

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

607

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

Санкт-Петербург
2022

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>

Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова — научный рецензируемый журнал, публикующий результаты теоретических и экспериментальных исследований по актуальным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

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

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 по специальностям: 1.6.18 – науки о Земле и климате.

Полное библиографическое описание всех статей журнала представлено в Научной электронной библиотеке eLibrary.ru с целью формирования Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Электронные версии журнала доступны на сайте Научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru> и в разделе «Труды ГГО им. А.И.Воейкова» на сайте ГГО <http://voikovmgo.ru>. Публикация в журнале бесплатная.

РЕДАКТОРЫ:

Катцов В.М., д-р физ.-мат. наук;

Мелешко В.П., д-р физ.-мат. наук, заслуженный деятель науки РФ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Е. М. Акентьева, канд. геогр. наук, С. Ю. Гаврилова, канд. геогр. наук,

Е. Л. Генихович, д-р физ.-мат. наук, А. С. Грицун, д-р физ.-мат. наук,

С. К. Гулев чл. корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, А. С. Зайцев, канд. физ.-мат. наук,

В. И. Кириллова, канд. геогр. наук, А. А. Киселев, канд. физ.-мат. наук,

Е. Л. Махоткина, канд. геогр. наук, секретарь редколлегии,

В. Н. Морозов, д-р физ.-мат. наук, Т. В. Павлова, канд. физ.-мат. наук,

Г. Б. Пигольцина, д-р геогр. наук, Е. В. Розанов, канд. физ.-мат. наук,

А. А. Сенькевич, д-р техн. наук, И. В. Смирнова, канд. геогр. наук,

А. П. Соколов, канд. физ.-мат. наук, П. В. Спорышев, канд. физ.-мат. наук,

И. А. Тарабукин, канд. физ.-мат. наук, Е. И. Хлебникова, канд. физ.-мат. наук,

С. С. Чичерин, канд. физ.-мат. наук, И. М. Школьник, канд. физ.-мат. наук.

ISSN 0376-1274

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова»
2022

Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory is a peer-reviewed scientific journal publishing the results of theoretical and experimental research on current issues of climate change and weather forecasting, atmospheric diffusion and atmospheric monitoring, climatology, remote sensing of the atmosphere.

The journal is intended for a wide range of scientists and engineers interested in the results of modern research in the field of meteorology and applied geophysics and their practical application.

The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results of dissertations for Ph. D. (the scientific degree of candidate and doctor of science) on Earth and climate sciences should be published.

A complete bibliographic description of all articles in the journal is presented in the Scientific Electronic Library elibrary.ru with the aim of forming the Russian Science Citation Index (RSCI).

Electronic versions of publications are available on the website of the Scientific Electronic Library <http://elibrary.ru> and in the section "Proceedings of the Voeikov MGO" on the MGO website <http://voeikovmgo.ru>. Publication in the journal is free.

EDITORS:

Dr. V. M. Kattsov;

Dr. V. P. Meleshko, Honored Scientist of the Russian Federation.

Editorial board

Dr. E. M. Akentyeva, Dr. S. Yu. Gavrilova, Dr. E. L. Genihovich, Dr. A. S. Gritsun, Dr. S. K. Gulev, Dr. A. S. Zaitsev, Dr. V. I. Kirillova, Dr. A. A. Kiselev, Dr. E. L. Makhotkina (Editorial board secretary), Dr. V. N. Morozov, Dr. T. V. Pavlova, Dr. G. B. Pigoltsina, Dr. E. V. Rozanov, Dr. A. A. Sinkevich, Dr. I. V. Smirnova, Dr. A. P. Sokolov, Dr. P. V. Sporyshev, I. A. Tarabukin, Dr. E.I. Khlebnikova, Dr. S. S. Chicherin, Dr. I. M. Shkolnik.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>В. М. Катцов.</i> Климатическая наука для принятия решений.	6
<i>А. А. Киселев.</i> Мониторинг современной климатической системы Земли: данные и тренды.	40
<i>Е. И. Хлебникова, В. А. Задворных, В. В. Стадник.</i> Климатические изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности и облачности по данным актинометрических наблюдений на территории России.	79
<i>А. Н. Махоткин, Е. Л. Махоткина.</i> Предварительные результаты прямых измерений длинноволновой радиации на станциях Росгидромета.	94
<i>В. Н. Морозов.</i> Стационарная модель токовой цепи с учетом аэрозольной составляющей атмосферы и облаков.	110
<i>В. А. Шаповалов, М. Ч. Залиханов, М. А. Шериева.</i> Некоторые результаты численного моделирования образования ливневых осадков из конвективного облака.	136
<i>Л. Т. Созаева, М. Ч. Залиханов, М. А. Шериева.</i> Роль теплового импульса в эволюции конвективных облаков.	147
 <i>Памятные даты</i>	
К 150-летию создания службы погоды в Главной физической (геофизической) обсерватории.	155
Владимир Данилович Степаненко (к 100-летию со дня рождения).	166

CONTENTS

<i>Kattsov V. M.</i> Climate science for taking decisions.	6
<i>Kiselev A. A.</i> Monitoring the Earth's modern climate system: data and trends.	40
<i>Khlebnikova E. I., Zadvornyykh V. A., Stadnik V. V.</i> Climatic changes in the main components of the radiation balance of the Earth's surface and clouds on the data of actinometric observations in Russia.	79
<i>Makhotkin A. N., Makhotkina E. L.</i> Preliminary results of direct measurements of long-wave radiation at Roshydromet stations.	94
<i>Morozov V. N.</i> Stationary current circuit model taking into account the aerosol component of the atmosphere and clouds. ...	110
<i>Shapovalov V. A., Zalikhanov M. Ch., Sherieva M. A.</i> Some results of numerical simulation of heavy rainfall formation from a convective cloud.	136
<i>Sozaeva L. T., Zalikhanov M. Ch., Sherieva M. A.</i> The role of the thermal impulse in the evolution of convective clouds.	147
 <i>Memorial Dates</i>	
To the 150th anniversary of the creation of the weather service at the Main Physical (Geophysical) Observatory.	155
Vladimir Danilovich Stepanenko (on the 100th anniversary of his birth).	166

УДК 551.583:323

КЛИМАТИЧЕСКАЯ НАУКА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В. М. Катцов

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, 7, Karbyshev str.

E-mail: director@voeikovmgo.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022
Поступила после доработки 30.07.2022

Введение

Изменения климата и ухудшение состояния природной среды относятся к крупнейшим вызовам для любого государства, бизнеса и общества. Вопросы изменений климата и экологического регулирования стали одним из главных элементов международных отношений. Основой национальных действий в ответ на климатические вызовы является научное и информационно-аналитическое (базирующееся на данных мониторинга и моделирования земной системы) обеспечение планирования и мониторинга эффективности мер адаптации к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климат и окружающую среду (т. н. «митигации»), что в свою очередь в значительной степени определяет стратегии отраслевого и регионального развития страны, включая инвестиционную политику в различных сферах.

Сегодня мировые системы климатического мониторинга, функционируют и развиваются под эгидой международных организаций, таких как Всемирная метеорологическая организация (ВМО) и Межправительственная океанографическая комиссия (МОК)

ЮНЕСКО. В рамках Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК), Глобальной системы наблюдений океана (ГСНО), Глобальной службы атмосферы (ГСА), Глобальной службы криосферы (ГСК) и других программ осуществляется широкий спектр наблюдений. Помимо собственно наблюдений, отдельными странами или группами стран применяются высокотехнологичные системы моделирования, позволяющие усваивать данные наблюдений и формировать в оперативном режиме глобальные ретроспективные анализы (реанализы) климатических характеристик атмосферы и океана, позволяющие в определенной мере восполнять отсутствующие данные наблюдений и таким образом составляющие основу для системы мониторинга климатических изменений.

В течение последних десятилетий наблюдается отставание Российской Федерации от ведущих стран мира в области высокотехнологичных мониторинга и моделирования, а также основанных на использовании соответствующего отечественного инструментария научных исследований окружающей среды и климатических изменений — как глобальных, так и на территории нашей страны (см. например, Росгидромет, 2011). Недостаток научно обоснованных данных о текущем и ожидаемом состоянии земной системы не позволяет Российской Федерации не только надлежащим образом осуществлять управление экологическими и климатическими рисками на своей территории, но и эффективно отстаивать национальные социально-экономические интересы на международном уровне.

Российская составляющая глобальных систем климатического мониторинга представлена Государственной наблюдательной сетью (ГНС), управляемой Росгидрометом, а также системой экспедиционного мониторинга климатически значимых процессов в Мировом океане и морях, осуществляемого учреждениями РАН и Росгидромета. Важнейшими компонентами системы наблюдений за климатическими изменениями в составе ГНС являются наблюдательные сети: метеорологическая, аэрологическая, гидрологическая, морская, сети мониторинга химического состава и соответствующих характеристик атмосферы в рамках ГСА ВМО

(см., например, Хлебникова и др., 2020). При этом уровень развития наземных наблюдений за криолитозоной (прежде всего, многолетней мерзлотой), отдельными климатически значимыми компонентами состава атмосферы (например, за так называемыми короткоживущими климатически активными веществами — черным углеродом и др.), некоторыми другими климатическими характеристиками и индикаторами изменения климата в настоящее время не достигает минимально необходимого.

Что касается вышеупомянутых реанализов, которые, по сути, венчают собой усилия по мониторингу, в мире существует значительное число атмосферных и океанских глобальных реанализов, предоставляющих многочисленные параметры с довольно высоким пространственным разрешением за периоды от нескольких до многих десятков лет (см., например, Киселев, 2022).

В России, не в последнюю очередь из-за острого дефицита вычислительных ресурсов, на сегодняшний день реализованы лишь отдельные попытки создания региональных реанализов, таких как высокоразрешающий анализ океана и атмосферы в Северной Атлантике, созданный в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) (Gavrikov et al., 2020).

Мониторинг потоков парниковых газов (ПГ) в России осуществляется лишь на нескольких площадках, где ведутся нерегулярные наблюдения различной продолжительности и временного разрешения. По плотности этой сети территория России в настоящее время выглядит как пустыня в сравнении с Европой, Китаем или Северной Америкой.

Мониторинг потоков ПГ в Мировом океане (крупнейшем поглотителе двуокси углерода), прибрежных областях и морях России характеризуется нерегулярными наблюдениями и отсутствием систематических подходов к их консолидации для получения интегральных оценок. Все это не позволяет получать достоверные интегральные оценки эмиссии и поглощения ПГ природными экосистемами. В настоящее время для решения этой проблемы на территории России организуется пилотная сеть полигонов мониторинга потоков ПГ, поддерживаемая несколькими ведущими

университетами и институтами и координируемая ИО РАН. Ее создание обеспечит основу для разработки и валидации национальной системы мониторинга ПГ.

Критически важной для формирования национальной и глобальной климатической повестки являются количественные оценки будущих изменений земной системы. Сегодня в мире существует большое число глобальных моделей земной системы, описывающих, помимо физических, происходящие в ней химические и биологические процессы. В крупнейший международный Проект сравнения объединенных моделей (CMIP, Eyring et al., 2016), являющийся ключевым источником результатов моделирования климата, на регулярной основе оцениваемых Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), входит лишь одна российская модель, разработанная в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (ИВМ РАН) (Volodin et al., 2017). Эта модель из-за ограниченного пространственного разрешения не относится в настоящее время к числу признанных лидеров качества.

В России существуют и другие глобальные модели климатической системы (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ГГО), Гидрометцентр России (ГМЦ)), которые до настоящего времени использовались лишь в сезонном прогнозировании. Участием их в международных проектах сравнения препятствует критическая нехватка суперкомпьютерных и кадровых ресурсов, необходимых для проведения большого объема численных экспериментов по протоколам этих проектов.

В России также существуют модели отдельных компонентов земной системы: атмосферы (ГГО, ГМЦ), океана (ИО РАН, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (ГОИН)), гидрологии суши (Институт водных проблем РАН (ИВП РАН)) и др., а также т.н. модели промежуточной сложности с упрощенными представлениями компонентов климатической системы (Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (ИФА РАН)). Перечисленные довольно скромные по мировым меркам национальные достижения в области моделирования климатической

системы можно рассматривать как основу для развития национальной модели, ориентированной на исследования и прогнозирование глобальной земной системы.

В мире активно развивается основанная на численном моделировании «регионализация» (пространственная детализация) глобальных сценарных прогнозов с целью их практического использования при разработке адаптационных стратегий. Сценарное прогнозирование климатических изменений, включая оценку климатических рисков, требует проведения массовых ансамблевых расчетов и высокого пространственного разрешения. На протяжении последних лет ГГО активно развивает и использует систему вероятностного сценарного прогнозирования региональных изменений климата, центральным компонентом которой является региональная климатическая модель атмосферы (Катцов и др., 2020). Эта разработка является существенным заделом для создания высокоразрешающей системы региональных исследований климата и окружающей среды и сценарного прогнозирования погодноклиматических воздействий, пригодной к практическому применению при создании отраслевых и региональных адаптационных стратегий.

Проблемы адаптации, как и проблемы смягчения антропогенного воздействия на климат, являются полем взаимодействия естественных и гуманитарных наук (Данилов-Данильян и др., 2020). Так, в мире в настоящее время насчитывается около двух десятков макроэкономических моделей, которые оперируют переменными состояния мирового хозяйства в целом, его ключевых секторов и экономики крупнейших мировых регионов, а также активно развиваются эконометрические модели для разработки сценариев социально-экономического развития мирового хозяйства, конкретных государств (и их групп), компаний и секторов экономики. Эти модели позволяют оценивать воздействие климатических и экологических факторов на состояние как социальных и хозяйственных систем, так и на социально-экономическую политику государств, корпоративную политику бизнеса и поведение домохозяйств. В России разработки на основе собственных эконометрических моделей проводятся несколькими центрами, в частности Институтом

народнохозяйственного прогнозирования (ИНП РАН), развивающим анализ влияния реализации адаптационных и «митигационных» решений на устойчивое социально-экономическое развитие страны (Порфирьев и др., 2022).

Если говорить, например, о планировании упреждающей адаптации к изменениям климата в отраслевом и в региональном разрезах, Россия находится лишь в самом начале долгого и многотрудного пути, на котором стране потребуется большая информационно-аналитическая и научная поддержка, обеспечиваемая, в числе прочего, соответствующими мировому уровню высокотехнологичными инструментами мониторинга, моделирования и анализа состояния земной системы — глобально, на территории России, а также в других регионах мира, представляющих для России интерес в экономическом, политическом или ином аспекте климатической проблематики.

**Федеральная научно-техническая программа (ФНТП) —
Важнейший инновационный проект государственного значения
(ВИПГЗ)**

Существующее положение потребовало усиления государственного управления наиболее актуальными разработками и исследованиями в области климата, экологии и в смежных областях — в форме скоординированной на национальном уровне научно-технической программы. Для этого начиная с 2021 г. Российская Федерация предприняла ряд решительных шагов в направлении улучшения сложившейся ситуации.

Во исполнение Указа Президента Российской Федерации «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений» (от 8 февраля 2021 г. № 76)¹ Правительство Российской Федерации утвердило Федеральную научно-техническую программу в области экологического развития

¹ <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102080007>

Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 гг. (постановление Правительства Российской Федерации от 8 февраля 2022 г. № 133)² (далее – ФНТП).

Целью ФНТП является повышение эффективности научно-технической деятельности в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений.

Задачи программы предусматривают создание наукоемких технологий, направленных на:

- обеспечение экологической безопасности и улучшение состояния окружающей среды;
- изучение климата, механизмов адаптации к климатическим изменениям и их последствиям;
- обеспечение устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов ПГ на основе исследований источников и поглотителей ПГ и принятия мер по уменьшению негативного воздействия таких газов на окружающую среду.

Одним из ключевых направлений ФНТП должно стать развитие систем мониторинга и прогнозирования окружающей среды. Целевой функцией науки в рамках ФНТП является обеспечение получения на основе мониторинга и физико-математического моделирования и прогнозирования достоверных данных об окружающей среде и происходящих в ней климатических изменениях, включая как эмиссию и сток ПГ, так и индикаторы климатических и экологических параметров. Без прорывного развития отечественной науки в соответствующих направлениях невозможна разработка эффективных отраслевых технологий и инфраструктурных решений, направленных на адаптацию к климатическим изменениям и их смягчение.

В связи с этим реализация ФНТП должна способствовать ответу нашей страны на следующие вызовы:

- отставание от мирового уровня в части наукоемких технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей

² <http://static.government.ru/media/files/Ekv7TcPAJBv4n3oUn6ofUdAR5cu5W1PM.pdf>

среды и климата, основанных на современных наблюдательных системах и моделировании;

- недостаточность и (или) неадекватность мер адаптации к нарастающим изменениям климата при в целом высоком адаптационном потенциале Российской Федерации;

- недостаточное использование значительного потенциала внедрения низкоуглеродных, а также экологически чистых технологий в экономике Российской Федерации;

- недостаточная эффективность мер по защите российских товаропроизводителей от возможных недобросовестных действий зарубежных партнеров под предлогом несоответствия требованиям климатической безопасности;

- недостаточное внимание к стратегиям адаптации разных социальных групп к изменениям природной среды и климата в регионах Российской Федерации.

