t , то следует прогнозировать туман (Методическое письмо, 1975).

Для расчета возможности возникновения радиационного тумана использовалась оперативная информация: исходные данные о температуре воздуха и точке росы в момент, близкий к заходу Солнца, оценивалась ожидаемая синоптическая ситуация в ночные часы, и учитывались прогностические значения скорости и направления ветра, и характер ожидаемой облачности.

Температура туманообразования T_t определяется по графику (рис. 1). На графике показана кривая, которая соответствует

максимальному парциальному давлению водяного пара при насыщении при различных температурах.

Как известно, фактическое содержание водяного пара в воздухе обусловлено температурой точки росы T_d и может быть определено по графику (точка А на рис. 1).

Также по графику можно определить максимально возможное парциальное давление водяного пара (точка С), которое обусловлено температурой воздуха T . Разница между максимально возможным парциальным давлением водяного пара и фактическим парциальным давлением на рисунке 1 обозначена Δe .

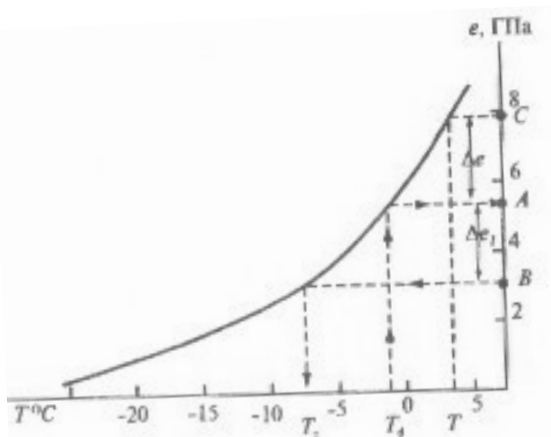


Рис. 1. График для определения величины T_t по методу Д. Н. Лаврищева

Для определения температуры туманообразования T_t по исходным данным следует от точки А сместиться по вертикали вниз до точки В на величину Δe_1 , которая должна быть определена по статистическим данным своего аэродрома. Для условий аэродрома Усть-Каменогорск принято Δe_1 считать равным Δe .

Дальнейший порядок определения T_t по графику показан стрелками.

Оценка качества прогноза наличия и отсутствия радиационных туманов

Оценка успешности прогнозов явлений погоды, в том числе и туманов, производится согласно Наставлению по краткосрочным прогнозам погоды (2009).

Для оценки успешности прогнозов также используются матрицы сопряженности (Дробжева, Волобуева, 2016), общий вид которых представлен в таблице 4, и рассчитываются критерии успешности прогнозов по формулам (1)—(8): общая оправдываемость прогнозов, оправдываемость прогноза факта наличия явления, предупрежденность факта наличия явления, оправдываемость прогноза факта отсутствия явления, предупрежденность факта отсутствия явления, критерий точности прогнозов А. М. Обухова, критерий надежности прогнозов Н. А. Багрова).

Таблица 4

Общий вид матрицы сопряженности

	Явление прогнозировалось	Явление не прогнозировалось	Σ
Явление было	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Явления не было	n_{21}	n_{22}	n_{20}
Σ	n_{01}	n_{02}	N

n_{11} — число случаев оправдавшихся прогнозов наличия явления (явление прогнозировалось и фактически наблюдалось);

n_{21} — число случаев неоправдавшихся прогнозов наличия явления (явление прогнозировалось, но фактически не наблюдалось);

n_{01} — общее число случаев, когда явление прогнозировалось;

n_{12} — число случаев неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления (явление не прогнозировалось, но фактически наблюдалось);

n_{22} — число случаев оправдавшихся прогнозов отсутствия явлений (явление не прогнозировалось и фактически не наблюдалось);

n_{02} — общее число случаев, когда явление не прогнозировалось;

n_{10} — общее число случаев, когда явление было;

n_{20} — общее число случаев, когда явления не было;

N — общее число всех случаев.

Общая оправдываемость прогнозов в процентах определяется по формуле:

$$p = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} \cdot 100, \quad (1)$$

где n_{11} и n_{22} — число случаев оправдавшихся прогнозов.

Оправдываемость прогноза факта наличия явления:

$$U = \frac{n_{11}}{n_{10}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Предупрежденность факта наличия явления:

$$\Pi = \frac{n_{11}}{n_{01}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления:

$$Уб.т. = \frac{n_{22}}{n_{20}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Предупрежденность факта отсутствия явления:

$$Пб.т. = \frac{n_{22}}{n_{02}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Критерий точности прогнозов по А. М. Обухову рассчитывается по формуле:

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12}}{n_{10}} + \frac{n_{21}}{n_{20}} \right), \quad (6)$$

где n_{12}/n_{10} и n_{21}/n_{20} — относительные ошибки прогнозов.

Показатель Q выражает долю точных, успешных прогнозов при известной повторяемости фаз погоды. Он меняется в пределах от 1 до -1 (идеальные прогнозы и все прогнозы ошибочны соответственно).

Критерий надежности прогнозов Н. А. Багрова рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{p - p_{сл}}{1 - p_{сл}}, \quad (7)$$

$$p_{сл} = \frac{n_{11}^{сл} + n_{22}^{сл}}{N} \cdot 100 = \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{n_{10}n_{01}}{N} + \frac{n_{20}n_{02}}{N} \right) \cdot 100 = \frac{n_{10}n_{01} + n_{20}n_{02}}{N^2} \cdot 100, \quad (8)$$

где $n_{11}^{сл} = \frac{n_{10}n_{01}}{N}$ и $n_{22}^{сл} = \frac{n_{20}n_{02}}{N}$ — число случайно оправдавшихся прогнозов.

Критерий H характеризует относительное приращение общей оправдываемости оцениваемых прогнозов к максимально возможному. Значения H меняются в пределах от 0 до 1 (Хандожко, 2005).

По оперативным данным аэродрома Усть-Каменогорск за 2012—2016 гг. впервые была составлена матрица сопряженности прогноза радиационного тумана, и рассчитаны критерии успешности. Общее число случаев составляет 1064 (таблица 5), из которых 232 случая с радиационными туманами и 832 случая без радиационных туманов. Радиационный туман прогнозировался и был по факту на аэродроме — 172 случая. Радиационный туман прогнозировался, но фактически не наблюдался — 68 случаев. Радиационный туман не прогнозировался, но фактически наблюдался — 60 случаев. Радиационный туман не прогнозировался и не наблюдался — 764 случая.

На основании данных таблицы 5 определены критерии успешности прогнозов, представленные в таблице 6.

Таблица 5

Матрица сопряженности прогноза радиационного тумана по данным аэродрома Усть-Каменогорск за период 2012—2016 гг.

	Радиационный туман прогнозировался	Радиационный туман не прогнозировался	Σ
Радиационный туман был	172	60	232
Радиационного тумана не было	68	764	832
Σ	240	824	1064

Таблица 6

Критерии успешности прогноза радиационных туманов

Критерии успешности прогнозов радиационных туманов	Значения критериев успешности
Общая оправдываемость прогнозов туманов, Р %	88
Оправдываемость случайных прогнозов, Р _{сл} %	65
Оправдываемость прогноза факта наличия туманов, U %	74
Предупрежденность факта наличия туманов, П %	72
Оправдываемость прогноза факта отсутствия туманов, U _{б.т.} %	92
Предупрежденность факта отсутствия туманов, П _{б.т.} %	93
Критерий точности прогнозов А. М. Обухова	0,67
Критерий надежности прогнозов Н. А. Багрова	0,66

Полученные критерии успешности свидетельствуют о достаточно успешном прогнозировании туманов по методу Д. Н. Лаврищева: общая оправдываемость прогнозов составила 88 %, высока оправдываемость и предупрежденность прогнозов отсутствия туманов — 92 и 93 % соответственно, в то время как оправдываемость и предупрежденность прогноза наличия туманов составила 74 и 72 % соответственно. Довольно высокие значения критериев успешности точности и надежности А. М. Обухова и Н. А. Багрова оказались равными 0,67 и 0,66 соответственно.

Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Были собраны, систематизированы и проанализированы статистические данные о наличии радиационных туманов за период 2012—2016 гг. на аэродроме г. Усть-Каменогорска.

Выявлено, что наибольшая активность радиационных туманов на аэродроме Усть-Каменогорск наблюдается с октября по март, общее количество за исследуемый период составило 232 случая, при этом месяцем с наибольшим числом дней с радиационными туманами является март — 55 случаев, а с наименьшим — апрель (11 случаев).

Наибольшее количество радиационных туманов приходится на 2016 год (60 случаев). Это возможно связано с тем, что на исследуемой территории существенно меняется годовой и суточный ход температуры, а в 2016 году была аномально теплая зима, что не характерно для этого региона. Год с наименьшим числом случаев радиационных туманов — 2014, всего за год наблюдалось 36 случаев.

2. Изучены синоптические процессы, при которых возникают радиационные туманы.

Наиболее часто радиационные туманы образуются в барических гребнях (170 случаев) и в антициклонах и их отрогах (31 случай). При этом местная циркуляция в районе Усть-Каменогорска возникает зимой, когда регион находится в отроге Сибирского антициклона на его западной периферии без явно выраженного барического градиента. Наименьшее число случаев радиационных туманов наблюдается в поле пониженного давления с небольшими барическими градиентами — 6 случаев. Такие условия предопределяют низкую повторяемость образования туманов на большей части исследуемой территории.

3. Впервые на оперативных данных произведена оценка качества метода Д. Н. Лаврищева прогноза радиационных туманов с использованием критериев успешности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что данный метод эффективен для прогнозирования радиационных туманов, и его

целесообразно продолжать использовать в оперативной работе АМСГ Усть-Каменогорск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богаткин О. Г. (2010). Авиационные прогнозы погоды. Учебное пособие. — СПб: БХВ-Петербург. 288 с.

Воробьев В. И. (1991). Синоптическая метеорология. Учебник. — Л.: Гидрометеоиздат. 616 с.

Дробжева Я. В., Волобуева О. В. (2016). Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность. Учебное пособие. — СПб: Адмирал. 116 с.

Хандожко Л. А. (2005). Экономическая метеорология. Учебник. — СПб: Гидрометеоиздат. 490 с.

Чурсин А. С. (2016). Туманы Восточного Казахстана: монография. — Усть-Каменогорск: Изд-во «Берел» ВКГУ им. С. Аманжолова. 180 с.

Климатическая характеристика аэропорта Усть-Каменогорск (2010). АМСГ Усть-Каменогорск. Рукопись. 110 с.

Климат Усть-Каменогорска (2009) / Под ред. докт. геогр. наук А. В. Егориной. — Усть-Каменогорск: Изд. Типография КГП "Областная газета" Рудный Алтай". 240 с.

Методическое письмо (методы прогноза температуры, тумана, гололеда, осадков) (1975). — Алма-Ата: Изд. фотоофсетная лаборатория УГМС КазССР. 41 с.

Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения (2009). РД 52.27.724. — Обнинск: ИГ-СОЦИН. 50 с.

О ВОЗМОЖНОЙ РОЛИ ОБЛАЧНОСТИ В НАСТОЯЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

С. В. Морозова

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н. Г. Чернышевского
410026 Саратов, ул. Астраханская, 83
E-mail: swetwl@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.06.2017
Поступила после доработки 22.07.2017

В настоящее время довольно хорошо известны основные тенденции изменения современного климата — общепланетарный рост температуры, начавшийся в конце XIX века (первая волна глобального потепления) и прерванный периодом стабилизации в 50—60-х годах прошлого века. С середины 70-х годов XX века началась вторая волна глобального потепления, которая продолжается и в настоящее время с довольно существенным замедлением темпа. Наряду с ростом температуры происходят процессы, затрагивающие практически все компоненты земной климатической системы. Подробный анализ наблюдаемых климатических изменений регулярно проводится МГЭИК и представляется в IPCC (2007, 2013), для территории России — в Оценочных докладах (2008, 2014).

Однако остается в высшей степени дискуссионным вопрос о причинах этих изменений. Если ранее (IPCC, 2007; Оценочный доклад, 2008) фактором, вклад которого в наблюдаемый рост температур считался наиболее значимым, назывался антропогенный (эмиссия углекислого газа), то сейчас в ряде исследований рассматриваются и другие причины возможных изменений. Расчеты по различным моделям, результаты которых представлены в IPCC (2013), указывали на продолжение роста средней глобальной

температуры, однако наблюдаемое замедление темпов потепления заставило глубже проникнуть в суть проблемы и вспомнить о естественных факторах, являющихся мощными естественными механизмами внутренней стабилизации процессов в земной климатической системе. Во Втором Оценочном докладе (2014), а также в IPCC (2013) в качестве естественных факторов, влияющих на процессы в земной климатической системе, называются солнечная активность, вулканическая деятельность, явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Необходимо учитывать то, что глобальные изменения, происходящие в земной климатической системе, так или иначе связаны с глобальным тепловым балансом, который зависит от поступающей к земной поверхности солнечной радиации. Количество поступающей к поверхности Земли солнечной радиации в значительной степени определяется облачностью. Роль облачности в происходящих изменениях климата с достаточной степенью точности не определена. Поэтому изучение современного изменения облачного покрова представляет большой научный и практический интерес.