Цель ФНТП должна быть достигнута за счет выполнения ряда мероприятий. Одно из таких мероприятий предусматривает создание и развитие инфраструктуры для проведения исследований и разработок, в том числе создание и развитие научных и научно-образовательных центров, другое — проведение научных исследований и разработок преимущественно на базе таких центров.

В дополнение к ФНТП Президентом Российской Федерации было дано поручение (от 2 мая 2021 г. № Пр-753) на разработку Важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание и развитие «Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ» (далее – ВИПГЗ). Концепция ВИПГЗ была представлена и одобрена на заседании Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию 8 февраля 2022 г. Разработанный вслед за этим ВИПГЗ вместе с планом реализации его первого этапа (2022–2024 гг.) был утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации (от 29 октября 2022 г. № 3240-р)³.

³ <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211010041>

ВИПГЗ ориентирован в первую очередь (но не исключительно) на получение достоверных данных о климатически активных веществах (ПГ, аэрозолях), прежде всего на территории России, и предусматривает правовую регламентацию использования этих данных для регулирования антропогенных выбросов и проведения соответствующей трансформации отраслей экономики.

ВИПГЗ синергичен ФНТП), а их участники объединены в шесть консорциумов в форме научных и научно-образовательных центров, в каждом из которых выделяется головная организация:

1. Центр моделирования и прогнозирования глобального климата «ЗЕМНАЯ СИСТЕМА: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ». Головная организация — Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН. Функциональный заказчик — Росгидромет.

2. Центр климатического и экологического мониторинга океана и морей России «ОКЕАН: МОНИТОРИНГ И АДАПТАЦИЯ». Головная организация — Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Функциональный заказчик — Росгидромет.

3. Центр климатического и экологического мониторинга суши и адаптации к абиотическим факторам климатических изменений «СУША: МОНИТОРИНГ И АДАПТАЦИЯ». Головная организация — Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. Функциональный заказчик — Росгидромет.

4. Центр мониторинга климатически активных веществ «УГЛЕРОД В ЭКОСИСТЕМАХ». Головная организация — Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. Функциональный заказчик — Росгидромет.

5. Центр экономико-социальных проблем адаптации и смягчения антропогенного воздействия на климат «ЭКОНОМИКА КЛИМАТА». Головная организация — Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. Функциональный заказчик — Минэкономразвития России.

6. Центр обеспечения Национального кадастра антропогенных выбросов «АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ: КАДАСТР». Головная организация — Институт глобального климата и экологии

им. академика Ю. А. Израэля. Функциональный заказчик — Минэкономразвития России.

Цели и задачи консорциумов ФНТП-ВИПГЗ

Для каждого из консорциумов определена цель (миссия), достижение которой обеспечивается решением ряда задач.

1. Земная система: моделирование и прогноз

Миссия. Разработать глобальную модель земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений, обеспечить повышение точности климатических моделей и надежности климатических прогнозов.

Задача 1. Количественная оценка чувствительности земной системы к внешним воздействиям.

Задача 2. Количественная оценка современного состояния и будущих изменений естественных источников и стоков атмосферных ПГ.

2. Океан: мониторинг и адаптация

Миссия. Разработать систему климатического и экологического мониторинга ключевых районов Мирового океана и морей России и региональных модельных систем, обеспечить формирование ретроспективных анализов акваторий субполярной Северной Атлантики, северо-западной части Тихого океана и морей России.

Задача 1. Разработка системы климатического и экологического мониторинга ключевых районов Мирового океана и морей России.

Задача 2. Разработка систем регионального моделирования.

Задача 3. Обеспечение формирования реанализов для акваторий субполярной Северной Атлантики, северо-западной части Тихого океана и морей России.

3. Суша: мониторинг и адаптация

Миссия. Расширить систему климатического и экологического мониторинга и прогнозирования на территории Российской Федерации в целях обеспечения адаптационных решений в отраслевом и региональном разрезах, включая борьбу с опустыниванием.

Задача 1. Создание государственной системы (фонового) мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМСММ) на территории России.

Задача 2. Разработка адаптивной системы гидрологического мониторинга (АСГМ).

Задача 3. Разработка второй очереди Генеральной схемы действий по борьбе с опустыниванием (ДБО).

Задача 4. Создание системы интегрированного городского климатического обслуживания (СИГОКО).

Задача 5. Создание высокоразрешающей многоцелевой системы моделирования и прогнозирования регионального климата (МСМПК).

4. Углерод в экосистемах: мониторинг

Миссия. Разработать систему наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков ПГ на территории Российской Федерации, обеспечить создание системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах.

Задача 1. Уточнение существующих и получение новых данных, необходимых для оценки поглощения ПГ управляемыми и неуправляемыми наземными экосистемами.

Задача 2. Оценка потенциала поглощения ПГ управляемыми лесами с учетом развития лесного хозяйства.

Задача 3. Оценка мер смягчения последствий изменения климата в сельском хозяйстве с учетом развития отрасли.

5. Экономика климата

Миссия. Оценить социально-экономические последствия реализации климатических повесток, включая адаптацию к изменению климата и низкоуглеродное развитие — на международном уровне и в Российской Федерации.

Задача 1. Разработка методов и моделей для создания системы оценки осуществимости и эффективности мер, направленных на смягчение антропогенного воздействия на окружающую среду и климат.

Задача 2. Разработка научно обоснованных технологических решений, содействующих созданию системы оценки рисков для окружающей среды и климата на территории России и прилегающих акваторий с целью обоснования и принятия необходимых мер адаптации к изменению климата с учетом региональной и отраслевой специфики, а также подтверждения эффективности их применения.

6. Антропогенные выбросы: кадастр

Миссия. Осуществить техническое перевооружение, цифровизацию и актуализацию Национального кадастра ПГ, обеспечить совершенствование сбора исходных данных.

Задача 1. Внедрение части новых и уточненных существующих коэффициентов и параметров оценки выбросов ПГ для уточнения данных Национального кадастра, в том числе с учетом данных мониторинга пулов углерода и потоков ПГ.

Задача 2. Проведение цифровизации Национального кадастра.

Задача 3. Создание системы расчетного мониторинга и оценки выбросов отдельных климатически активных веществ, в частности, мелкодисперсных твердых частиц, содержащих углерод («черный углерод»), на территории Российской Федерации.

Предельно обобщая задачи, стоящие перед консорциумами ФНТП-ВИПГЗ, можно свести их к получению ответов на следующие вопросы:

1. Что происходит с земной системой? (все консорциумы, кроме 5).
2. Почему это происходит? (консорциум 1, отчасти — 2 и 3).
3. Что нас ожидает? (консорциумы 1 и 3).
4. Что нужно (и можно) с этим делать? (консорциум 5).

В своей естественно-научной части ФНТП-ВИПГЗ направлены на такие ключевые для экономики (с точки зрения возможных «митигационных» и адаптационных мер, а также международного переговорного процесса) фундаментальные проблемы, как чувствительность климатической системы к внешним воздействиям, количественные оценки естественных источников и стоков климатически активных веществ в настоящем и будущем, сценарный прогноз климата (включая экстремальность) для практических приложений и ряд других.

Поле деятельности консорциумов охватывает все компоненты земной системы (главным образом, на территории России и прилегающих акваториях) и ее взаимодействия с человеком: смягчение воздействия антропогенного фактора на окружающую среду и климат, а также адаптацию к воздействиям окружающей среды, включая изменения климата, на человека и его деятельность (рис. 1).

Задачи, стоящие перед консорциумами ФНТП-ВИПГЗ, взаимосвязаны. Мониторинг⁴ обеспечивает формирование ключевой информационной основы для выработки, реализации и оценки результативности климатической политики Российской Федерации, в частности, в отношении целей и путей, пределов и механизмов

⁴ В отличие от обычного наблюдения, мониторинг имеет отчетливую целевую установку — наблюдение с целью контроля изменения состояния объекта и оценки отклонения его от нормы (по аналогии с мониторингом соблюдения законодательства). Климатический мониторинг устанавливает особые требования к наблюдениям за климатом — «слежение» с обеспечением определенного уровня качества, полноты и репрезентативности данных.

адаптации к изменениям климата, являющейся главной задачей климатического обслуживания⁵ (см., например, Катцов, 2015).

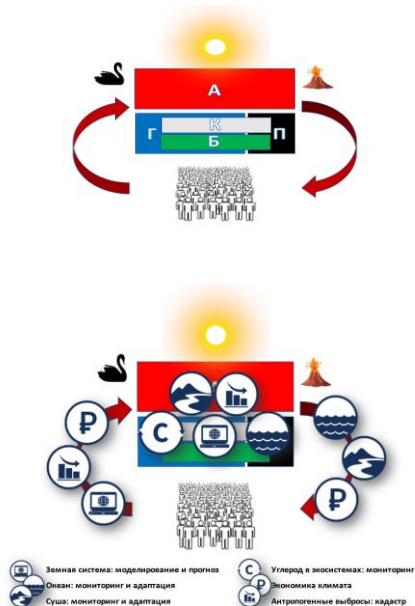


Рис. 1. Земная система как ландшафт ФНТП-ВИПГЗ (вверху) и поле деятельности консорциумов (внизу).

На верхней панели буквами обозначены, соответственно: «А» — атмосфера, «Г» — гидросфера, «К» — криосфера, «Б» — биосфера, «П» — педосфера.

Солнце и вулкан обозначают естественные внешние воздействия на земную систему, а «черный лебедь» — все остальные естественные внешние воздействия, которые обычно не учитываются в сценарных прогнозах изменения климата⁶. Пиктограмма «люди» обозначает антропогенный фактор изменения климата (антропогенное воздействие на окружающую среду). Пиктограммы, соответствующие шести консорциумам, обозначают место (места) последних в ландшафте ФНТП-ВИПГЗ

⁵ Под климатическим обслуживанием следует понимать создание информационной климатической продукции и предоставление ее потребителю с использованием тех или иных средств коммуникации и презентации.

⁶ «Черный лебедь» — символ, определяющий неожиданные события (воздействия), имеющие значительные последствия и рационалистические объяснения после наступления.

Кроме того, мониторинг служит источником данных для оценки качества физико-математических моделей, которые необходимы для сценарного прогнозирования изменений климата, а сценарные прогнозы в свою очередь «подсказывают» направления развития мониторинга, в частности адаптации ГНС к происходящим и ожидаемым изменениям.

Создание компьютерных физико-математических моделей, имитирующих земную систему и позволяющих на основе законов физики прогнозировать погоду и эволюцию климата, является одним из знаковых достижений мировой науки за последние полвека. На сегодняшний день модели земной системы достигли поистине впечатляющего уровня сложности и полноты в описании огромного разнообразия процессов и обратных связей, присущих климатической системе (см., напр., Slings et al., 2021).

Сценарные климатические прогнозы — как глобальные, так и для регионов России — способствуют принятию решений по широкому спектру экономических, социальных и других вызовов, связанных с изменением климата: они позволяют, в частности, определить важнейшие потребности в упреждающей адаптации⁷ к возможным в будущем изменениям климата. Эффективность и независимость климатической политики страны, в том числе на «внешнем контуре», напрямую зависят от наличия собственных прогностических технологий мирового уровня, а также высококвалифицированных специалистов и соответствующей инфраструктуры, обеспечивающих реализацию и развитие этих технологий.

Выведение на мировой уровень отечественных систем сценарного прогнозирования (глобального и регионального) и обеспечение

⁷ Упреждающая адаптация является неотъемлемым элементом адаптации к относительно отдаленным изменениям климата. Например, уже сейчас при проектировании крупных гидротехнических сооружений, особенно в регионах многолетней мерзлоты или в регионах, подверженных риску катастрофических наводнений, должны учитываться (и уже учитываются) возможные изменения климатических параметров, от которых зависит резистентность таких сооружений в отношении опасных погодноклиматических явлений.

их развития и эксплуатации необходимыми вычислительными ресурсами — одно из ключевых условий эффективности и независимости национальной климатической политики.

Предполагается, что каждый из консорциумов на определенной стадии своего развития (некоторые — изначально) включается во взаимодействие с другими, обеспечивая тем самым построение к 2030 г. целостной системы информационно-аналитического и научного обеспечения внутренней и внешней политики Российской Федерации в области климата.

Консорциум «Суша: мониторинг и адаптация»

ГГО назначена головной организацией для консорциума «Суша: мониторинг и адаптация», причем число задач, которые стоят перед консорциумом, больше, чем у других консорциумов. В значительной мере эти задачи ориентированы на ГНС и отвечают приоритетам климатического обслуживания в условиях меняющегося климата, сформулированным в Третьем оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Росгидромет, 2022; см. Катцов, 2022).

Какими же вызовами, связанными с изменением климата, обусловлены задачи консорциума «Суша: мониторинг и адаптация»? Прежде всего, это уникальное разнообразие климатических условий и климатических воздействий на огромной территории России, что является одновременно и вызовом (объективные проблемы мониторинга, особенности моделирования и прогнозирования для регионов страны), и адаптационным преимуществом перед другими странами.

Во-вторых, это связанная с указанным разнообразием потребность в развитии ряда компонентов мониторинга, включая математические модели и информационные технологии поддержки принятия решений, обеспечивающих адаптационные мероприятия (управление экологическими и климатическими рисками — УЭКР) в условиях меняющегося климата, в том числе в отношении национальных водных и сельскохозяйственных ресурсов, а также городских

агломераций (вода, продовольствие, здоровье населения — ключевые факторы устойчивого развития и конкурентоспособности России).

Следует отдельно упомянуть потребность в создании системы фонового⁸ мониторинга многолетней мерзлоты на территории России, поскольку изменения мерзлоты имеют критическое значение для инфраструктуры отраслей экономики, развития моделей, оценки потоков ПГ и др. Кроме того, в контексте ФНТП-ВИПГЗ очень важна количественная оценка фактического и ожидаемого вклада деградирующей мерзлоты как естественного источника ПГ в глобальный углеродный цикл.

Наконец, это потребность в выведении на мировой уровень национальной многоцелевой системы сценарного прогнозирования регионального климата с высоким разрешением для информационно-аналитического обеспечения управления экологическими и климатическими рисками на территории России и прилегающих территориях и акваториях.

Помимо ГГО, в консорциум «Суша: мониторинг и адаптация» на первом этапе реализации ФНТП-ВИПГЗ вошли Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) Росгидромета, Государственный гидрологический институт (ГГИ) Росгидромета, Институт водных проблем (ИВП) РАН, Карельский научный центр (КарНЦ) РАН и Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения (ФНЦА) РАН.

Задача 1. МЕРЗЛОТА: Создание государственной системы (фонового) мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМСММ) на территории России

На обширных пространствах криолитозоны Российской Федерации, которая, как известно, распространяется на 2/3 территории страны, многолетняя мерзлота реагирует

⁸ Следует различать фоновый мониторинг состояния мерзлоты (в местах отсутствия прямого влияния хозяйственной деятельности на мерзлоту) и геотехнический мониторинг (в местах прямого воздействия на мерзлоту зданий, сооружений и других объектов инфраструктуры).

на межгодовые колебания и многолетние изменения климата, увеличивая риски техногенных катастроф, а также другие риски (например, санитарно-эпидемиологические, связанные с оттаиванием находящихся в мерзлоте могильников). Мерзлота определяет водный и температурный режим почвы, поэтому мониторинг многолетней мерзлоты имеет ключевое значение для повышения точности гидрологических и агрометеорологических прогнозов. Рост содержания в атмосфере ПГ также диктует необходимость организации фоновго мониторинга мерзлоты, так как при ее деградации (оттаивании) в круговорот климатически активных веществ могут включаться значительные запасы законсервированной органики, разложение которой должно приводить к выделению в атмосферу углекислого газа и метана.

На сегодняшний день на территории Российской Федерации отсутствует государственная система инструментального фоновго мониторинга состояния многолетней мерзлоты. Текущие наблюдения в рамках отдельных отечественных и международных программ и проектов обладают рядом серьезных недостатков:

- значительные территории не охвачены мониторингом;
- расположение пунктов наблюдений не обеспечивает репрезентативность мониторинга в масштабе страны;
- отсутствуют унификация методов, объектов, измеряемых характеристик, приборной базы мониторинга;
- часто отсутствуют ряды сопряженных метеорологических данных;
- отсутствует единый центр сбора, анализа и распространения данных мониторинга.

Сказанное делает приоритетной задачу безотлагательной организации общегосударственного фоновго мониторинга состояния многолетней мерзлоты.