Сведения о климатических изменениях облачности можно получить из разных источников: публикаций (Хромов, 1983; Дроздов и др., 1989; Байкова и др., 2002), коллективных монографий (Климат России, 2001), научно-прикладных справочников (1968, 1989). В Справочнике по климату СССР (1968), а также книге С. П. Хромова (1983) представлены данные об облачности, полученные по материалам наблюдений в первой половине XX века. Указывается, что для Северного полушария средняя облачность в тот временной промежуток составляла 5,2 балла, для Южного полушария (кроме материка Антарктида, где облаков существенно меньше) — 5,6 балла. Таким образом, средняя облачность для всего земного шара оказалась равной 5,4 балла.

По оценкам, полученным с учетом данных о количестве облаков в 50—80-е годы XX века (Дроздов и др., 1989; Научно-прикладной справочник..., 1989), среднее количество облаков на земном шаре составило 6,1 балла, при этом в Северном полушарии — 5,9 балла, в Южном — 6,2 балла. Таким образом, общее количество облаков

возросло и в целом по земному шару, и в каждом из полушарий. Наблюдаемый рост количества облаков вполне объясним, так как в связи с ростом температуры воздуха увеличивается влагосодержание атмосферы.

Для территории России наиболее подробные данные об изменениях общей облачности можно найти в монографии «Климат России» (2001), статье Байковой и др. (2002). Анализ количества общей облачности, выполненный по данным наблюдений в полуденные часы за периоды 1936—1965, 1966—1980 и 1987—1995 годов, показал увеличение количества облаков от периода к периоду. Оценки тенденций изменения количества облаков над территорией России согласуются с глобальными тенденциями изменения облачного покрова на полушарии. Аналогичные оценки содержатся во Втором Оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014). На Восточно-Европейской равнине за исключением северо-запада среднее многолетнее количество облаков оценивается в 6—7 баллов (Климат России, 2001).

Облачно-радиационные процессы очень сложны. Облачные поля образуются в результате конденсации водяного пара в атмосфере под воздействием определенных циркуляционных процессов макро- и мезо- масштабов. При этом выделяется большое количество тепла, которое существенно влияет на температурный режим атмосферы. С другой стороны, облака большую долю солнечной радиации отражают, некоторую часть — поглощают, а остальную часть рассеивают. Наличие облачности над тем или иным районом земного шара больше всего сказывается на изменении суммарной радиации и эффективного излучения, а следовательно, и на изменении радиационного баланса подстилающей поверхности в этом районе.

Влияние облачности на тепловой режим атмосферы сильно различается в теплое и холодное время. В теплую часть года (суток) температурный режим атмосферы формируется преимущественно приходящей коротковолновой радиацией. Облачность экранирует нижнюю атмосферу от приходящей радиации, температура воздуха понижается. В холодную часть года (суток) температурный режим

атмосферы регулируется преимущественно за счет изменения уходящей длинноволновой радиации Земли и нижней атмосферы, облачность в этом случае препятствует выхолаживанию. По оценкам Б. Г. Шерстюкова (2008) в теплое время года при отрицательных аномалиях количества общей облачности от 0,21 до 0,26 балла наблюдаются положительные аномалии температуры от 1,1 до 1,4 °С, а отрицательная аномалия температуры 0,2 °С имеет место при положительной аномалии количества облаков 0,51 балла.

Большинство представленных оценок облачности получено по данным наблюдений в дневные часы. Однако ночная облачность тоже участвует в радиационно-тепловых процессах. Облачные поля, формирующиеся над каким-либо районом в ночное время, способствуют уменьшению эффективного излучения. В некоторых публикациях (Karl, 1991; Gruza et al., 1999) содержатся сведения об увеличении ночной облачности на фоне настоящего потепления. Рассмотрим, наблюдается ли замеченная в других географических районах тенденция на юго-востоке Русской равнины.

При выполнении исследования использовались опубликованные данные об облачности, архив общей облачности в различные часы суток по метеостанции Саратов Юго-Восток за период с 1937 по 2010 гг., а также по станциям Саратовской области: Ростоши, Балашов, Октябрьский городок, Ершов, Александров Гай. Исследовались только общая облачность, ее среднее суточное количество (балл), отдельно общая дневная и общая ночная облачность. Среднее суточное количество облаков определялось как среднее арифметическое по данным об общей облачности по всем срокам наблюдений. Ночная общая облачность оценивалась по наблюдениям в срок 00 ч 00 мин, а дневная — в срок 12 ч 00 мин среднего солнечного времени. По этим данным формировались климатические ряды средних годовых значений для средней суточной, дневной и ночной общей облачности отдельно. К анализу были привлечены данные о средних годовых температурах воздуха, рассчитанных по наблюдениям тех же метеостанций за тот же временной интервал. Поскольку результаты расчетов для рассмотренных станций оказались идентичными, то в настоящей

статье приводятся данные по метеостанции Саратов Юго-Восток, поскольку для этой метеостанции, в отличие от других, имеется непрерывный ряд наблюдений за облачностью.

На рис. 1 представлено изменение средней годовой температуры воздуха (г. Саратов, метеостанция Юго-Восток). Видно, что за рассматриваемый период температура воздуха выросла с 5,0 до 7,3 °С (на 0,31 °С за 10 лет).