ААНИИ разработана концепция создания государственной системы мониторинга (фоновго) состояния многолетней мерзлоты (ГСМСММ) на основе ГНС. Ее базовым элементом должна стать распределенная по территории криолитозоны Российской Федерации сеть из 140 пунктов мониторинга многолетней мерзлоты,

сопряженных с наблюдательными подразделениями Росгидромета, где будут выполняться непрерывные послойные автоматические измерения температуры многолетней мерзлоты в скважинах глубиной не менее 25 м. Дополнительно в 30 пунктах организованы наблюдения за динамикой сезонно-талого слоя. Выбор станций Росгидромета для организации вблизи них пунктов мониторинга мерзлоты (рис. 2) производится с использованием научно-методически обоснованных критериев, что обеспечивает репрезентативность наблюдательной сети. Организация пунктов мониторинга мерзлоты осуществляется в соответствии с отечественными нормативными документами и основными требованиями международных программ TSP (*Thermal State of Permafrost* — термическое состояние мерзлоты) и CALM (*Circumpolar Active-layer Monitoring* — циркумполярный мониторинг деятельного слоя). Первая и вторая очереди ГСМСММ (78 пунктов) вводятся в эксплуатацию в 2023–2024 гг., а в 2025 г. планируется завершить организацию ГСМСММ, доведя число пунктов мониторинга до 140.

Данные с пунктов мониторинга будут поступать для обработки, архивации и анализа в Центр мониторинга состояния многолетней мерзлоты ААНИИ, информационная система которого будет передавать данные наблюдений в «Единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении», размещать их на информационном ресурсе ААНИИ для доступа к ним заинтересованных организаций, выполнять анализ и интерпретацию данных, производить и представлять продукцию ГСМСММ (обзоры, оценки, прогнозы, другую справочно-информационную документацию) в органы государственной власти.

Дальнейшее развитие ГСМСММ предусматривает как увеличение числа пунктов мониторинга, так и расширение спектра наблюдаемых характеристик состояния многолетней мерзлоты.

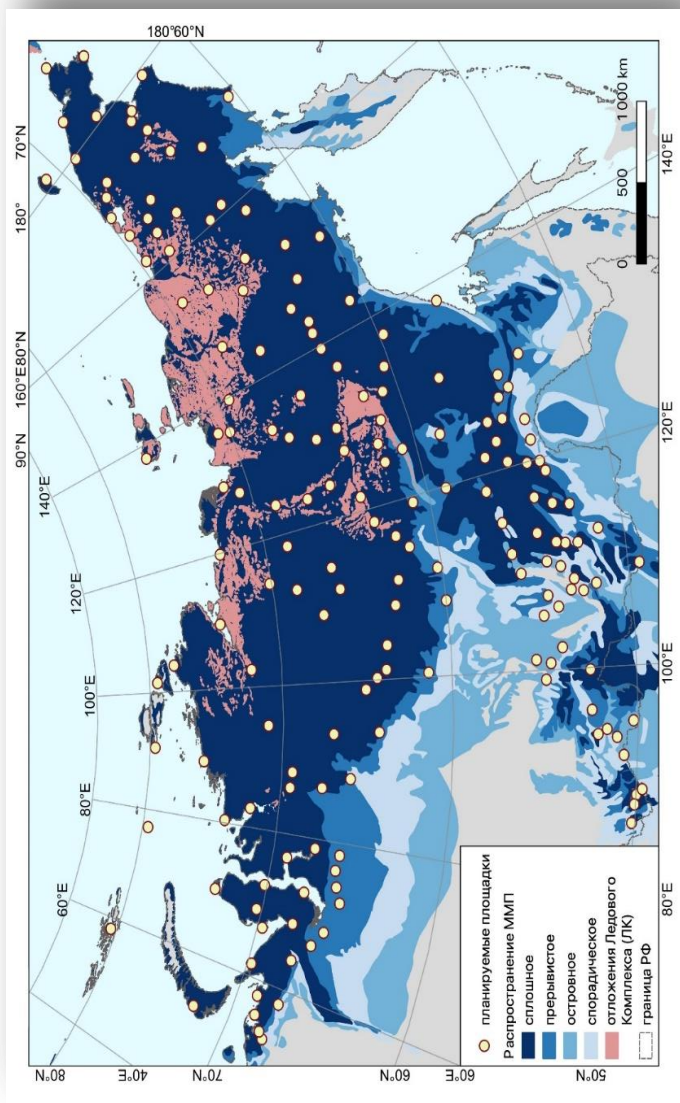


Рис. 2. Местоположение 180 станций ГНС Росгидромета, перспективных для размещения сопряженных пунктов наблюдения за состоянием многолетней мерзлоты на территории криолитозоны России

К 2030 г. ожидается полномасштабное функционирование Государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМСММ) во взаимодействии с ведомственными системами геотехнического мониторинга, а также получение на этой основе первых количественных оценок деградации мерзлоты на территории Российской Федерации, включая ее вклад в глобальный углеродный бюджет

Задача 2. ВОДА: Разработка адаптивной системы гидрологического мониторинга (АСГМ) и национальной гидрологической моделирующей системы (НГМС)

Климатические изменения приводят к обострению угроз водной безопасности, прежде всего водного дефицита и наводнений, на значительной части территории России. Уже сейчас в средние по водности и, тем более, маловодные годы водный дефицит наблюдается в районах осуществления интенсивной хозяйственной деятельности: в бассейнах Дона, Иртыша, рек Северного Кавказа, Урала, западного побережья Каспия. Вследствие изменения регионального климата растет экономический ущерб от наводнений и увеличивается их частота на Дальнем Востоке, Северном Кавказе, в Алтайском крае, в Байкальском регионе. Согласно прогнозам, при реализации наиболее неблагоприятных сценариев будущих климатических изменений обострение угроз водной безопасности продолжится.

Осуществление масштабных проектов по управлению водными ресурсами, защите населения и объектов экономики от наводнений, адаптации водного хозяйства страны и ее отдельных регионов к климатическим изменениям требует огромных капиталовложений и планируется на десятилетия вперед. Экономически эффективное и экологически безопасное водопользование в условиях современных вызовов обеспечивается средствами информационной поддержки принятия решений, включающими технологии гидрологического мониторинга, новые методы и модели анализа и прогноза изменений водного режима рек России. Деятельность коллективов ГГИ и ИВП

РАН в рамках консорциума «Суша: мониторинг и адаптация» направлена на решение этих актуальных задач.

Одно из важнейших направлений деятельности консорциума — развитие сети гидрологических наблюдений в регионах России, подверженных наибольшей опасности в условиях климатических изменений. Общее количество гидрологических постов Росгидромета — более 3 тысяч, однако по плотности эта сеть до сих пор уступает многим странам. Только четверть пунктов мониторинга оснащена автоматическими комплексами, а масштабная модернизация гидрологической сети еще предстоит, в том числе в рамках данного проекта.

К 2030 г. ОЖИДАЕТСЯ СОЗДАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА (АСГМ), ОСНАЩЕННОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ (НГМС) КАК ИНСТРУМЕНТА «РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, А ТАКЖЕ АДАПТАЦИИ ДЛЯ РЯДА ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ И РЕГИОНОВ К ПРОИСХОДЯЩИМ И ОЖИДАЕМЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА»

Задача 3. ОПУСТЫНИВАНИЕ: Разработка второй очереди Генеральной схемы действий по борьбе с опустыниванием (ДБО)

До недавнего времени особое внимание уделялось потенциальному плодородию почв и продовольственной безопасности, но в последние годы повышенный интерес вызывают также проблемы, связанные с деградацией земель, а именно: климатические изменения и адаптация к ним, сохранение биологического разнообразия, поддержание и воспроизводство плодородия почв, вопросы миграции и конфликтов, повторяемость и распространение чрезвычайных ситуаций и катастроф и др.

Изменение состояния земель засушливых и сухих регионов Российской Федерации, помимо прочего, связано с естественными климатическими флуктуациями и антропогенным воздействием на климат. По сравнению с 1990 г. площадь сельхозугодий России, подверженных эрозии и дефляции, увеличилась на 22 млн га и на данный момент составляет 126 млн га. Отсутствие комплексного

подхода к сохранению и восстановлению плодородия почв и продуктивности угодий, включающего меры предотвращения последствий засух и пыльных (песчаных) бурь, неконтролируемого антропогенного воздействия, неизбежно приведет к дальнейшему ухудшению ситуации. Поэтому необходимость изучения процессов, приводящих к деградации и опустыниванию, их динамики, прогноза и разработки технологий восстановления нарушенных земель является стратегической задачей науки по обеспечению продовольственной и экологической безопасности страны. Применение ГИС-технологий позволяет ускорить разработку соответствующих мер по уменьшению последствий негативного воздействия природных и антропогенных факторов на сельскохозяйственные угодья и повышению их продуктивности.

В течение первого этапа ФНТП-ВИПГЗ ожидается:

- введение в эксплуатацию геоинформационной системы «Опустынивание и его мониторинг», которая будет содержать фактические данные об опустыненных землях в регионах, динамику и прогноз их площади;
- оценка результатов проведенных ранее водных мелиораций, лесо- и фитомелиоративных работ (их площади, мелиоративной и экологической эффективности);
- анализ организационно-хозяйственных, законодательных, нормативных документов и институциональных решений, направленных на оптимизацию сельскохозяйственного производства при достижении нейтральности деградации;
- формирование перечня рекомендуемых комплексных взаимосвязанных технологических решений и технологий, используемых для восстановления деградированных земель в обозначенных регионах, с учетом степени деградации;
- разработка программ действий по борьбе с опустыниванием для 14 субъектов Российской Федерации: Республик Бурятия, Дагестан, Калмыкия, Татарстан, Тыва, Хакасия, Чечня, Алтайского края, юга Красноярского, Ставропольского краев, Астраханской, Волгоградской, Ростовской, Саратовской областей.

К 2030 г. ОЖИДАЕТСЯ РАЗРАБОТКА ВТОРОЙ ОЧЕРЕДИ ГЕНЕРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЕЙСТВИЙ ПО БОРЬБЕ С ОПУСТЫНИВАНИЕМ, КОТОРАЯ ОХВАТИТ 28 СУБЪЕКТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Задача 4. ГОРОДА: Создание системы интегрированного городского климатического обслуживания (СИГОКО)

По имеющимся оценкам (Vaklanov et al., 2020), 90 % природных бедствий на урбанизированных территориях имеют гидрометеорологическое происхождение (вероятно, они усугубляются при изменении климата): экстремальные жара и холод; экстремальный ветер; низкое качество воздуха и эпизоды пикового загрязнения; лесные пожары, песчаные и пылевые бури; городские наводнения.

ВМО признает, что стремительная урбанизация, особенно в контексте климатических изменений, требует развития новых видов обслуживания, которые наилучшим образом повысят устойчивость городов к опасности, связанной с влиянием окружающей среды, погоды, климата, экстремальных погодно-климатических явлений и воздействий.

Интегрированное городское обслуживание является приоритетом и кросс-тематическим элементом стратегии ВМО и включает следующие компоненты: системы раннего предупреждения о различных бедствиях; интегрированные городские системы информации о ПГ; климатические услуги; прогнозирование воздействия и предупреждение о риске (см. например, Vaklanov et al., 2018).

Компонентами интегрированного городского обслуживания являются:

- организация наблюдения и его анализа;
- моделирование, прогноз/сценарный прогноз и оценка риска;
- интерпретация и коммуникация;
- оценка и рекомендации по совершенствованию.

Задачей национальной системы интегрированного городского климатического обслуживания как инструмента адаптации является мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды с целью

управления экологическими и климатическими рисками и адаптации городской инфраструктуры, субъектов экономики и населения городов к изменению климата.

СИГОКО основывается на высокоразрешающем эколого-климатическом мониторинге в городских агломерациях, который позволит оперативно предоставлять фактическую и прогностическую информацию о состоянии и загрязнении окружающей среды, об опасных и неблагоприятных погодных явлениях, в том числе связанных с атмосферными осадками, по районам города и его близлежащих пригородов.

СИГОКО основана на следующих основных методологических принципах:

- информационная интеграция с государственными и международными системами мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды;
- соответствие деятельности задачам охраны здоровья населения, защиты окружающей среды и обеспечения экологической и гидрометеорологической безопасности;
- обеспечение непрерывности наблюдений за состоянием и загрязнением окружающей среды и достоверности получаемой информации;
- единство и сопоставимость методов наблюдений, сбора и обработки информации;
- эффективность использования информации о фактическом состоянии окружающей среды, ее загрязнении;
- своевременность предоставления информации о состоянии окружающей среды для принятия оперативных управленческих решений.

Городские особенности, в т. ч. морфология зданий и выбросы тепла, влияют на городской температурно-влажностный режим (например, формирование так называемых городских островов тепла), циркуляцию воздуха и изменяют образование и выпадение атмосферных осадков, другие атмосферные явления. Городская инфраструктура, являющаяся совокупностью дорожных, транспортных, финансовых, инженерных, социальных коммуникаций,

является особо уязвимой при экстремальных проявлениях окружающей среды, к которым относятся, например, наводнение, метель, сильный ливень, гололедица.

Данные наблюдений за атмосферными осадками высокого пространственного и временного разрешения востребованы и в смежных областях, например:

- наблюдения за загрязнением атмосферы: информацию о характере, виде и количестве выпавших атмосферных осадков используют для определения их химического состава и кислотности для дальнейшего применения в установлении общего уровня атмосферного загрязнения, выяснения его динамики, оценки переноса веществ в атмосфере, определения сезонной и суммарной нагрузки содержащихся в осадках химических соединений на подстилающую поверхность;

- радиолокационные наблюдения: калибровка информации об осадках метеорологических радиолокаторов осуществляется по данным осадкомеров;

- климатология: количество и суточный максимум атмосферных осадков используются в строительной климатологии при проектировании зданий и сооружений, систем отопления, вентиляции, кондиционирования, водоснабжения и ливневой канализации, при планировке и застройке городов и др.;

- региональные прогностические гидродинамические модели;

- гидрологические наблюдения: количество и интенсивность выпадения атмосферных осадков необходимы для прогноза уровней воды, стока, разработки методов расчетов и моделирования дождевых паводков и др.

На города приходится около 70 % антропогенных выбросов основных долгоживущих ПГ (Baklanov et al., 2020). Существующий подход по оценке выбросов с территории городов основывается на статистических данных об антропогенной деятельности, в результате которой ПГ выделяются в атмосферу или поглощаются. Такой подход сопряжен с большим количеством неопределенностей, которые практически невозможно учесть из-за отсутствия достоверной статистической информации. Создание подсистемы

СИГОКО «Климатически активные газы (КАГ)» ориентировано на разработку инструмента контроля эмиссии основных ПГ с территории города на основе данных натуральных (наземных) наблюдений (в рамках пилотного эксперимента в Санкт-Петербурге) с дальнейшим развертыванием в других регионах России. На основе результатов пилотного эксперимента будет предложен подход по оценке эмиссии основных антропогенных долгоживущих ПГ (CO_2 и CH_4) с городских территорий, который позволит получать информацию о динамике совокупного выброса ПГ в режиме времени, близком к реальному, идентифицировать ранее неизвестные источники выбросов и разрабатывать меры по снижению выбросов ПГ (рис. 3). Получение данных наблюдений и выполнение оценки будет реализовано на основе СИГОКО. Создаваемый инструмент независимого контроля городской эмиссии ПГ на основе данных натуральных наблюдений предоставит возможность, в том числе, проводить сравнение с данными спутниковых наблюдений, которые уже сейчас позволяют зарубежным странам получать оценку эмиссии ПГ с территории Российской Федерации (включая города как супер-эмиттеры) и других стран.

К 2030 г. ожидается расширение Системы интегрированного городского климатического обслуживания за счет включения новых компонентов: высокоразрешающего мониторинга осадков и мониторинга загрязнения атмосферного воздуха; мониторинга городских водных объектов; прогнозирования неблагоприятных метеоусловий; контроля динамики совокупного выброса основных парниковых газов с территории города; усовершенствованного прогнозирования изменения климата для городов (в том числе как «островов тепла»), включая использование технологий машинного обучения

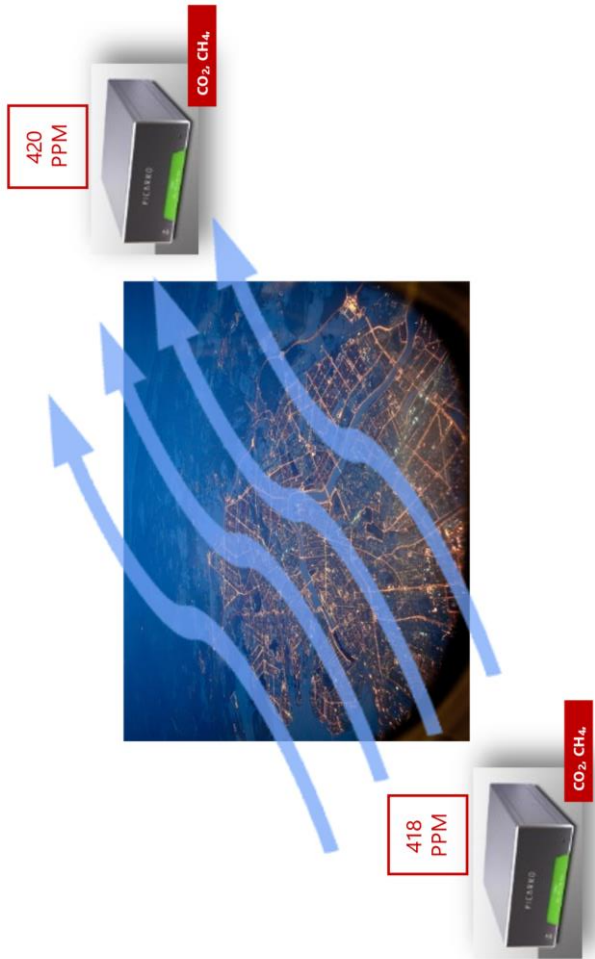


Рис. 3. Оценка эмиссии основных антропогенных долгоживущих ПГ (CO₂ и CH₄) с городских территорий

К концу первого этапа реализации ФНТП-ВИПГЗ ожидается создание первой очереди СИГОКО в части мониторинга химического состава атмосферы (в т.ч. загрязнения атмосферного воздуха с использованием развиваемой в ГГО единой автоматизированной системы обработки информации о загрязнении атмосферы АСОИЗА+ (Крысанов и др., 2021)) и сценарных прогнозов изменения климата в городах Российской Федерации

Задача 5 «ПРОГНОЗ»: Создание высокоразрешающей многоцелевой системы моделирования и прогнозирования регионального климата (МСМПРК)

Создание высокоразрешающей Многоцелевой системы моделирования и прогнозирования регионального климата (МСМПРК) направлено на сценарное прогнозирование состояния климатической системы в представляющих интерес регионах России и мира, в том числе и в первую очередь — в Арктическом макрорегионе и Арктической зоне Российской Федерации (рис. 4). Создание МСМПРК-Арктика направлено на научное обеспечение (в гидрометеорологическом, океанологическом, климатическом аспектах) реализации российских планов и стратегий освоения и развития Арктики.

К концу первого этапа реализации ФНТП-ВИПГЗ ожидается создание «МСМПРК-Арктика», предназначенной для использования как в прогнозировании состояния атмосферы и океана на временных масштабах от нескольких недель до нескольких лет, так и в сценарных прогнозах климатических изменений (бесшовное прогнозирование).

«МСМПРК-Арктика» предполагает возможность проведения значительных по размеру ансамбля и продолжительности экспериментов в сочетании с высоким пространственным разрешением в Арктическом макрорегионе (25 км в атмосфере и 14 км в океане). Ключевой элемент системы образуют региональная климатическая модель атмосферы ГГО и модель Северного Ледовитого океана, разработанная в КарНЦ РАН и ИВМ РАН.

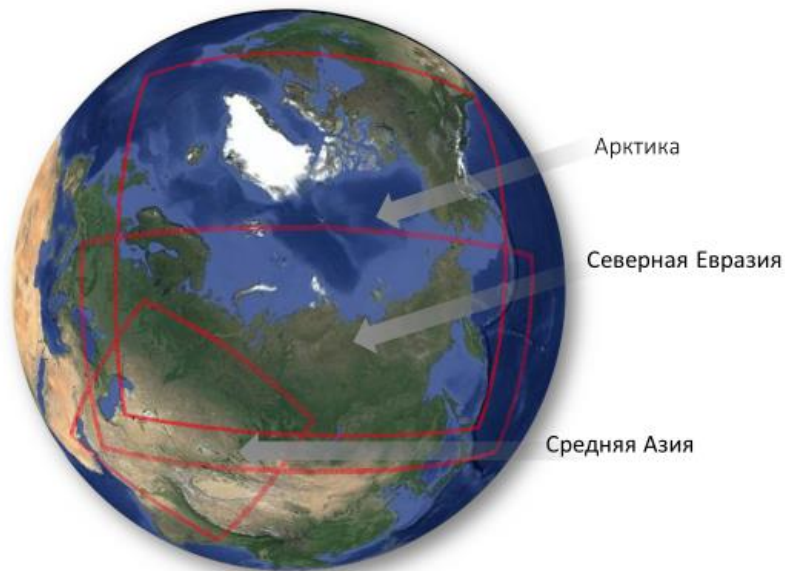


Рис. 4. Основные расчетные области высокоразрешающей Многоцелевой системы моделирования и прогнозирования регионального климата (МСМПК)

Остальными элементами МСМПК являются наборы «субмоделей» для дальнейшей пространственной детализации процессов и климатических воздействий, соответствующие каждой из целевых расчетных областей. Примером такой субмодели является модель трансформации речного стока для территории Северной Евразии (рис. 5). Другими примерами являются модели многолетней мерзлоты, пограничного слоя атмосферы, экосистем суши и океана и др.

Дальнейшее повышение пространственного разрешения в атмосферном компоненте МСМПК наряду с обеспечением возможности проведения массовых ансамблевых расчетов, а также применением машинного обучения, позволит решать задачи климатического обслуживания крупных городских агломераций в рамках развития СИГОКО.

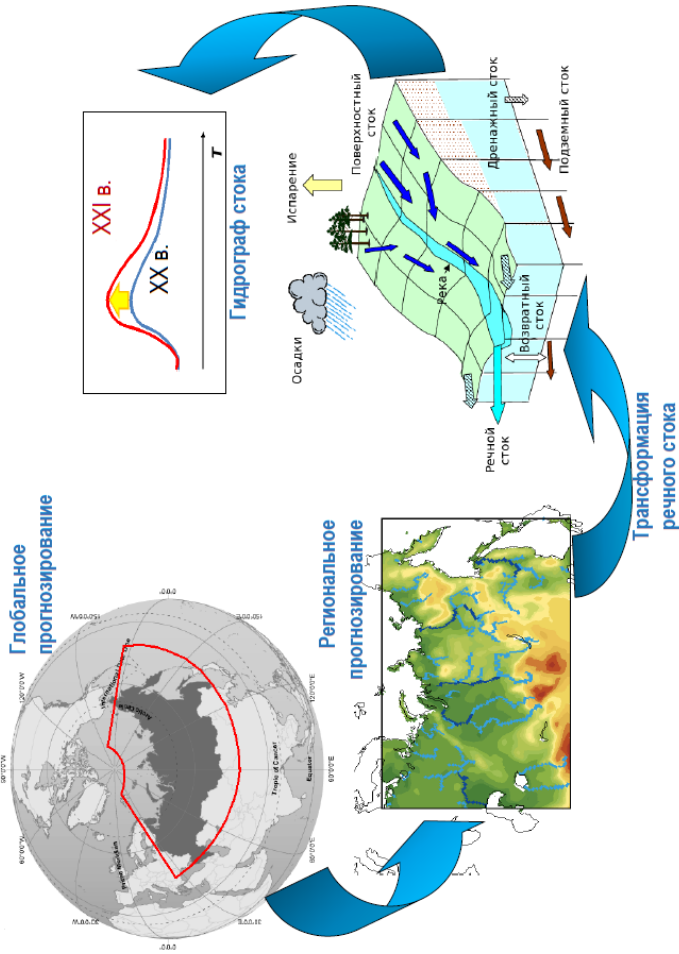


Рис. 5. Применение высокоразрешающей Многоцелевой системы моделирования и прогнозирования регионального климата (МСМПК) на территории Северной Евразии для сценарного ансамблевого прогнозирования трансформации стока российских рек

К 2030 г. СОЗДАНИЕ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА ОБЕСПЕЧИТ ВЫВЕДЕНИЕ НА МИРОВОЙ УРОВЕНЬ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СЦЕНАРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КЛИМАТА В ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РОССИИ ИНТЕРЕС РЕГИОНАХ, В ТОМ ЧИСЛЕ В АРКТИКЕ, А ТАКЖЕ В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ

Заключение

Приступая к реализации ФНТП-ВИПГЗ, участники связывают свои надежды на успех с рядом «стартовых» условий. Прежде всего, это опора на ГНС, функционирующую в соответствии с рекомендациями ВМО, но нуждающуюся в дополнительных компонентах. Развитие ГНС в соответствии с принципами и подходами ВМО является необходимым условием международного признания данных мониторинга.

В ряде областей планируемых разработок участники являются носителями многолетнего международно-признанного опыта научных исследований и практической деятельности. В распоряжении участников наличествуют отдельные апробированные инструменты — «точки роста» ФНТП-ВИПГЗ (климатические модели, автоматизированные системы сбора информации и т. п.), которые представляют собой существенный задел для решения поставленных задач.

В то же время реализация ФНТП-ВИПГЗ во многом зависит от успеха в преодолении существующего технологического отставания России в части необходимых для достижения намеченных целей вычислительных ресурсов (численное моделирование климатической/земной системы) и оборудования (новые компоненты национальной системы климатического и экологического мониторинга), что, в частности, обуславливает критическое значение тщательного планирования проекта на начальном и последующих этапах.

Автор признателен всем участникам консорциума «Суша: мониторинг и адаптация» — ГГО, ААНИИ, ГГИ, ИВП РАН, КарНЦ РАН, ФНЦА РАН — за предоставленные материалы (тексты и рисунки), использованные в статье. Статья подготовлена в рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилов-Данильян В. И., Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. (2020). Проблема климатических изменений — поле сближения и взаимодействия естественных и социогуманитарных наук // Вестник РАН. Т. 90. № 10. С. 914–925.

Катцов В. М. (2015). Климатическое обслуживание Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра / В сб.: Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. — СПб: ООО Д'Арт. С. 66–80.

Катцов В. М. (2022). Задачи и перспективы климатического обслуживания в Российской Федерации в условиях изменения климата / Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. — СПб: Научно-технические технологии. С. 646–652.

Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М. (2020). Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. № 5. С. 46–58.

Киселев А. А. (2022). Мониторинг современной климатической системы Земли: данные и тренды // Труды ГГО. Вып. 607. С.

Крысанов И. В., Полищук А. И., Иванова Н. Н. (2021). Об автоматизации обработки данных мониторинга загрязнения атмосферы // Труды ГГО. Вып. 601. С. 7–18.

Порфирьев Б. Н., Данилов-Данильян В. И., Катцов В. М., Ксенофонтов М. Ю., Ревич Б. А., Школьник И. М., Ключева М. В., Павлова Т. В., Колпаков А. Ю., Ползиков Д. А., Елисеев Д. О., Терентьев Н. Е., Рудакова Ю. Л. (2022). Изменения климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы / под ред. Б. Н. Порфирьева, В. И. Данилова-Данильяна. — М.: Научный консультант. 514 с.

Росгидромет (2011). Решение VI Всероссийского метеорологического съезда (14–16 октября 2009 г., Санкт-Петербург) / В сб.: Труды VI Всероссийского метеорологического съезда — СПб. Росгидромет. С. 133–148.

Росгидромет (2022). Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. — СПб: Наукоемкие технологии. 676 с.

Хлебникова Е. И., Агентьева Е. М., Гаврилова С. Ю., Ефимов С. В., Ивахов В. М., Караченкова А. А., Катцов В. М., Киселев А. А., Ключева М. В., Павлова В. Н., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Порфирьев Б. Н., Ревич Б. А., Рудакова Ю. Л., Стадник В. В., Стерин А. М., Чичерин С. С., Школьник И. М. (2020). Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) / под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева. — СПб: Климатический центр Росгидромета. 120 с.

Baklanov A., Grimmond C. S. B., Carlson D., Terblanche D., Tang X., Bouchet V., Lee B., Langendijk G., Kolli R. K., Hovsepian A. (2018). From urban meteorology, climate and environment research to Integrated City services // *Urban Clim.* V. 23. P. 330–341. 10.1016/j.uclim.2017.05.004.

Baklanov A., Cárdenas B., Lee T. C., Leroyer S., Masson V., Molina L. T., Müller T., Ren C., Vogel F. R., Voogt J. A. (2020). Integrated urban services: Experience from four cities on different continents // *Urban Clim.* V. 32, 100610. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100610>.

Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development.* V. 9. P. 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

Gavrikov A., Gulev S. K., Markina M., Tilinina N., Verezemskaya P., Barnier B., Dufour A., Zolina O., Zyulyaeva Y., Krinitskiy M., Okhlopov I., Sokov A. (2020). RAS-NAAD: 40-year high resolution North Atlantic atmospheric hindcast for multipurpose applications (New dataset for the regional meso-scale studies in the atmosphere and the ocean) // *J. Appl. Meteor. Climatol.* V. 59. P. 793–817. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0190.1>

Slingo J., Baeur P., Bony S., Flato G., Hegerl G., Hesselbjerg Christensen J., Hurrell J., Jakob C., Kattsov V., Kimoto M., Marotzke J., Raghavan K., Shepherd T., Stephens G., Stevens B., Stocker T., Sutton R., Zhou T. (2021). Next generation climate models: a step change for net zero and climate adaptation // *Climate change: science and solutions briefings series. The Royal Society.* 9 p. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/climate-change-science-solutions/climate-science-solutions-modelling.pdf>.

Volodin E. M., Mortikov E. V., Kostykin S. V., Galin V. Ya., Lykossov V. N., Gritsun A. S., Diansky N. A., Gusev A. V., Iakovlev N. G. (2017). Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics.* V. 49 (11). P. 3715–3734. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7.

УДК 551.501:551.583

МОНИТОРИНГ СОВРЕМЕННОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗЕМЛИ: ДАННЫЕ И ТРЕНДЫ

А. А. Киселев

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbyshev st. 7

E-mail: director@voeikovmgo.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022
Поступила после доработки 24.08.2022

Введение

Присущие последним десятилетиям беспрецедентно быстрые, обусловленные антропогенным фактором изменения климата делают насущной потребность в постоянном всестороннем контроле того, что, как и почему происходит в климатической системе Земли. Столь значительные изменения непосредственно сказываются практически на всех сторонах жизни. Это порождает активизацию деятельности как Всемирной метеорологической организации (ВМО), так и ее подразделений, в том числе Росгидромета. Одновременно во всем мире происходит расширение и углубление научных исследований, связанных с климатической тематикой. Такой прогресс во многом обусловлен достижениями последних лет в области спутникового мониторинга, а также увеличением и усовершенствованием вычислительных ресурсов (а с ними — возможностей климатического математического моделирования и обработки большого объема данных наблюдений, в частности создания архивов, в том числе так называемых реанализов).

Появление столь широких возможностей обусловило количественный и качественный рост научных исследований, находящий отклик в научной периодике. Синтез и анализ результатов этих исследований регулярно осуществляется не только ВМО (см., например, ВМО, 2018, 2019, 2021), но и Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), см. IPCC, 2013, 2019, 2021), Арктическим Советом (Arctic Council, см. АМАР, 2015, 2017, 2021), Росгидрометом (см. Росгидромет, 2008, 2014) и др. Возросшая оперативность публикаций позволяет своевременно получать достаточно полную информацию о текущем состоянии климатической системы планеты в целом и в отдельных ее частях. Ниже представлен краткий обзор современного состояния климатической системы, а также тенденций его изменения в последние годы. Обзор включает себя описание глобальной системы наблюдений за климатом, наиболее часто используемых реанализов, наблюдаемой эволюции основных парниковых газов и ряда климатических параметров (температуры воздуха, осадков, уровня Мирового океана, морского льда и др.). Отмечены особенности изменений общей циркуляции атмосферы, состояния криосферы суши, учащения экстремальных погодно-климатических явлений.

Глобальная система наблюдений за климатом

Созданная в 1992 г. Глобальная система наблюдений за климатом (ГСНК — Global Climate Observing System, GCOS) предназначена для обеспечения данными наблюдений и информацией, необходимыми для решения связанных с климатом проблем, всех потенциальных пользователей. Основными системами наблюдений, вносящими вклад в ГСНК, являются Интегрированная глобальная система наблюдений Всемирной метеорологической организации (WMO Integrated Global Observing System, WIGOS), Глобальная служба криосферы (Global Cryosphere Watch, GCW), Система наблюдений за мировым гидрологическим циклом (World Hydrological Cycle Observing System,

WHYCOS) и Глобальная система наблюдений за океаном (Global Ocean Observing System, GOOS).

В настоящее время мониторинг осуществляют более 10 000 наземных метеорологических станций, 1 000 аэрологических станций, 7 000 судов, 100 пришвартованных и 1 000 дрейфующих буев, сотни метеорологических радаров и 3 000 специально оборудованных коммерческих самолетов, ежедневно измеряющих ключевые параметры атмосферы, поверхности суши и океана. Кроме того, информацию регулярно дополняют около 30 метеорологических и 200 исследовательских спутников. Особое значение уделяется наземным станциям, наблюдения на которых ведутся 100 и более лет: в мае 2017 г. ВМО был определен первый набор таких станций, список которых должен обновляться каждые два года¹.

В рамках ГСНК учреждены три группы экспертов для определения наблюдений, необходимых в каждой из основных глобальных областей — атмосферы (Atmospheric Observation Panel for Climate, АОПС), океанов (Ocean Observations Panel for Climate, ООПС) и суши (Terrestrial Observation Panel for Climate, ТОПС), — с целью подготовки конкретных элементов программы и выработки рекомендаций для ее реализации. Группы экспертов ГСНК устанавливают набор основных климатических переменных (Essential Climate Variables, ECVs), необходимых для систематического наблюдения за изменением климата Земли.