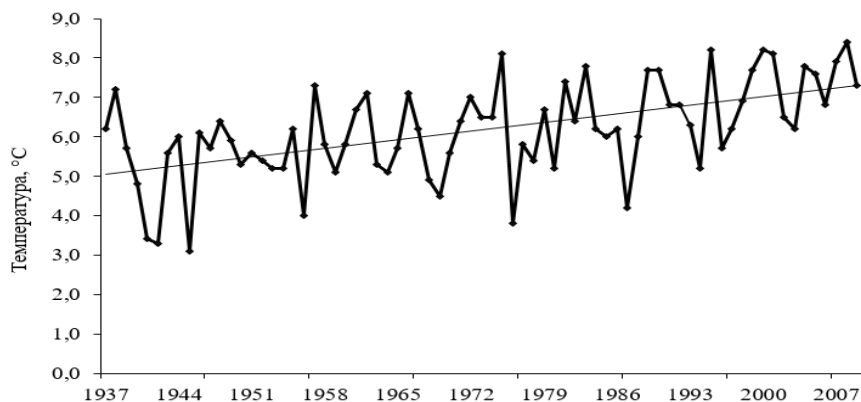


Рис. 1. Изменение средней годовой температуры воздуха
(по данным метеостанции Саратов Юго-Восток).
 $y = 0,0313x - 55,583$

За тот же самый временной интервал изменения значимых трендов в изменении общей облачности не наблюдается (рис. 2). Общее количество облаков остается стабильным и составляет примерно 6,2 балла. Однако, если рассмотреть отдельно количество дневной и ночной облачности (рис. 2), можно обнаружить следующее: при неизменном количестве общей облачности заметно снижение общей дневной облачности и рост количества общей облачности ночью. Причем ночная облачность растет быстрее, чем падает дневная. Коэффициент линейного тренда α уменьшения дневной облачности равен $-0,0017$, увеличения ночной $+0,0058$.

Таким образом, на фоне повышения температуры и сохранения количества общей облачности хорошо заметен рост количества облаков в ночное время. Увеличение количества ночной облачности препятствует радиационному выхолаживанию, тем самым способствуя росту ночных температур и уменьшению амплитуды суточного хода температуры воздуха. Оценить однозначно тенденцию уменьшения дневной облачности сложно, так как летом дневная облачность препятствует радиационному прогреву (отрицательное радиационное воздействие), а зимой препятствует радиационному выхолаживанию (положительное радиационное воздействие). Однако и положительное, и отрицательное радиационное воздействие дневной облачности также сглаживает амплитуду суточного хода температуры воздуха.

Количество облаков днем примерно на 1,5 балла выше, чем ночью, следовательно, можно предположить, что вклад дневной облачности в радиационно-тепловые процессы несколько больше. Слабое неуклонное снижение дневной облачности способствует росту суточной амплитуды и несколько снижает влияние более сильного роста ночной облачности и уменьшает ее вклад в сглаживание суточных контрастов температур. Таким образом, облачность можно считать естественным фактором, способствующим стабилизации процессов в земной климатической системе.

Линейный тренд показывает лишь самую общую тенденцию изменения. Для более детального рассмотрения изменений температуры и облачности ряды облачности и температуры были проанализированы с помощью интегрально-разностных кривых (ИРК). Метод ИРК заключается в последовательном суммировании отклонений от средней многолетней величины, вычисленной для данного периода, в пределах всего периода, что позволяет внутри исследуемого промежутка выявлять периоды с относительно быстрым и относительно медленным изменением метеопараметра. Каждая точка интегрально-разностной кривой соответствует сумме отклонений от многолетнего среднего значения, накопленной от начала ряда до данного года (Дроздов, 1964).

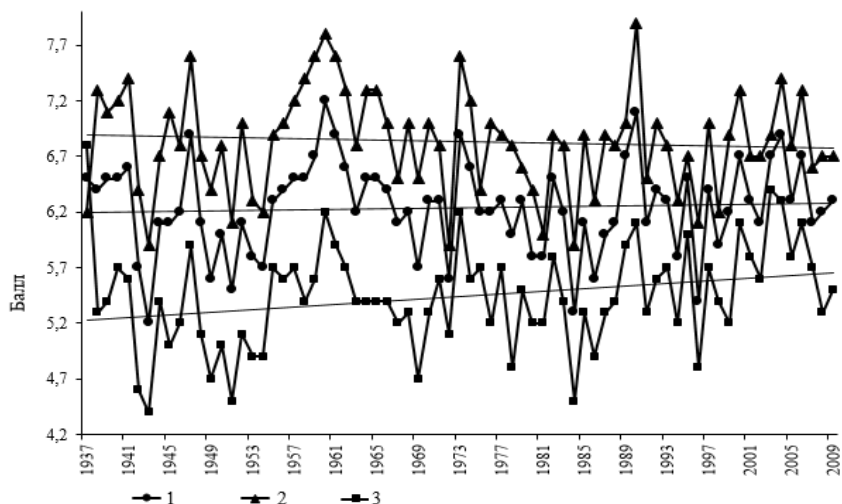


Рис. 2. Изменение среднегодовых значений средней, дневной и ночной общей облачности по данным метеостанции Саратов Юго-Восток.

- 1 — общая облачность ($y = 0,0011x + 6,1973$),
 2 — дневная облачность ($y = -0,0017x + 6,8984$),
 3 — ночная облачность ($y = 0,0058x + 5,2272$).

По графику (рис. 3) можно выявить интересные связи облачность—температура.

С середины 60-х до середины 80-х годов наблюдается заметное расхождение в ходе ИРК, в это время аномалии количества облаков и температуры воздуха остаются квазипостоянными.

С началом второй волны глобального потепления, рассогласованность в ходе кривых исчезает. Таким образом, радиационно-тепловые эффекты облачности различны не только в теплое и холодное время года (суток), но и в различные периоды.

В начале рассматриваемого периода (с конца 30-х до середины 50-х годов) ярко выражена согласованность в ходе интегрально-разностных кривых облачности и температуры (на этот временной

промежуток приходится завершение первой волны глобального потепления).