ГСНК утвердила список, состоящий из 50 основных климатических переменных, подлежащих постоянному наблюдению как необходимых для создания и обновления глобальной климатической продукции и производной информации. Он включает следующие компоненты²:

– *атмосфера*: молниевые разряды, облака, радиационный баланс Земли, скорость и направление ветра, температура, водяной пар, компоненты атмосферного воздуха: углекислый газ CO₂, метан CH₄

¹ <https://community.wmo.int/activity-areas/global-observing-system-gos>

² <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables>

и другие парниковые газы, озон O_3 , аэрозоли, предшественники (precursors) озона и аэрозолей;

– *приземный слой*: осадки, атмосферное давление, радиационный баланс, скорость и направление ветра, температура, водяной пар;

– *поверхностный слой океана*: температура, состояние моря (sea state), морское волнение (sea stress), морской лед, поток тепла с поверхности, соленость, поверхностные течения, уровень моря;

– *биогеохимия*: неорганический углерод, кислород, питательные вещества, короткоживущие трассеры (transient tracers), закись азота N_2O , цвет воды (ocean colour);

– *подповерхностный слой океана*: температура, течения, соленость;

– *биология океана/экосистемы*: обитатели, планктон;

– *криосфера*: ледяные щиты и шельфовые ледники, ледники, снег, многолетняя мерзлота;

– *антропофера*: водопользование, эмиссия парниковых газов;

– *биосфера*: наземная биомасса, растительный покров, альbedo, пожары, температура поверхности, индекс площади листа (LAI), доля поглощенной фотосинтетически активной радиации, углерод почвы;

– *гидросфера*: речной сток, озера, грунтовые воды, влажность почвы, испарение с поверхности.

Семь из них являются ключевыми (рис. 1).

ГЧНК создан ряд сетей (рис. 2), таких как наземная сеть ГЧНК (GCOS Surface Network, GSN), аэрологическая сеть ГЧНК (GCOS Upper-Air Network, GUAN), GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN), Baseline Surface Radiation Network (BSRN, проект World Climate Research Programme (WCRP) и the Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX)) и др. Эти сети составляют основу Региональной базовой климатологической сети (Regional Basic Climatological Network, RBCN), обеспечивающей детальную пространственную информацию об изменчивости климата. Установлена иерархия сетей и систем наблюдений, включающая комплексные, базовые и эталонные сети, основанные на предположениях о потребностях пространственной выборки.

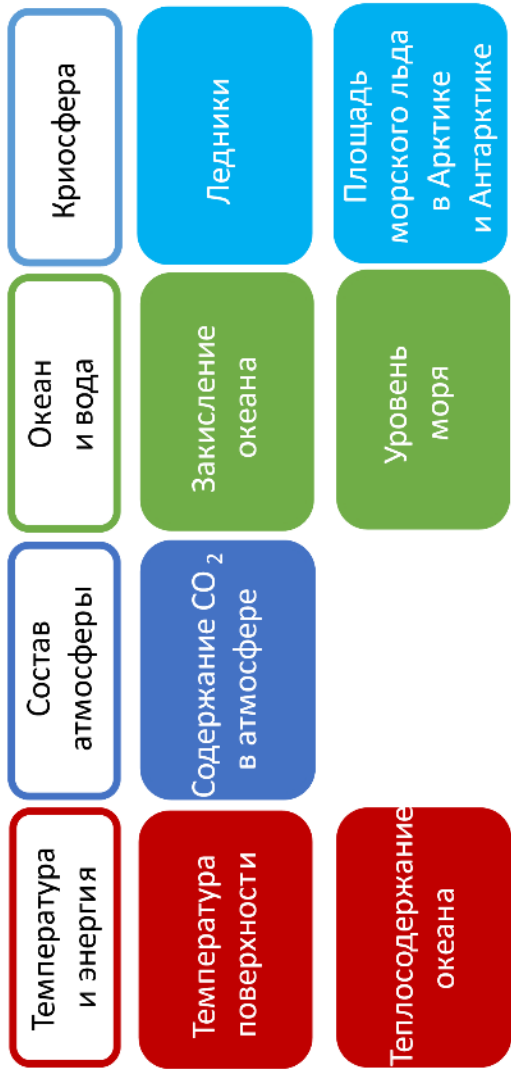


Рис. 1. Ключевые климатические переменные³

³ <https://gcos.wmo.int/>

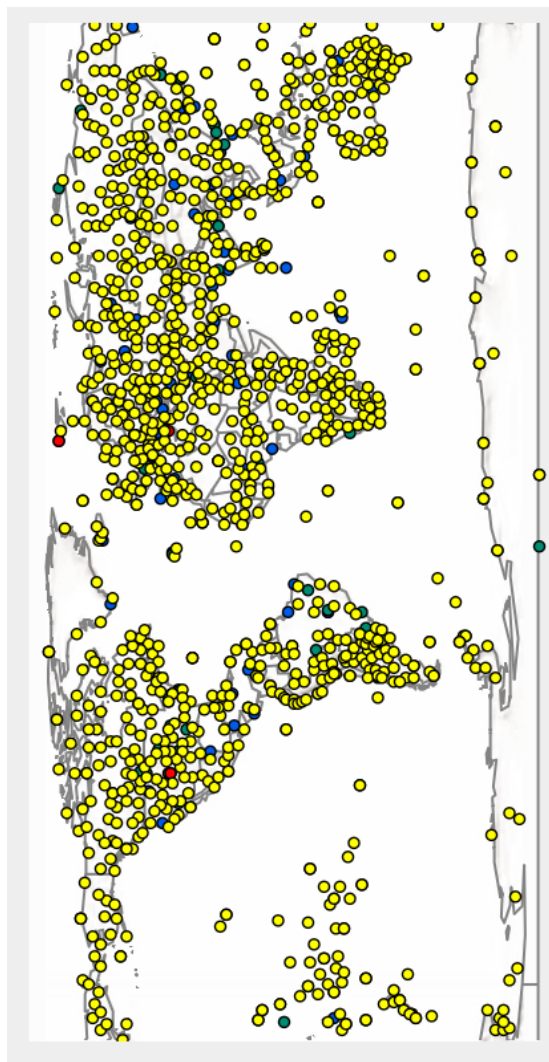


Рис. 2. Сеть наземных станций ГСНК⁴: GSN (желтые), GRUAN (красные), BSRN (зеленые), GUAN (голубые)

⁴ <https://gcos.wmo.int/en/networks/atmospheric>

Реанализы

Реанализы представляют собой результаты модельных расчетов (ретроспективных прогнозов) атмосферных или океанских полей, произведенных с использованием всего комплекса имеющихся данных наблюдений. Там, где такие данные отсутствуют, они дополняются соответствующими модельными результатами. Основная цель создания реанализа заключается в его последующем использовании

в качестве входных параметров климатических моделей, а также для оценки их качества.

В последние десятилетия в мире создан ряд постоянно пополняемых и совершенствуемых архивов данных и реанализов, в том числе:

– NOAAGlobalTemp (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США, NOAA) — набор данных о глобальной температуре поверхности суши и океана на пространственной сетке $5 \times 5^\circ$ ($87,5^\circ$ ю. ш. – $87,5^\circ$ с. ш., $2,5^\circ$ – $357,5^\circ$ по долготе) с месячным разрешением с января 1880 г. по настоящее время. Набор данных о глобальной температуре водной поверхности построен на базе 4-й версии ERSST (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature), а суши — на базе данных GHCN-M (Global Historical Climatology Network Monthly), версия 3.3.0. Данные NOAAGlobalTemp представлены в виде аномалий температуры средних месячных значений за 1971–2000 гг. в соответствии с соглашением Всемирной метеорологической организации (NOAAGlobalTemp, 2015);

– GISTEMP v4 (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, NASA) — набор данных о глобальном изменении температуры поверхности на пространственной сетке $2 \times 2^\circ$ с месячным разрешением с января 1880 г. по настоящее время. Также использует данные NOAA, 4-ю версию GHCN и 5-ю версию ERSST (GISTEMP v4, 2019);

– HadCRUT4 и CRUTEM4 (Центр Хэдли Метеорологического бюро Великобритании, Отдел климатических исследований

Университета Восточной Англии и Метеорологическое бюро Великобритании) — набор данных о глобальной температуре поверхности суши и океана на пространственной сетке $5 \times 5^\circ$ с месячным разрешением с января 1850 г. по настоящее время построен на данных примерно 5 500 станций. Отличается от вышеприведенных продуктов NASA и NOAA тем, что в нем не используется интерполяция и, как следствие, имеются многочисленные пропуски (HadCRUT4, 2012);

– CRU TS (Отдел климатических исследований Университета Восточной Англии и Метеорологическое бюро Великобритании) — широко используемый набор климатических данных (средняя, минимальная и максимальная температура, количество осадков, давление водяного пара, число дней с дождем, облачность) на сетке $0,5 \times 0,5^\circ$ по территории суши, кроме Антарктиды. Получен путем интерполяции месячных аномалий по данным наблюдений метеостанций. Версия CRU TS v4 обновлена за период 1901–2018 гг. за счет включения дополнительных наблюдений станций и продолжает обновляться ежегодно (CRU-4, 2020);

– MERRA-2 (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, NASA) — глобальный реанализ атмосферы, охватывающий эпоху спутниковых наблюдений с 1980 г. по настоящее время. Он предоставляет упорядоченные записи параметров глобальной атмосферы с регулярной привязкой и включает дополнительную информацию о климатической системе: газовые следы (стратосферный озон), улучшенное представление поверхности Земли и криосферные процессы. MERRA-2 — первый глобальный реанализ спутниковой эры, ассимилирующий космические наблюдения за аэрозолями и представляющий их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе (MERRA-2, 2017);

– ERA5 (Европейский центр прогнозов погоды) предоставляет ежечасные оценки большого набора климатических переменных для атмосферы, суши и океана. Данные покрывают Землю на сетке 30 км и с разрешением в атмосфере 137 уровней от поверхности до высоты 80 км. Ежемесячные обновления ERA5 гарантированного качества

публикуются в течение 3 месяцев в режиме реального времени. Предварительные ежедневно обновляемые наборы данных доступны пользователям в режиме реального времени в течение 5 дней. ERA5 объединяет обширный массив исторических наблюдений в глобальные оценки с использованием передовых систем моделирования и усвоения данных (ERA-5, 2020);

– JRA-55 (Японское метеорологическое агентство) — реанализ, содержащий данные с 1958 г., когда начались регулярные аэрологические (радиозондовые) наблюдения в глобальном масштабе. Разрешение составляет около 55 км по пространству, 3 ч по времени. Предоставляются данные о температуре, коротковолновой и длинноволновой радиации, осадках (жидких и твердых), ветре и др. (JRA-55, 2015);

– NCEP/NCAR (совместный продукт Национального центра экологического прогнозирования и Национального центра атмосферных исследований США) — реанализ, использующий данные широкого набора метеорологических параметров (температура, альbedo, атмосферное давление, облачность, осадки, длинноволновая и коротковолновая радиация, протяженность морского льда и пр.) с 1948 г. по настоящее время на глобальной сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ (144×73 узлов) от $0,0^\circ$ до $357,5^\circ$ по долготе, от $90,0^\circ$ с. ш. до $90,0^\circ$ ю. ш. и на 17 уровнях по вертикали. Доступны ежедневно обновляемые данные в исходном формате 4 раза в день и в виде средних значений за день (NCEP/NCAR, 1996);

– DEL (Делавэрский Университет, США) — глобальный набор данных (температура воздуха, осадки и водный баланс над сушей) на глобальной сетке $0,5 \times 0,5^\circ$ (720×360 узлов) от $89,75^\circ$ с. ш. до $89,75^\circ$ ю. ш., от $0,25^\circ$ до $359,75^\circ$ по долготе, включающий ежемесячные глобальные данные наземных станций высокого разрешения с привязкой к сетке в период 1900–2017 гг. (DEL, 2001).

Парниковые газы

Вслед за Пятым оценочным докладом Межправительственной группы экспертов по изменению климата — МГЭИК (IPCC, 2013),

в котором отмечалось, что влияние человека на климатическую систему постепенно усиливается, в Шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2021) сделан вывод о том, что это влияние очевидно, о чем свидетельствует повышение концентрации парниковых газов в атмосфере, положительное радиационное воздействие, наблюдаемое потепление и расширение знаний о процессах, происходящих в климатической системе. Продолжающийся рост содержания парниковых газов в атмосфере стал (с разной степенью достоверности)⁵ причиной изменения режимов осадков и солености вод Мирового океана, а также повышения кислотности океанических вод и сокращения площади и толщины арктического морского льда в последние десятилетия (IPCC, 2021).

Среди вносящих заметный вклад в усиление парникового эффекта атмосферных газов — водяной пар H_2O , углекислый газ CO_2 , метан CH_4 , закись азота N_2O , озон O_3 , большая группа хлор- и бромсодержащих химикатов (основные — CFC-11 ($CFCl_3$) и CFC-12 (CF_2Cl_2)). Содержание в атмосфере всех перечисленных газов, за исключением водяного пара, в большей или меньшей степени зависит от хозяйственной деятельности человека, поэтому их обычно называют антропогенными парниковыми газами.

Вклад каждого газа в парниковый эффект оценивается двумя характеристиками: потенциалом глобального потепления (Global Warming Potential) и радиационным форсингом (Radiative Forcing). Первая описывает насколько единица массы данного газа эффективнее разогревает атмосферу, чем единица массы эталонного газа CO_2 , вторая — общий вклад каждого парникового газа в среднегодовой дисбаланс между приходящим от Солнца и уходящим от Земли излучением в современных условиях по сравнению с доиндустриальным уровнем (1750 г.). Согласно современным оценкам, около 80 % прямого радиационного форсинга приходится на CO_2 (~60 %) и CH_4 (~20 %), а еще 16 % — на три других

⁵ Приводимые здесь оценки достоверности результатов соответствуют системе, принятой МГЭИК (Mastrandrea et al., 2011)

парниковых газа: N_2O , CFC-11 и CFC-12⁶. Все эти газы (кроме метана) являются долгоживущими: время жизни в атмосфере CO_2 , N_2O и CFC-12 составляет 100 и более лет, CFC-11 — 45 лет. Метан, отнесенный к категории короткоживущих газов, существует в атмосфере примерно 9 лет⁷.

Атмосферные концентрации трех парниковых газов, имеющих как естественные, так и антропогенные источники, значительно выросли с доиндустриальной эпохи: CO_2 на 46, CH_4 на 157 и N_2O на 22 %⁸. При этом если содержание в атмосфере CO_2 ⁹ и N_2O в последние десятилетия росло монотонно, то концентрация метана в 2000–2007 гг. почти не изменялась (увеличилась на 0,6 % за 8 лет) и лишь затем возобновила свой рост (рис. 3). О причинах этого явления единого мнения не существует (см., например, Nisbet et al., 2016). Содержание фреонов первого поколения, CFC-11 и -12, имеющих полностью антропогенное происхождение, начало снижаться в XXI в. в результате действия ограничений Монреальского протокола и его дополнений. Однако одновременно продолжали расти концентрации их заменителей, в том числе HCFC-22 ($CHClF_2$) и HFC-134a (CH_2FCF_3) (рис. 3), время жизни которых 11,9 и 13,4 лет соответственно¹⁰. Ограничения на производство и использование этих химикатов были введены только в 2010-х гг. и пока затронули главным образом лишь наиболее развитые экономические страны (США, ЕС, Японию, Австралию). Несмотря на то что потенциал глобального потепления HCFC-22 и HFC-134a на 3 порядка выше, чем

⁶ <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-06.pdf>

⁷ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf

⁸ <https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-levels-atmosphere-reach-new-record>

⁹ Годовые темпы роста CO_2 существенно различались, достигая пика во время сильных явлений Эль-Ниньо, как это было в 2015–2016 гг. (Betts et al., 2016)

¹⁰ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf

у CO_2 , их современный вклад в усиление парникового эффекта невелик, поскольку их атмосферные концентрации на 6 порядков ниже, чем у CO_2 .