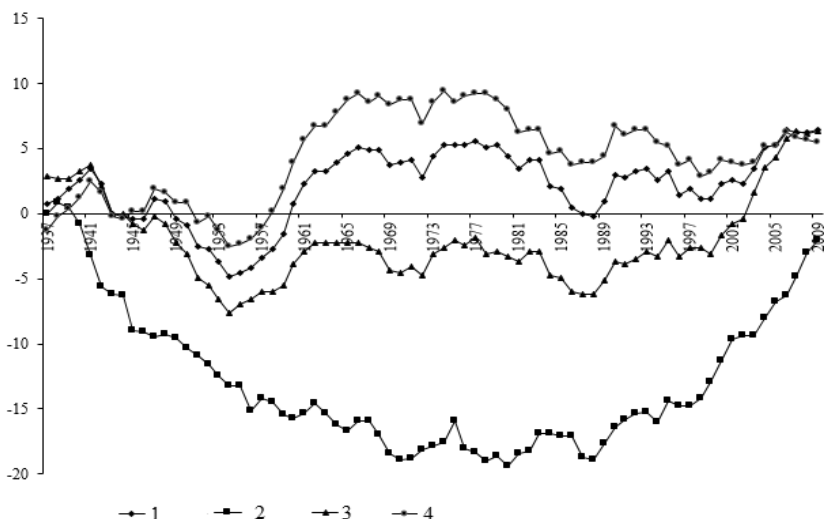


Рис. 3. Интегрально-разностные кривые ($\Sigma(K-1)/c_v$) облачности (три верхние линии) и температуры воздуха (нижняя линия) по данным метеостанции Саратов Юго-Восток.

1— общая облачность, 2— облачность ночная, 3— облачность дневная, 4— температура воздуха.

Описанные тенденции изменения облачности выявлены для юго-востока Русской равнины, характеризующейся высокой степенью засушливости климата. Для этой территории характерно уменьшение количества осадков, преимущественно в теплое время года (Иванова, Левицкая, 2015), а также гидротермического коэффициента (Иванова и др., 2016). Однако в избыточно увлажненной области (Санкт-Петербург), по исследованиям Мелешко и др. (2010), выявлено увеличение количества облаков и в дневные, и в ночные часы, преимущественно в теплое время года. Таким образом, изменения облачности имеют свои особенности в аридных и гумидных зонах.

Косвенным подтверждением выполненного исследования могут стать материалы Оценочных докладов (2008, 2014) об уменьшении осадков в засушливых зонах и увеличении их в достаточно увлажненных.

В заключение можно сделать следующие выводы:

Среднее годовое количество общей облачности на юго-востоке Русской равнины составляет примерно 6,2 балла.

Сопоставление интегрально-разностных кривых облачности и температуры за период 1937—2010 гг. показало, что влияние облачности на тепловой режим атмосферы проявляется по-разному не только в теплое и холодное время года (суток), но и в различные периоды лет.

В рассмотренный период при неизменном количестве среднего суточного количества облаков имеет место рост количества ночной облачности и снижение количества облачности дневной. При этом дневная облачность уменьшается медленнее по сравнению с увеличением ночной: количество общей дневной облачности превышает количество ночной на 1,5 балла. Более слабое снижение количества дневной облачности несколько сглаживает влияние увеличения ночной облачности и уменьшает суточный контраст температур, оказывая тем самым влияние на степень континентальности климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Байкова И. М., Ефимова Н. А., Строкина Л. А. (2002). Современное изменение облачного покрова над территорией России // Метеорология и гидрология. № 9. С. 52—60.

Второй Оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме (2014). — М.: Росгидромет. 60 с.

Дроздов О. А. (1964). О свойстве интегрально-разностных кривых // Труды ГГО. Вып. 162. С. 3—6.

Дроздов О. А., Васильев В. А., Кобышева Н. В., Раевский А. Н., Смекалова Л. К., Школьный Б. П. (1989). Климатология. — Л.: Гидрометеиздат. 567 с.

Иванова Г. Ф., Левицкая Н. Г. (2015). Изменчивость максимально возможного и суммарного испарения на территории Саратовской области в условиях меняющегося климата // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. Т. 15. Вып. 3. С. 5—8.

Иванова Г. Ф., Левицкая Н. Г., Демакина И. И. (2016). Пространственно-временные особенности формирования засух в условиях меняющегося климата Саратовской области // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. Т. 16. Вып. 4. С. 201—205.

Климат России (2001) / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб: Гидрометеиздат. 655 с.

Мелешко В. П., Мецкерская А. В., Хлебникова Е. И. (2010). Климат Санкт-Петербурга и его изменения. — СПб: Д'Арт. 254 с.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1—6 (1989). — Л.: Гидрометеиздат. 648 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата (2008). — М.: Росгидромет. ГУ «НИЦ Планета». 228 с.

Справочник по климату СССР «Облачность и атмосферные явления». Вып. 12. Часть V (1968). — Л.: Гидрометеиздат. 222 с.

Хромов С. П. (1983). Метеорология и климатология. — Л.: Гидрометеиздат. 456 с.

Шерстюков Б. Г. (2008). Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. — Обнинск: ГУ ВНИИГМИ МЦД. 247 с.

Gruza G., Rankova E., Razuvaev V., Bulygina O. (1999). Indicators of climate change for the Russian Federation // Climate Change. V. 42. P. 23—31.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. — Cambridge University Press. 996 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Climate change 2013: The Physical Science Basis. — Cambridge University Press. 1535 p.

Karl T. R. (1991). Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change // Geophysical Research Letters. № 18. P. 2253—2256.

УДК 581.583

Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана. Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 7—20.

Излагается концепция Национального плана адаптации Российской Федерации к изменению климата.

Ключевые слова: изменение климата, климатические воздействия, планирование адаптации.

УДК 551.583.16

Методология расчета погодно-климатических рисков в субъектах Российской Федерации с использованием реляционной базы данных. Васильев М. П., Каширина Е. В., Иванова Е. В. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 21—33.

Рассматривается процесс создания реляционной базы данных с использованием СУБД Microsoft SQL Server 2014 Express для расчета погодно-климатических рисков в различных отраслях экономики. База данных содержит сведения о количестве и интенсивности опасных и неблагоприятных явлений погоды, наблюдавшихся в период 1991–2015 гг. и нанесших экономический ущерб, и социально-экономическую информацию о субъектах Российской Федерации (плотность населения, ВРП). Применение реляционной базы данных позволило получить оценки рисков в 85 субъектах РФ и в экономических секторах, производящих основную долю ВРП.

Ключевые слова: реляционная база данных, кластерный анализ, погодно-климатический риск, субъекты РФ, сектора экономики.

Ил. 6. Библ. 18.

УДК 551.580

Оценка погодно-климатических рисков для секторов экономики и социальной сферы на региональном уровне (на примере Краснодарского края). Васильев М. П., Петерс А. А. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 34—64.

В статье предлагается методика оценки экономического и социального риска от опасных и неблагоприятных явлений погоды на основе использования метеорологической и социально-экономической информации. В результате работы выполнена идентификация и оценка основных погодно-климатических рисков в муниципальных объединениях Краснодарского края, проанализировано влияние наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на величину рисков, предложены адаптационные мероприятия.

Ключевые слова: погодно-климатические риски, адаптация, экономический и социальный риск, опасные гидрометеорологические явления, изменение климата Краснодарского края.

Табл. 5. Ил. 8. Библ. 6

УДК 551.511.61

Моделирование характеристик водного баланса в Центральной Азии. Надёжина Е. Д., Стернзат А. В., Егоров Б. Н., Пикалёва А. А., Школьник И. М. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 65—79.

Анализируются результаты численных экспериментов, основанных на использовании системы моделей, в которую включена региональная климатическая модель (РКМ) и мезомасштабная модель атмосферного пограничного слоя (АПС). Рассматривается эволюция полей температуры, влажности и суммарного испарения (эвапотранспирации) в аридных и семиаридных регионах Центральной Азии. Анализ показывает, что учет в расчетной схеме детальной структуры АПС над орошенными участками приближает пространственные распределения температуры и ЭТ к соответствующим распределениям систематизированных данных наблюдений CRU.

Ключевые слова: региональная модель, пограничный слой атмосферы, эвапотранспирация.

Рис. 6. Библ. 15.

Агроклиматические ресурсы западных земельных областей Казахстана. Байшоланов С. С., Павлова В. Н., Чернов Д. А., Габбасова М. С., Жакиева А. Р. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 80—92.

В статье приводятся результаты по оценке агроклиматических ресурсов Западно-Казахстанской и Актюбинской областей. В Актюбинской области выделяются 5 агроклиматических зон, в Западно-Казахстанской области – 3 зоны. Ресурсы солнечной радиации достаточны для жизнедеятельности сельскохозяйственных культур и больше подходит для растений длинного дня. Продолжительность вегетационного периода колеблется от 145 до 180 суток. Обеспеченные на 90 % суммы активных температур воздуха выше 10°C составляют 2270–3500°C. Биоклиматический потенциал территории составляет 15–40 ц/га в урожайности яровой пшеницы. Также территория двух областей по климатической засушливости вегетационного периода подразделена на 3 зоны: слабо засушливая, умеренно засушливая, сильно засушливая.

Ключевые слова: фотосинтетически активная радиация, вегетационный период, теплообеспеченность, влагообеспеченность, агроклиматические зоны, коэффициент увлажнения, сумма температур, биоклиматический потенциал, засушливость климата.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 12

УДК 551.515.4:551.594.221:551.509.616

Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках. Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Аджиев А.Х., Садыхов Я. А, Чочаев А. Б., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П. Труды ГГО. 2017.Вып. 586. С. 93—116.

Представлены результаты комплексного исследования грозоградового облака с использованием радиолокатора, системы грозопеленгации и спутниковых измерений. Особое внимание уделено анализу и обсуждению изменения контролируемых параметров при «слиянии» конвективных ячеек. Обсуждаются неоднозначные результаты анализа наблюдаемых изменений. В большинстве случаев после слияния ячеек происходило существенное увеличение контролируемых параметров. В то же время «слившиеся» ячейки оставались различимыми и имели очаги максимального отражения и куполообразные вершины.

Ключевые слова: грозоградовое облако, радиолокатор, молния, осадки, конвективные ячейки.

Ил. 5. Библ. 28.

УДК 551.594

Система местоопределения гроз. Снегуров А. В.,Снегуров В.С. Труды ГГО, 2017. Вып. 586. С. 117—140.

Показаны структура системы пеленгации гроз Росгидромета, ее технические характеристики и функциональные возможности.

Ключевые слова: система местоопределения гроз, технические характеристики, функциональные возможности.

Табл. 4. Ил. 11. Библ. 13.

Пассивная СВЧ радиометрия от момента возникновения до современных спутниковых исследований. Мелентьев В. В. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 141—163.

Приводится обзор истории создания методов и средств пассивной СВЧ микроволновой радиометрии (радиотеплолокации) как самостоятельного направления космического землеведения. Приводятся примеры практического использования СВЧ радиометрии для изучения параметров состояния системы «Земля-атмосфера» от времени ее возникновения в начале 1960-х годов, когда возможности микроволнового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) были теоретически обоснованы выдающимся российским ученым профессором К.С. Шифрин, сотрудником Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, до нынешних времен. Описаны некоторые примеры современного практического использования спутниковой микроволновой радиометрии в маммалогии (териологии) и геокриологии. Автор принимал участие в большинстве обсуждаемых в статье исследованиях, многие из которых проводились в тесном взаимодействии со специалистами в области ДЗЗ из NASA, а также стран-участниц программы "Интер-Космос" из Болгарии, Чехословакии, ГДР и Польши.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиояркостная температура, микроволновый радиометр, сканер-поляриметр, космическая метеорология, спутниковая микроволновая климатологии.

Ил. 14. Библ. 30

УДК 551.501.81

Метод калибровки локаторов сети штормоповещения. Жарашуев М. В., Макитов В. С., Карамазов А. Х., Кулиев Д. Д. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 164—174.

Рассматривается метод автокалибровки метеолокаторов, в основе которого лежит автоматическое сравнение характеристик облаков, находящихся на равном удалении от двух локаторов. Основным итогом проведенного исследования является разработка метода автоматического повышения точности измерения метеопараметров облаков и приведения к единому эталонному значению показания всех локаторов сети. Новизна исследования заключается в том, что предлагается использование методики идентификации облаков для корректировки постоянной радиолокационной станции.

Ключевые слова: облако, метеорологическая радиолокация, атмосферные осадки, штормоповещение, автоматизация.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 6

УДК 551.509.54

Оценка прогнозов снегопадов, составленных с помощью модели WRF на Северо-Западе Европейской части России. Анискина О. Г., Волобуева О. В., Мостаменти С. В., Новикова Н. А., Рябинин В. С. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 175—190.

Представлены результаты анализа прогнозов снегопадов на Северо-Западе Европейской части России, полученные на основе мезомасштабной числовой модели WRF. Рассчитаны критерии успешности прогнозирования снегопадов за период с ноября по март 2010-2016 гг.

Ключевые слова: циклон, модель, прогноз, успешность

Табл. 3. Ил. 2. Библ. 19.

УДК: 551.509.313

Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана. Маддах М. А., Русин И. Н., Ахунд-Али А. М. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 191—204.