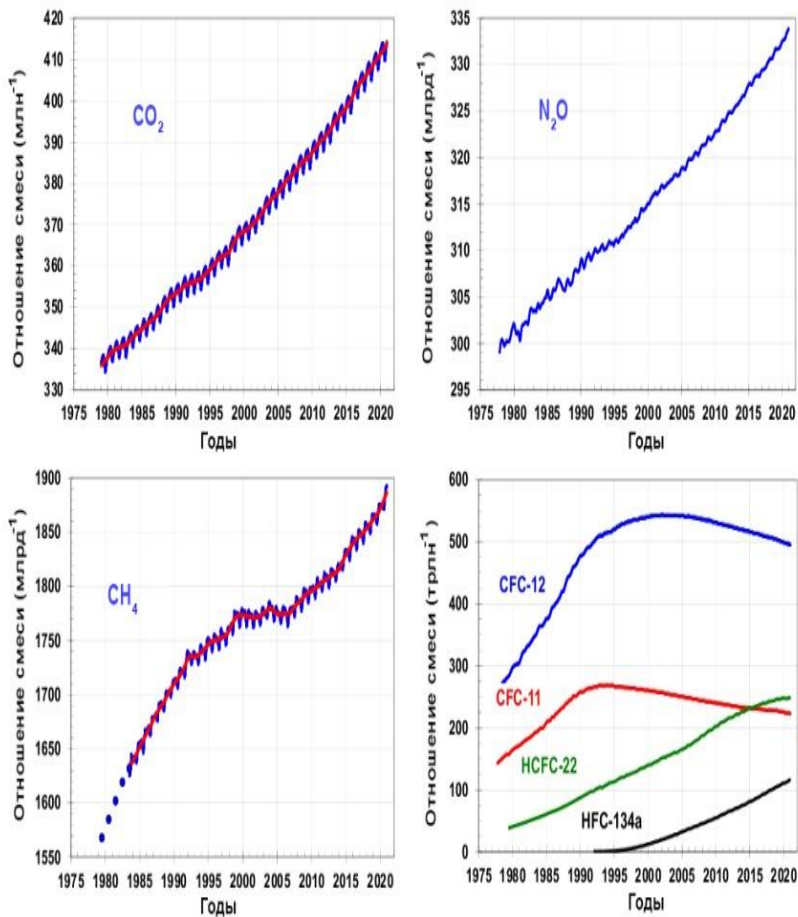


Рис. 3. Среднее глобальное содержание основных хорошо перемешанных долгоживущих парниковых газов — двуокиси углерода, метана, закиси азота, CFC-12, CFC-11, HCFC-22 и HFC-134a — по данным глобальной сети отбора проб воздуха NOAA в 1979–2021 гг.¹¹

¹¹ <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>

Особая роль озона заключается в том, что он одновременно является и парниковым газом, и фильтром для жесткой ультрафиолетовой солнечной радиации, губительной для живых организмов. Географическое распределение ОСО (общего содержания озона — суммарного числа молекул озона в атмосферном столбе с площадью основания 1 см^2) очень неоднородно: вне тропиков ОСО имеет значительный сезонный ход, наиболее выраженный в полярных областях.

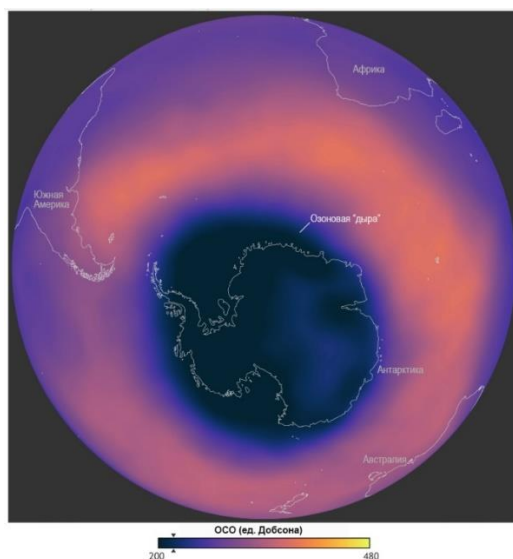


Рис. 4. Размер и глубина озоновой дыры над Антарктидой в 2020 г., когда она достигла максимальной протяженности в $24,9 \text{ млн км}^2$ в период с 14 по 20 сентября (по данным NOAA Climate.gov¹²). Для сравнения: площадь Антарктиды составляет около $14,1 \text{ млн км}^2$

С момента обнаружения весенней озоновой дыры над Антарктидой в середине 1980-х гг. там налажен регулярный мониторинг озоносферы. Меры по защите озонового слоя Земли

¹² <https://www.noaa.gov/media-release/large-deep-antarctic-ozone-hole-to-persist-into-november>

(Монреальский протокол и его дополнения) пока не дали ощутимых результатов: наметившееся в последнее пятилетие уменьшение глубины и площади дыры было нарушено весной 2020 г. (рис. 4, 5).

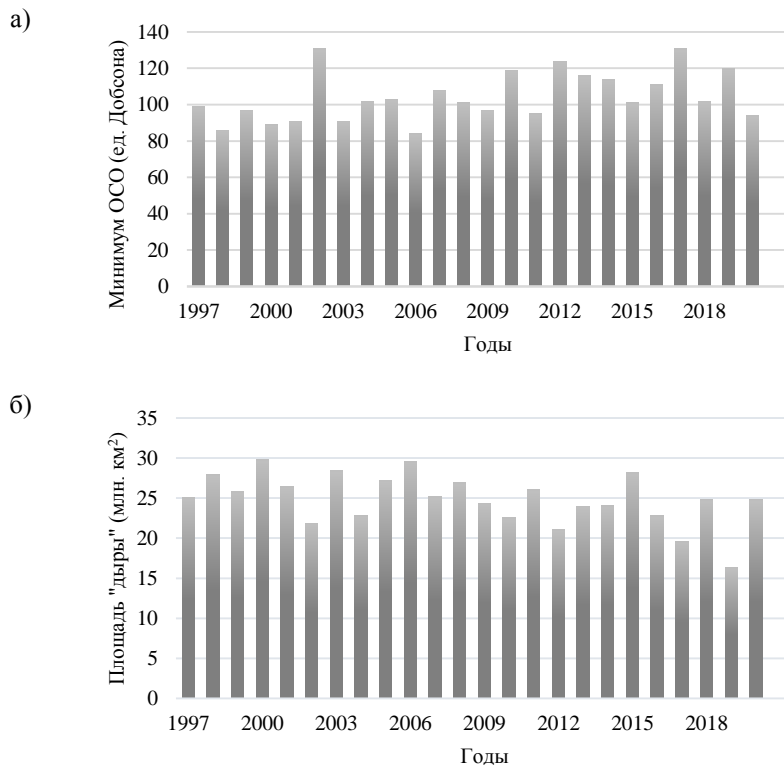


Рис. 5. Минимальные значения ОСО, е. Д., в антарктической озоновой дыре (а) и ее площадь, млн км², (б) в период 1997–2020 гг. по данным NASA¹³

Согласно (WMO, 2018), озоновый слой постепенно восстанавливается, но содержание озона над Антарктикой уровня 1980 г. будет достигнуто не ранее 2060 г. Появление озоновой дыры

¹³ <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

над Арктикой происходит нерегулярно: наибольшее истощение озонового слоя здесь наблюдалось в 1997, 2011 и 2020 гг., причем в последнем случае площадь дыры впервые достигла 19 млн км², самые низкие значения ОСО над Арктикой наблюдались в марте и составляли порядка 200 единиц Добсона (е. Д.). Для сравнения: в Антарктиде отсчет озоновой дыры начинается, когда ОСО не превосходит 220 е. Д.

Температура приземного воздуха

По данным ВМО, 2015–2020 гг. были самым теплым шестилетием, а 2011–2020 гг. — самым теплым десятилетием за всю историю наблюдений. Начиная с 1980-х гг. каждое последующее десятилетие было теплее, чем любое предыдущее после 1850 г. Современная средняя глобальная температура составила примерно 14,9 °С, что на 1,2 °С выше, чем в доиндустриальную эпоху, см. рис. 6 (WMO, 2021).

По данным HadCRUT4, средние темпы потепления приземного воздуха в 1976–2020 гг. составили 0,18 °С/10 лет в глобальном масштабе, 0,28 °С/10 лет — над сушей¹⁴, причем только за этот период глобальная температура выросла на 0,8 °С. Значительно интенсивнее в те же годы повышалась температура в средних и высоких широтах Северного полушария: на территории России ее рост достигал 0,51 °С/10 лет. Наиболее быстрыми темпами росла температура Северной полярной области в последние 30 лет (1991–2020 гг.): рост среднегодовой температуры составил 0,88 °С/10 лет, т. е. 2,64 °С за 30 лет (Росгидромет, 2021).

¹⁴ Согласно недавним оценкам, рост температуры (глобальной и над сушей) за период 1979–2019 гг. оказался немного выше: 0,195 и 0,296 °С/10 лет соответственно (Li et al., 2021)

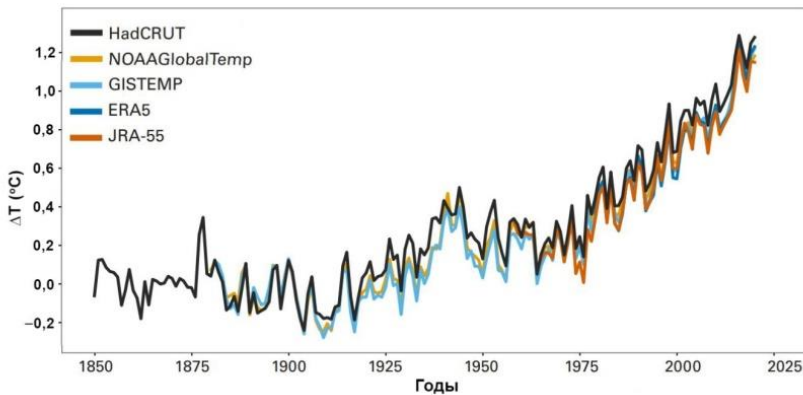


Рис. 6. Отклонение среднеглобальной температуры приземного воздуха, °С, от среднеглобальной в доиндустриальный период (1850–1900 гг.) по данным 5 архивов: HadCRUT (Великобритания), NOAA GlobalTemp (NOAA, США), GISTEMP (NASA, США), ERA5 (ECMWF, Европейский Союз), JRA-55 (Япония) (WMO, 2021). Разброс между пятью комплектами данных в 2021 г. равен 0,15 °С, при этом самое низкое (1,05 °С) и самое высокое (1,20 °С) значения превысили на 1 °С показатели доиндустриального базового периода

Данные наблюдений (за 50 и более лет) на глобальной сети, состоящей из 3 288 станций, свидетельствуют о том, что потепление в Северном и Южном полушариях существенно различается (рис. 7 и табл. 1).

Области, не представленные в этом архиве, показаны штриховкой. Для станций Антарктиды и Гренландии приведены значения коэффициентов тренда. Белыми кружками отмечены станции, для которых тренд статистически значим на уровне 1 % (Бардин и др., 2020).

Для 98 % станций, представленных в архиве и для которых был возможен расчет, тренды положительны (практически на всей территории Земного шара), из них 80 % значимы на уровне 1 %, еще 8 % — на уровне 5 %.

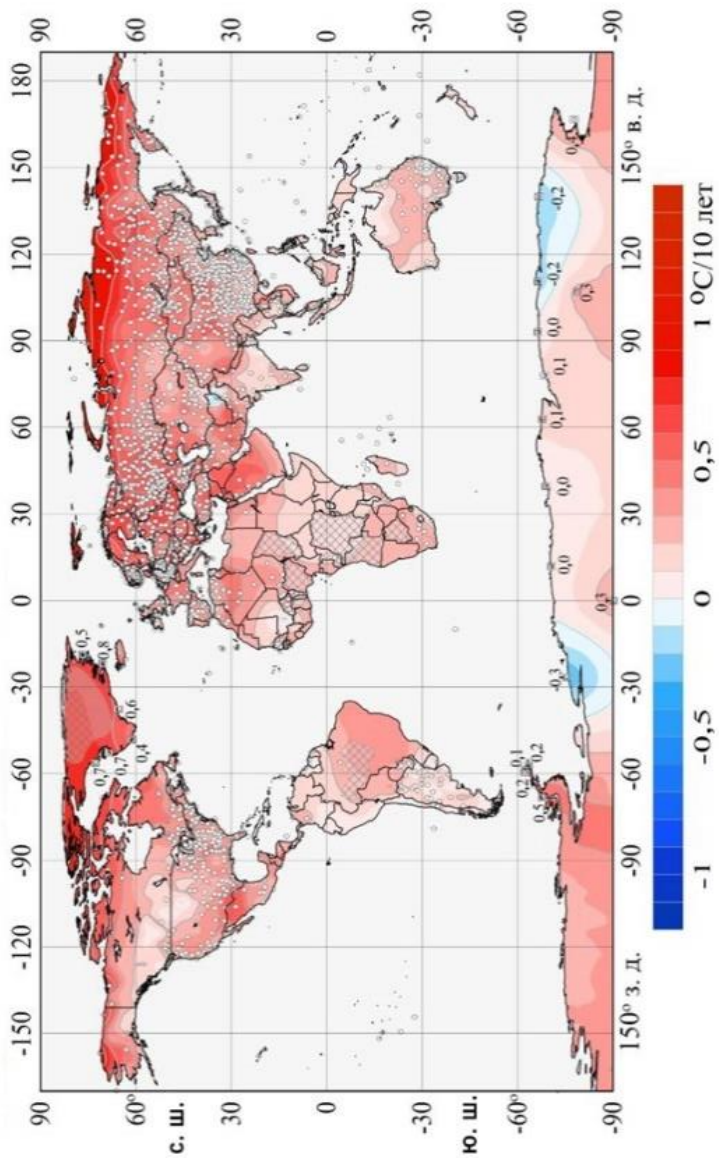


Рис. 7. Пространственное распределение локальных коэффициентов линейного тренда (1976–2020 гг.) по данным 3 288 наземных станций

Таблица 1

Коэффициенты линейного тренда (1976–2020 гг., °C/10 лет) пространственно осредненных аномалий приземной температуры для Земного шара, полушарий и континентов по данным 3 288 наземных станций. Все коэффициенты значимы на уровне 1 % (Бардин и др., 2020)

Регион	Коэффициент линейного тренда
Земной шар	0,30
Северное полушарие	0,35
Южное полушарие	0,17
Азия	0,38
Европа	0,51
Северная Америка	0,29
Южная Америка	0,18
Африка	0,29
Австралия	0,21

Таким образом, около 90 % всех трендов свидетельствуют о существовании глобального потепления. В Европе и Африке положительные тренды составляют 100, в Азии — 99 %.

Отрицательные тенденции с уровнем значимости 5 % отмечены лишь на семи станциях, среди них на двух (Вашингтон $-0,32$ °C/10 лет и Дюмон-д'Эрвиль, Антарктида $-0,2$ °C/10 лет) уровень значимости составил 1 % (Бардин и др., 2020).

Сезонная изменчивость наиболее ярко выражена на континентах Северного полушария.

Антарктические тренды обладают заметной неоднородностью: существенны различия в значениях трендов в западной и восточной частях материка, прибрежной и внутриматериковой зонах. В частности, за последние 30 лет на Южном полюсе наблюдалось рекордно высокое статистически значимое потепление $0,61 \pm 0,34$ °C за десятилетие, что более чем в 3 раза превышает среднемировой показатель (Clem et al., 2020).

Осадки

Оценки тенденций изменения количества осадков в глобальном масштабе разноречивы и обладают большими неопределенностями. Это связано как с самой природой явления, так и с современными возможностями глобального мониторинга, даже в условиях внедрения спутниковых систем наблюдения. При создании архивов данных по осадкам используются либо только спутниковые данные, либо совокупность наземных и спутниковых данных с привлечением методов реанализа. При этом, вследствие неоднородностей данных об осадках, возникают систематические и случайные ошибки измерений, а также ошибки, обусловленные алгоритмами усвоения данных в реанализах. Несмотря на то, что пространственный охват архивов близок к глобальному, точность оценок ухудшается по мере приближения к высоким широтам.

Вероятно, что влияние хозяйственной деятельности человека способствовало наблюдаемым крупномасштабным изменениям количества осадков с середины XX в. (IPCC, 2021). Тенденции последних десятилетий говорят об увеличении количества и темпов прироста глобальных осадков над сушей. Этот прирост в разных наборах данных оценивается в 5–10 мм/год за десятилетие при наличии большой межгодовой изменчивости и региональной неоднородности. В частности, по данным CRU TS v4 (набора климатических данных на горизонтальной сетке $0,5 \times 0,5^\circ$ для всех областей суши, кроме Антарктиды) такой прирост составляет $9,30 \pm 7,22$ мм/год за десятилетие при значимости тренда 10 % (Harris et al., 2020). Отмечается тенденция к усугублению ситуации: усилению осадков во влажных и их сокращению в засушливых регионах. Увеличение количества осадков зафиксировано над тропической Африкой, Центральной Азией, восточными частями Европы и Северной Америки, а снижение — в Северной Африке и на Ближнем Востоке, в центральной части Южной Америки, на западе Северной Америки. Наиболее значителен рост осадков на большей части Африки, а наибольшее сокращение — на юге Южной Америки (Knutson, Zeng, 2018).

Над океанами существующие наборы данных об осадках расходятся по знаку и величине трендов.

Значительные неопределенности присутствуют в пространственных оценках разности между количеством осадков и испарением: по данным наблюдений она положительна над сушей и отрицательна над океанами.

Общая циркуляция атмосферы

Исследования изменения общей циркуляции атмосферы ведутся в условиях отсутствия длинных рядов данных, как правило с привлечением реанализов. Такой подход неизбежно порождает значительные погрешности и не позволяет делать окончательные выводы с достаточной степенью уверенности. В результате можно перечислить лишь наметившиеся в последние годы тенденции в изменениях крупномасштабных атмосферных движений.

Анализ данных за последние 40 лет показывает расширение тропических ячеек циркуляции Хэдли (Hadley) и Уокера (Walker) со смещением к полюсам в среднем на несколько десятых градуса широты за десятилетие (Grise et al., 2018; Grise, Davis, 2020). При этом спутниковые наблюдения в верхних слоях тропосферы предполагают значительно меньшее усиление циркуляции Уокера, чем реанализы.