Рассматривается влияние схем параметризации физических процессов (ПФП) модели WRF на качество прогноза суточных интенсивных осадков на юго-западе Ирана. Для этого были рассмотрены восемь комбинаций ПФП для шести дат (48 экспериментов). С помощью статистических индексов оценивалась результативность каждой комбинации во внешнем и внутренних наименьшие ошибки получаются при прогнозе по области с 5-ти километровым пространственным шагом (первый вложенный домен). Комбинация параметризаций (WRF5) даёт наибольшую точность прогноза умеренных и сильных дождей по сравнению с другими комбинациями, хотя все-таки остаётся недооценка количества осадков в этих градациях.

Ключевые слова: модель WRF, моделирование осадков, параметризация, качество прогноза, юго-запад Ирана.

Табл. 3. Ил. 4. Библ. 25.

УДК 551.521

О методике контроля данных о составляющих радиационного баланса, получаемых на сети Росгидромета по программе регистрации. Луцько Л.В., Махоткин А.Н., Ерохина А.Е., Бычкова А.П. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 205—233.

Представлена методика контроля месячных, суточных и часовых сумм радиационного баланса и его составляющих, используемая для проверки месячных массивов данных, поступающих в ГГО с актинометрической сети.

Приведено описание специализированной программы контроля (ПО-К), которая представляет месячный массив проверяемых данных в удобных для контроля форматах.

Ключевые слова: методы контроля, солнечная радиация, составляющие радиационного баланса, программа контроля.

Таб. 4. Рис. 10. Библ. 15.

УДК 551.509.55

Использование метода Д. Н. Лаврищева для прогноза радиационных туманов на аэродроме Усть-Каменогорск. Волобуева О. В., Кок И. В., Новикова Н. А. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 234—250.

Представлены результаты расчетов и оценка качества прогноза радиационных туманов методом Д.Н. Лаврищева с использованием критериев успешности на аэродроме Усть-Каменогорск за период 2012-2016 гг. Определены характерные синоптические условия образования радиационных туманов исследуемой территории и исследовано влияние местных особенностей на возможность образования туманов.

Ключевые слова: радиационные туманы, прогноз, успешность, метод.

Табл. 6. Ил. 2. Библ. 10.

УДК 551.509

О возможной роли облачности в настоящих климатических изменениях. Морозова С.В. Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 251—260.

Рассматривается связь облачность - температура на фоне периодов климатической изменчивости – первая волна глобального потепления, стабилизация, вторая волна глобального потепления. Исследуется среднее годовое количество общей облачности, а также общая дневная и общая ночная облачность по отдельности. Получено, что при неизменном количестве среднего многолетнего значения баллов общей облачности (6,2 балла), увеличивается количество ночной облачности и снижается количество дневной, причем ночная облачность растет быстрее, чем падает дневная. Формулируется климатически значимый вывод о роли дневной и ночной облачности в радиационно-термическом режиме, что позволяет считать облачность естественным регулятором климатических процессов.

Ключевые слова: климатические изменения, режим облачности, обратные связи облачность - температура.

Ил. 3. Библ. 15.

Adaptation of Russia to climate change: a concept of the national plan.
Kattsov V. M., Porfiriev B. N. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 7—20.

A concept is presented of Russia's National plan for adaptation to climate change.

Keywords: climate change, climate impacts, planning of adaptation.

Methodology of the weather and climate related risk assessment in the subjects of Russian Federation with the use of relational data base.

Vasilev M. P., Kashirina E.V., Ivanova E.V. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 21—33.

The study considers development of relational data base using database management system Microsoft SQL Server 2014 Express with the purpose of the weather- and climate related risk assessment for the various economy branches. The data base includes information on frequency and intensity of the dangerous and adverse weather events in 1991-2015 that did damage to economy, and socioeconomic data (population density and gross regional product). The application of relational data base provides an opportunity to assess weather- and climate related risk for 85 subjects of Russian Federation and for economy sectors that produce the essential shares of GRP.

Keywords: relational data base, cluster analysis, weather and climate related risk, subjects of Russian Federation, economy sectors

Fig. 6. Ref. 18

Assessment of the weather and climate related risks for economy and social sphere at the regional level: the case of Krasnodar Krai. Vasilev M. P., Peters A. A. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 34—64.

The study presents the assessment methodology of the economic and social risks associated with the dangerous hydrometeorological events. The input data include meteorological and socio-economic indicators. By applying this approach the basic climate risks in the municipal units of Krasnodar Krai were identified, impact of current and future climate change on the risk value was analyzed, relevant adaptation measures were considered.

Key words: weather and climate related risks, adaptation, economic and social risk, dangerous hydrometeorological events, climate change in Krasnodar Krai Region.

Tab. 5. Fig. 8. Ref. 6.

Modeling of water balance components in the Central Asia region. Nadyozhina E. D., Sternzat A. V., Egorov B. N., Pikaleva A. A., Shkolnik I. M. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 65—79.

The numerical simulation results are analyzed by using of the model system containing regional climatic model (RCM) and meso-scale model of the atmospheric boundary layer (ABL). The temperature, moisture and evapotranspiration evolution is investigated in the arid and semiarid regions of Central Asia. The analysis shows that temperature and evapotranspiration spatial distributions match better with corresponding CRU data when the detailed description of the boundary layer structure is included in the design scheme.

Keywords: regional model, atmosphere boundary layer, evapotranspiration.

Fig. 6. Ref. 15.

Agroclimatic resources of the western agricultural regions of Kazakhstan.

Baisholanov S. S., Pavlova V. N., Chernov D. A., Gabbasova M. S., Zhakieva A. R. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 80—92.

The article presents results on the evaluation of agroclimatic resources of the West-Kazakhstan and Aktobe regions. In the Aktobe region 5 agroclimatic zones, in the West-Kazakhstan region – 3 zones are allocated. The resources of solar radiation are sufficient for the life of agricultural crops and are more suitable for plants of a long day. The duration of the vegetation period ranges from 145 to 180 days. The sum of active temperatures above 10 °C provided for 90 % are 2270-3500 °C. The bioclimatic potential of the territory is 15-40 c/ha in the yield of spring wheat. Also, the territory of the two regions for climatic aridity of the vegetation period is divided into 3 zones: slightly arid, moderately arid, heavily arid.

Key words: photosynthetically active radiation, vegetation period, heat provision, moisture provision, agroclimatic zones, humidity index, sum of temperatures, bioclimatic potential, aridity of climate.

Tab. 2 Fig. 3 Ref. 12

Analysis of the development and interaction of cells in storm clouds.