Различные наборы данных свидетельствуют о постоянном смещении к полюсу траекторий штормов и струйных течений, начиная с 1979 г., которое в целом согласуется с ранее зарегистрированными сдвигами, полученными из спутниковых наблюдений за температурой (IPCC, 2021). Скорость субтропических струйных течений увеличивалась зимой и снижалась летом в обоих полушариях, но эта тенденция существенно зависит от региона (Manney, Hegglin, 2018; Lee et al., 2019). Общее число внетропических циклонов, вероятно, увеличилось с 1980-х гг. в Северном полушарии, однако число сильных циклонов сократилось. В Южном полушарии, напротив, число сильных внетропических циклонов, вероятно, возросло.

Атмосферный блокинг — устойчивое, полустационарное погодное условие, характеризующееся аномалией высокого давления, прерывающей западный поток воздуха в средних широтах обоих полушарий. В результате блокинга часто возникают экстремальные явления, такие как обильные осадки, засуха, волны тепла или холода. Сегодня нет единого мнения относительно наблюдаемых тенденций в блокировании, однако отмечается значительное увеличение частоты блокингов в Арктике и в летнее время над Гренландией (IPCC, 2021).

Глобальное ослабление приземного ветра особенно заметно над сушей Северного полушария (Azorin-Molina et al., 2019).

Северный стратосферный полярный вихрь в течение последних десятилетий менялся в зависимости от сезона и высоты. Высота геопотенциала нижней стратосферы в середине зимы над полярным регионом к северу от 70° с. ш. значительно увеличилась с начала 1980-х гг. (Garfinkel et al., 2018). Этот сигнал распространяется на среднюю и верхнюю стратосферу.

Криосфера суши

Элементами криосферы суши являются твердые осадки, снег, озерный и речной лед, ледники и ледяные шапки, ледяные щиты, многолетняя мерзлота и сезонно мерзлые грунты. Наблюдения показывают общее уменьшение снежного покрова, массы ледников и многолетней мерзлоты вследствие изменения климата в последние десятилетия. Продолжительность залегания снежного покрова в горных районах сократилась почти повсюду, особенно на низких высотах — в среднем на 5 дней за 10 лет с вероятным диапазоном от 0 до 10 дней (IPCC, 2019). Высота и площадь снежного покрова на малых высотах колеблются от года к году, но в среднем снизились.

Число и площадь ледниковых озер за последние десятилетия возросли в большинстве регионов. Весьма вероятно, что влияние человека способствовало наблюдаемому сокращению весеннего снежного покрова в Северном полушарии с 1950 г. (IPCC, 2021).

В некоторых регионах число лавин при выпадении мокрого снега увеличилось, а число паводков из-за дождя уменьшилось на низких

высотах весной и увеличилось на больших высотах зимой. Отчасти из-за раннего таяния снегов на западе США увеличилось число и масштабы лесных пожаров (IPCC, 2019).

Изменение снежного покрова и ледников привело к изменению объема и сезонности стока речных бассейнов с преобладанием снегового и ледникового питания. Зимний сток увеличился в последние десятилетия из-за большего количества осадков, выпадающих в виде дождя. В некоторых реках, питаемых ледниками, летний и годовой сток увеличился из-за более интенсивного таяния ледников, но уменьшился там, где объем талой воды сократился из-за сокращения площади ледников. Это наблюдалось преимущественно в регионах

с преобладанием небольших ледников, таких как Европейские Альпы.

Большинство изменений снежного покрова обусловлено увеличением количества жидких осадков и ускорением таяния снега, происходящим в основном из-за изменений атмосферных процессов, особенно повышения температуры воздуха (Marty et al., 2017), которые связаны с крупномасштабными антропогенными воздействиями.

С высокой степенью достоверности температура верхнего слоя многолетней мерзлоты с начала 1980-х гг. в большинстве регионов повысилась, хотя темпы потепления варьировались в зависимости от региона, что связано с повышением температуры воздуха и изменениями в снежном покрове (IPCC, 2019). Редкие и неравномерно распределенные измерения показывают повышение температуры многолетней мерзлоты в последнее десятилетие. Так, в зоне сплошной многолетней мерзлоты она повысилась на $0,39 \pm 0,15$ °C, прерывистая мерзлота за этот же период прогрелась на $0,20 \pm 0,10$, горная — на $0,19 \pm 0,05$, а мерзлота в Антарктиде — на $0,37 \pm 0,10$ °C. В глобальном масштабе температура многолетней мерзлоты повысилась на $0,29 \pm 0,12$ °C (Biskaborn et al., 2019). В то же время с 1970-х гг. многолетняя мерзлота в Арктике прогрелась на 2–3 °C (AMAP, 2021). Наблюдаемая тенденция согласуется с арктическим усилением повышения температуры воздуха в Северном полушарии. Однако в зоне прерывистой мерзлоты

температура почвы повысилась из-за увеличения толщины снега, а температура воздуха осталась статистически неизменной (Biskaborn et al., 2019).

Оценка последствий осаждения на снежный покров светопоглощающих частиц аэрозоля, таких как сажа, органический углерод и минеральная пыль, является новой проблемой (Skiles et al., 2018). Имеются отдельные доказательства того, что увеличение осаждения черного углерода от антропогенных источников и источников сжигания биомассы способствовало сокращению снежного покрова в высокогорной Азии (Li et al., 2016; Zhang et al., 2018) и Южной Америке (Molina et al., 2015). Эффекты прямого и обратного воздействия черного углерода влияют на продолжительность залегания снежного покрова, его высоту и скорость таяния льдов Гренландии (Kang et al., 2020). В то же время в Арктике в последние десятилетия количество светопоглощающей сажи в снеге сокращается, что указывает на то, что обусловленный ею нагрев не является основной причиной изменений снежного и ледяного покрова, а также альбедо поверхности (см. рис. 8, а также Zhang et al., 2019).

Увеличение средней потери массы ледников в глобальном масштабе по оценке, приведенной в работе (Zemp et al., 2019), составило примерно 30 % в периоды 1986–2005, 2006–2015 гг.

Весьма вероятно, что потепление атмосферы является основным фактором, определяющим глобальное отступление ледников (Marzeion et al., 2014; Vuille et al., 2018). Имеются отдельные доказательства того, что антропогенное увеличение выбросов парниковых газов способствовало наблюдаемым изменениям их массы (Hirabayashi et al., 2016). По подсчетам, антропогенная доля потери массы всех ледников за пределами Гренландии и Антарктиды увеличилась с 25 ± 35 % в 1851–2010 гг. до 69 ± 24 % в 1991–2010 гг. (Marzeion et al., 2014).

Скорость таяния ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды быстро увеличивается. Общая потеря массы антарктического льда увеличилась с 40 ± 9 Гт/год в 1979–1990 гг. до 166 ± 18 Гт/год в 1999–2009 гг. и 252 ± 26 Гт/год в 2009–2017 гг.

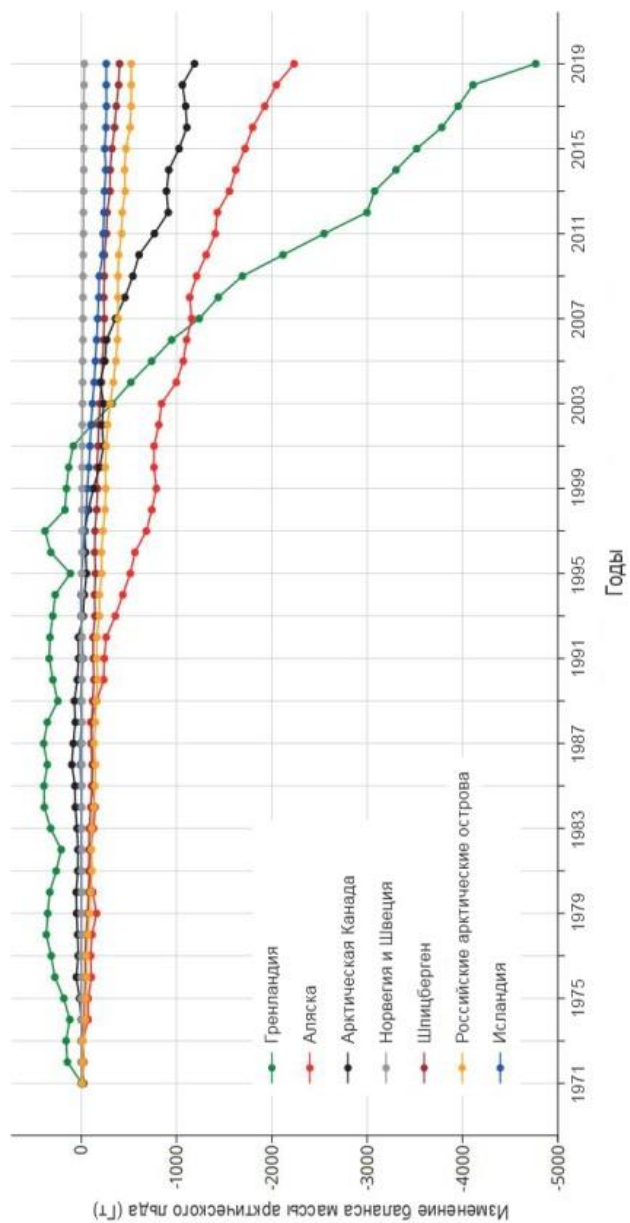


Рис. 8. Изменение баланса массы арктического льда на суше в 1971–2019 гг. (AMAP, 2021)

В 2009–2017 гг. масса льда особенно интенсивно уменьшалась в секторах морей Амундсена и Беллинсгаузена в Западной Антарктиде (159 ± 8 Гт/год), у побережья Земли Уилкса в Восточной Антарктиде (51 ± 13 Гт/год), а также у западных и северо-восточных берегов материка (42 ± 5 Гт/год) (Rignot et al., 2019).

В Гренландии потеря льда оценивалась в 2000 г. в 443 ± 44 Гт/год, в 2005 г. достигла 500 ± 50 Гт/год, а в течение 2005–2019 гг. оставалась стабильной на уровне от 483 до $505 \pm \sim 50$ Гт/год (Mankoff et al., 2020). Таким образом, деградация гренландского щита в последние годы усиливается: в настоящее время это приводит к повышению среднего уровня моря примерно на $0,7$ мм/год¹⁵. При этом в отдельные сезоны оно существенно выше: например за два аномально теплых летних месяца 2019 г. Гренландия потеряла 600 Гт льда, что, по оценкам, вызвало подъем уровня Мирового океана на $2,2$ мм (Velicogna et al., 2020).

Уровень Мирового океана

Подъем уровня Мирового океана продолжается, при этом тенденция к ускорению этого процесса сохраняется. За весь XX в. он составил примерно 17 см и далее возрастал с $3,04$ в 1997–2006 гг. до $4,36$ мм/год в 2007–2016 гг. (WMO, 2019), а по данным серии работающих с начала 1990-х гг. спутников за последние 10 лет уровень моря поднимался в среднем на $4,8$ мм/год (Voosen, 2020)¹⁶. Общий уровень моря поднялся примерно на 90 мм с начала 1990-х гг. (рис. 9).

¹⁵ go.nature.com/3mrkuw8

¹⁶ С начала 1993 г. по настоящее время глобальная средняя скорость повышения уровня моря по данным альтиметрии составляла $3,3 \pm 0,3$ мм/год (WMO, 2021)

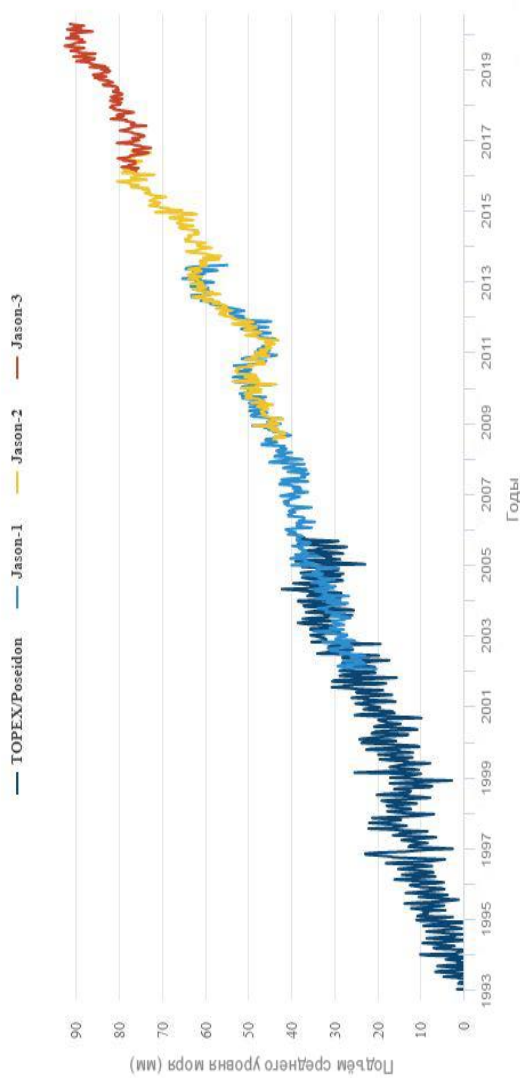


Рис. 9. Повышение глобального среднего уровня моря на основе спутниковых данных NOAA (по результатам миссий TOPEX/Poseidon и Jason) с января 1993 г. по настоящее время. Добавлена поправка на глобальный средний изостатический отскок 0,3 мм/год. График Carbon Brief с использованием Highcharts¹⁷

¹⁷ <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-first-quarter-of-2020-is-second-warmest-on-record?fbclid=IwAR0cU73jSVz2dnKTffQQYSmpKqN20IpvShgd269Rpb6tMmqh-oMUE3W4NtCM>

Повышение уровня моря чувствительно к температуре поверхности океана: в годы Эль-Ниньо, когда температура немного выше, оно, как правило, происходит быстрее, чем в годы Ла-Нинья. Так, уровень моря заметно повышался с 2014 по 2016 г., однако эти относительно небольшие колебания не нарушили общую тенденцию долговременных изменений

Подъем уровня Мирового океана обусловлен сочетанием двух факторов: таяния ледяного покрова (ледников и ледяных щитов) и теплового расширения воды при ее нагревании (по современным оценкам их вклад составляет 70 и 30 % соответственно). Первоначально в этом процессе главная роль принадлежала тепловому расширению океанской воды, но начиная примерно с 2000 г. таяние ледников и разрушение ледяных щитов Антарктики и Гренландии превысили эффекты теплового расширения и продолжают доминировать до настоящего времени. С 1970 г. антропогенное воздействие стало основной причиной ускоренного повышения уровня моря в глобальном масштабе (WMO, 2019) и наблюдаемого повышения температуры поверхности океана, которое распространяется и на его более глубокие слои (IPCC, 2021).

Морской лед

В Северном Ледовитом океане наблюдается уменьшение площади морского льда, наиболее сильное в сентябре: $-13,1\%$ за десятилетие к 2020 г. относительно среднего показателя 1981–2010 гг. Кроме того арктический морской лед становится моложе и тоньше (рис. 10, 11).

В отличие от Северного Ледовитого океана, площадь и объем морского льда в Южном океане не демонстрируют существенной тенденции к изменениям, что может быть связано с региональными особенностями и большой собственной изменчивостью (IPCC, 2021).

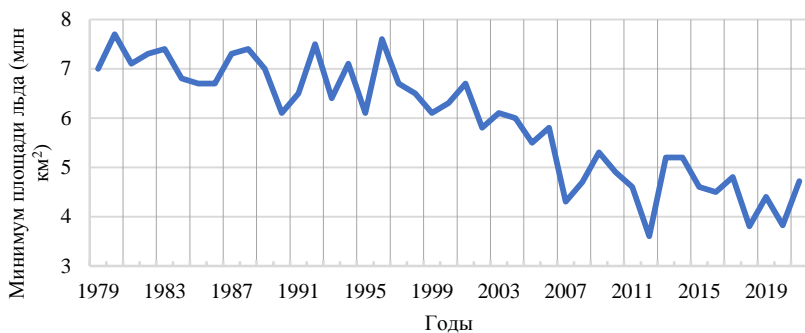


Рис. 10. Минимальная (сентябрьская) площадь арктического морского льда в период 1979–2021 гг. по данным Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC)

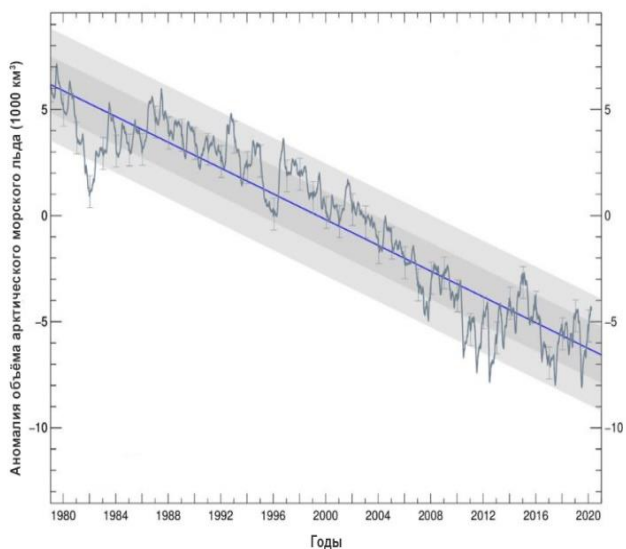


Рис. 11. Аномалии объёма арктического морского льда в период 1979–2020 гг. по данным PIOMAS¹⁸

¹⁸ <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-first-quarter-of-2020-is-second-warmest-on->

Соленость океана

Соленость значительно различается в разных частях Мирового океана. Отмечается опреснение северного и западного бассейнов Тихого океана и повышение максимумов солености в субтропической Атлантике. Влияние человека способствовало наблюдаемым изменениям солености приповерхностных и подповерхностных слоев океана с середины XX в. (IPCC, 2021). Последние исследования указывают на рост контраста между этими слоями. Предполагается, что различия между регионами с высокой и низкой соленостью связаны

с интенсификацией глобального гидрологического цикла. Согласно данным, полученным в основном с буев Арго, разница между средней соленостью верхнего 2-километрового слоя в регионах с ее наибольшим и наименьшим значениями выросла на $1,9 \pm 0,6 \%$ с 1960 по 1990 г. и на $3,3 \pm 0,4 \%$ с 1991 по 2017 г. ($5,2 \pm 0,4 \%$ за 1960–2017 гг.), причем этот рост связан с антропогенным сигналом (Cheng et al., 2020).