Abshayev A. M., Abshayev M. T., Adzhiev A. Kh., Sadykhov Ya. A., Chochaev A. B., Sinkevich A. A., Mikhailovskiy Yu. P. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 93—116.

The results of a complex study of a storm cloud with the use of radar, a system of lightning guidance and satellite measurements are presented. Particular attention is paid to the analysis and discussion of changes in controlled parameters during the "merge" of convective cells. The results of the analysis of the observed changes are discussed ambiguously. In most cases, after the confluence of the cells, a significant increase in the controlled parameters occurred. At the same time, the "merged" cells remained distinct and had foci of maximum reflection and dome-shaped peaks.

Key words: storm cloud, radar, lightning, precipitation, convective cells.

Fig. 5. Ref. 28.

Lightning location system. Snegurov A. V., Snegurov V. S. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 117—140.

The structure, functions and characteristics of Rosgydromet Lightning location system are shown.

Keywords: Lightning location system characteristics, lightning detection network structure, lightning position

Tab. 4. Fig. 11. Ref. 13.

Passive microwave radiometry from beginning to the contemporary satellite investigations. Melentyev V. V. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 141—163.

The paper contains a historical review of rise and the development of the satellite passive microwave radiometry revealing parameters of the system ‘Earth-atmosphere’ from the very beginning in the early 1960-s, when the possibility of microwave remote sensing (RS) was theoretically substantiated and proved by the outstanding Russian scientist □ physicist–optician professor Kusiel S. Shifrin who worked at that time with the Voyeikov Main Geophysical Observatory, till nowadays. Some examples of new contemporary practical application of the satellite microwave survey in geophysics are described. The author had taken part in the majority of the presented and discussed studies, and some of them had been carried out in close cooperation with specialists from foreign countries including outstanding experts in RS from NASA as well as participants of the program ‘Inter-Kosmos’ (Bulgaria, Czechoslovakia, German Democratic Republic and Poland).

Keywords: remote sensing, brightness temperature, microwave radiometer, scanner-polarimeter, space meteorology, satellite microwave climatology.

Fig. 14. Ref. 30

The method of calibration of the locators, the network alert of storm. Zharashuev M. V., Makitov V. S., Kagermazov A. Kh., Kallie D. D. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. C. 164—174.

The method of calibration of weather radars, which is based on the automatic comparison of the characteristics of clouds, located at an equal distance from the two locators. The main outcome of the study is development of a method to automatically improve the accuracy of measurement of meteorological parameters of clouds and to bring a unified reference value of the testimony of all the locators of the network. The novelty of the study is that the use of methods of identification of clouds for the adjustment of a permanent radar station.

Keywords: clouds, weather radar, precipitation, alert of storm, automation

Tab. 1. Fig. 2. Ref. 6.

Forecast of snowfall evaluations, arranged by using of WRF model in the north-west of the European Russia. Aniskina O. G., Volobueva O. V., Mostamandi S. V., Novikova N. A., Ryabinin V. S. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 175—190.

Results of the snowfall forecast evaluations, arranged by using of the WRF mesogrid numerical model, are represented. Criteria of the snowfall forecasting successfulness for the period from November to March 2010-2016 are calculated.

Keywords: Cyclone, model, forecasting, successfulness.

Tab. 3. Fig. 2. Ref. 19.

Evaluation of WRF physical parameterizations in simulating heavy rainfall events in southwestern Iran. Rusin I. N., Maddah M. A., Ahund-Ali A. M. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 191—204.

This study examines the impact of various Physical Schemes (PS) and their interactions on forecasts quality for daily heavy rainfall, adopting the Weather Research and Forecasting (WRF) model in southwestern Iran. To pursue this goal, 8 different combinations of PS for 6 selected dates (resulting in 48 total experiments) are considered. Using statistical indices, an evaluation is conducted of the performance and skill of each combination in each of the triply determined nested domains for different rainfall thresholds. As the result, the domain with 5-km spatial resolution (i.e. the first nested domain) is shown as the domain having least errors. Also the combination WRF5 gives better accuracy than other combinations for moderate and heavy rainfalls although the WRF model underpredicted values in this thresholds.

Keywords: WRF model, rainfall modeling, parametrization, forecast quality, southwestern Iran.

Tab. 4. Fig. 4. Ref. 25

On the method of monitoring data on the radiation balance components received on the Roshydromet network under the registration program. Lutsko L. V., Makhotkin A. N., Erokhina A. E., Bychkova A. P. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 205—233.

The method of monitoring monthly, daily and hourly amounts of the radiation balance and its components which is used to check the monthly data sets entering the MGO from the actinometric network. The description of the specialized control program (PO-K) which represents a monthly array of verifiable data in convenient formats for monitoring is presented.

Keywords: solar radiation, radiation balance components.

Tab. 4. Fig. 10. Ref. 14.

Using of the method of D. N. Lavrishchev for forecasting of radiation fogs at the airdrome of Ust Kamenogorsk. Volobueva O. V., Kok I. V., Novikova N. A. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 234—250.

Results of the calculations and quality evaluations for the forecasting of radiation fogs using the method of D.N Lavrishchev with usage of successfulness criterions at the airdrome of Ust Kamenogorsk for period of 2012-2016 are represented. Characteristic meteorological conditions for the radiation fogs formation of the examined territory are defined and the influence of local specifics over the fogs formation possibility was studied.

Keywords: Radiation fogs, forecasting, successfulness, method.

Tab. 6. Fig. 2. Ref. 10.

On the possible role of clouds in climate change present. Morozova S.V. Proceedings of MGO. 2017. V. 586. P. 251—260.

The article discusses the connection cloud - the temperature on the background of periods of climatic variability – the first wave of global warming, stabilization, the second wave of global warming. Examines the average annual amount of total cloud and total day and total night clouds separately. It is found that when a constant number of the long-term average octant total cloud cover (6.2 points), increasing the number of night cloudiness and reduced the number of day and night cloud is growing faster than daytime crashes. Formulated climatically meaningful conclusion about the role of daytime and nighttime cloudiness in the radiation-thermal regime, which makes the cloud a natural regulator of climate processes.

Key words: climate change, cloud mode, feedback cloud - temperature.

Fig. 3. Ref. 15.

**Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 586**

Подписано в печать 15.11.17. Формат 60х84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 17,25. Тираж 300 экз. Заказ №5656.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ». 195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28.