Кислотность вод Мирового океана

В поверхностном слое океана водородный показатель pH снизился по сравнению с доиндустриальным периодом в основном в результате поглощения углекислого газа. Согласно оценкам, сделанным на основе рядов наблюдений за 15 и более лет, скорость снижения pH (т. е. закисления вод Мирового океана) составила $0,017\text{--}0,027$ единиц за десятилетие¹⁹.

record?fbclid=IwAR0cU73jSVz2dnKTtfQQYSmpKqN20IpvShgd269Rp6tMmqh-oMuE3W4NtCM

¹⁹ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/09_SROCC_Ch05_FINAL-1.pdf

Экстремальность климата

Сохраняется тенденция последних десятилетий к увеличению числа опасных гидрометеорологических явлений. При этом согласно статистике страховых агентств (рис. 12), оценивающих степень опасности по размеру нанесенного материального ущерба, основной вклад в такое увеличение вносят наводнения (осадки) и погодные катаклизмы, вызванные в первую очередь ветром (ураганы, штормы, смерчи, торнадо и пр.).

Существует высокая степень уверенности в том, что основным фактором наблюдаемого увеличения вероятности и опасности экстремальных явлений в глобальном и континентальном масштабах было увеличение выбросов парниковых газов, частично компенсируемое увеличением количества аэрозолей (IPCC, 2021). В то же время каждый тип погодных аномалий обладает собственной «индивидуальностью», и его особенности необходимо анализировать отдельно от остальных. Это главным образом вызвано тем, что за возникновение тех или иных погодных катаклизмов «ответственны» разные цепочки развивающихся в климатической системе процессов. Эти цепочки изучены с разной степенью подробности, что и отражается на достоверности наших знаний о каждом отдельном случае.

Согласно исследованиям, от современных антропогенных изменений климата в наибольшей степени зависит возникновение волн тепла и холода, засух и сильных ливней (рис. 13, а также NASEM, 2016; Fowler et al., 2021).

Область под биссектрисой показывает, за счет чего можно надежнее устанавливать причины изменения статистики погодных аномалий. Чем дальше от начала координат и ближе к биссектрисе, тем выше уровень связи. Кружки, определяющие различные типы аномалий, не могут располагаться над биссектрисой, так как в этом случае оказалось бы, что установление наличия аномалии произошло при отсутствии адекватного понимания причинно-следственной связи, ее породившей.

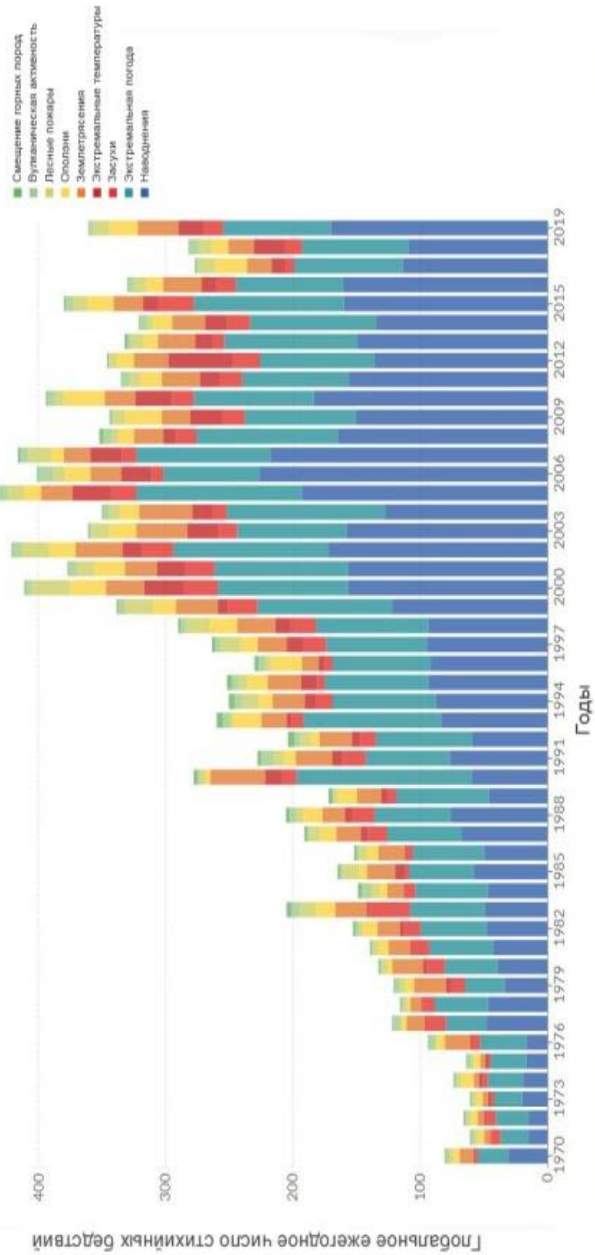


Рис. 12. Число опасных природных явлений, нанесших значительный материальный ущерб в период 1970–2019 гг.²⁰

²⁰ <https://ourworldindata.org/grapher/natural-disasters-by-type>

Волны тепла были самой смертоносной метеорологической опасностью в период 2015–2020 гг., наибольшие экономические потери были связаны с тропическими циклонами (GC, 2019, а также <http://thoughtleadership.aon.com/Documents/20210125-if-annual-cat-report.pdf>).

В 2019–2020 гг. наметилась тенденция к расширению зоны лесных пожаров: наряду с традиционными пожароопасными регионами (Австралией, Сибирью, лесами Амазонки) они охватили беспрецедентно большие площади в Арктике, доселе не подвергавшиеся возгоранию.

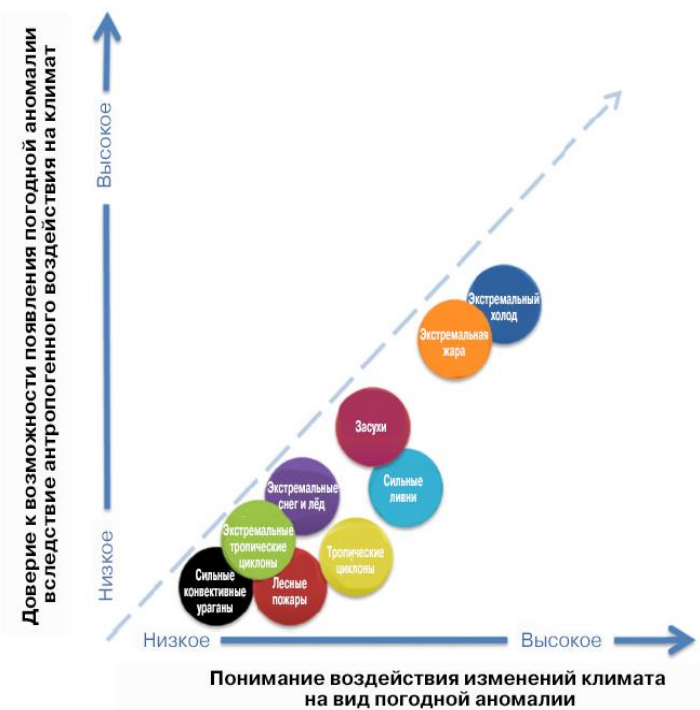


Рис. 13. Схема, иллюстрирующая соотношение между современным пониманием воздействия изменений климата на отдельные виды погодных аномалий и вероятной причастностью антропогенного влияния на возникновение этих аномалий (согласно NASEM, 2016)

Причины наблюдаемых изменений климата

Расширяющийся круг исследований (см., например, Росгидромет, 2014), использующих формальные статистические методы выделения вклада отдельных внешних воздействий в наблюдаемое глобальное потепление, показывает, что вклад антропогенного роста атмосферной концентрации парниковых газов в температурный тренд с середины XX в. был наибольшим (больше наблюдаемого тренда), а суммарное воздействие остальных факторов только ослабляло рост температуры. Гипотезы о доминирующей роли естественных климатических факторов в наблюдаемых температурных изменениях не находят надежных научных подтверждений (Росгидромет, 2017).

Согласно Шестому оценочному докладу МГЭИК (IPCC, 2021), не вызывает сомнений тот факт, что разогрев атмосферы, океана и суши произошел под влиянием человека. Это привело к широкомасштабным и быстрым изменениям в атмосфере, океане, криосфере и биосфере, беспрецедентным на протяжении многих столетий и тысячелетий. Антропогенное изменение климата уже влияет на многие погодные и климатические экстремальные явления во всех регионах Земного шара. Доказательства связи повышения повторяемости таких явлений (волны тепла, обильные осадки, засухи, тропические циклоны и пр.) с антропогенным фактором усилились со времени публикации Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бардин М. Ю., Ранькова Э. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф., Корнева И. А. (2020). Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. № 5. С. 29–45.

Росгидромет (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. А. И. Бедрицкого и др. — М.: Росгидромет, Т. 1, 230 с. и Т. 2, 291 с.

Росгидромет (2014). Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. — М.: Росгидромет. 1009 с.

Росгидромет (2017). Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. — СПб: Росгидромет. 105 с.

Росгидромет (2021). Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. — М.: Росгидромет. 104 с.

AMAP (2015). AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. — Oslo. 139 p. URL: <https://www.amap.no/documents/download/2499/inline>.

AMAP (2017). Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). — Oslo, Norway. xiv + 269 p. URL: <https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>.

AMAP (2021). Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts, Summary for Policy-Makers. URL: <https://www.amap.no/documents/download/6730/inline>.

Azarin-Molina C., Dunn R. J. H., Mears C. A., Berrisford P., McVicar T. R., Nicolas J. P. (2019). Surface winds / In: State of the Climate in 2018 // Bulletin of the American Meteorological Society. V. 100, № 9. P. S43–S45. URL: <https://doi.org/doi:10.1175/2019BAMSSStateoftheClimate.1>.

Betts R. A., Jones C. D., Knight J. R., Keeling R. F., Kennedy J. J. (2016). El Niño and a record CO₂ rise // Nature Climate Change. URL: <https://doi.org/10.1038/nclimate3063>.

Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D. A., Schoeneich P., Romanovsky V. E., Lewkowicz A. G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W. L., Christiansen H. H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etzelmüller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel C., Lanckman J.-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I. N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H. (2019). Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. V. 10, № 1. P. 264–274. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.

Cheng L., Trenberth K. E., Gruber N., Abraham J. P., Fasullo J. T., Li G., Mann M. E., Zhao X., Zhu J. (2020). Improved Estimates of Changes in Upper Ocean Salinity and the Hydrological Cycle // Journal of Climate. V. 33. P. 10357–10381. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0366.1.

Clem K. R., Fogt R. L., Turner J., Lintner B. R., Marshall G. J., Miller J. R., Renwick J. A. (2020). Record warming at the South Pole during the past three decades // Nature Climate Change. V. 10. P. 762–770.

CRU-4 (2020): *Harris I., Osborn T. J., Jones P., Lister D.* (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. V. 7. P. 109. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

DEL (2001): *Willmott C. J., Matsuura K.* (2001). Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950–1999) / Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware. URL: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.ghcn_ts2.html.

ERA-5 (2020): *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C. S., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M. G., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R., Holm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thepaut J.* (2020). The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. V. 146. P. 1999–2049. URL: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Fowler H. J., Lenderink G., Prein A. F. Westra S., Allan R. P., Ban N., Barbero R., Berg P., Blenkinsop S., Do H. X., Guerreiro S., Haerter J. O., Kendon E. J., Lewis E., Schaer C., Sharma A., Villarini G., Wasko C., Zhang X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes // *Nature Reviews Earth & Environment*. URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>.

Garfinkel C. I., Gordon A., Oman L. D., Li F., Davis S., Pawson S. (2018). Nonlinear response of tropical lower-stratospheric temperature and water vapor to ENSO // *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 18 (7). P. 4597–4615. <https://doi.org/10.5194/acp-18-4597-2018>.

GC (2019). The Global Climate in 2015–2019. — WMO. 24 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9936.

GISTEMP v4 (2019). GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4 / NASA Goddard Institute for Space Studies. URL: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

Grise K., Davis S., Staten P., Adam O. (2018). Regional and Seasonal Characteristics of the Recent Expansion of the Tropics // *Journal of Climate*. V. 31 (17). DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0060.1.

Grise K. M., Davis S. M. (2020). Hadley cell expansion in CMIP6 models // *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 20 (9). P. 5249–5268. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-20-5249-2020>.

HadCRUT4 (2012): *Morice C. P., Kennedy J. J., Rayner N. A., Jones P. D.* (2012). Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset // *Journal of Geophysical Research*. V. 117, D08101. DOI: 10.1029/2011JD017187.

Harris I., Osborn T. J., Jones P., Lister D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded 33 multivariate climate dataset // *Nature Scientific Data*. V. 7 (1), 109. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

Hirabayashi Y., Nakano K., Zhang Y., Watanabe S., Tanoue M., Kanae S. (2016). Contributions of natural and anthropogenic radiative forcing to mass loss of Northern Hemisphere mountain glaciers and quantifying their uncertainties // *Nature Scientific Reports*. V. 6, 29723. DOI: 10.1038/srep29723.

IPCC (2013). Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 3–29) / T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). — Cambridge University Press.

IPCC (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.). 765 p.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.). — Cambridge University Press. 3949 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.

JRA-55 (2015): *Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebata A., Morita M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K.* (2015). The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II. V. 93 (1). P. 5–48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001.-

Kang S., Zhang Y., Qian Y., Wang H. (2020). A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere // *Earths-Science Reviews*. 12 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346>.

Knutson T. R., Zeng F. (2018). Model assessment of observed precipitation trends over land regions: Detectable human influences and possible low bias in model trends // *Journal of Climate*. V. 31 (12). P. 4617–4637. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0672.1>.

Lee J., Sperber K. R., Gleckler P. J., Bonfils C. J. W., Taylor K. E. (2019). Quantifying the agreement between observed and simulated extratropical modes of interannual variability // *Climate Dynamics*. V. 52. P. 4057–4089. URL: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4355-4>.

Li C., Bosch C., Kang S., Andersson A., Chen P., Zhang Q., Cong Z., Chen B., Qin D., Gustafsson Ö. (2016). Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers // *Nature Communications*. V. 7 (1), 12574. DOI: 10.1038/ncomms12574.

Li Q., Sun W., Yun X., Huang B., Dong W., Wang X. L., Zhai P., Jones P. (2021). An updated evaluation of the global mean land surface air temperature and surface temperature trends based on CLSAT and CMST // *Climate Dynamics*. V. 56. P. 635–650.

Mankoff K. D., Solgaard A., Colgan W., Ahlstrøm A. P., Khan S. A., Fausto R. S. (2020). Greenland Ice Sheet solid ice discharge from 1986 through March 2020 // *Earth System Science Data*. V. 12. P. 1367–1383. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1367-2020>.

Manney G. L., Hegglin M. I. (2018). Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalyses // *Journal of Climate*. V. 31 (1). P. 423–448. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0303.1>.

Marty C., Tilg A.-M., Jonas T. (2017). Recent evidence of large-scale receding snow water equivalents in the European Alps // *Journal of Hydrometeorology*. V. 18, Issue 4. P. 1021–1031. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0188.1.

Marzeion B., Jarosch A. H., Gregory J. M. (2014). Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change // *The Cryosphere*. V. 8 (1). P. 59–71. DOI: 10.5194/tc-8-59-2014.

Mastrandrea M. D., Mach K. J., Plattner G.-K., Edenhofer O., Stocker T. F., Field C. B., Ebi K. L., Matschosset P. R. (2011). The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: A common approach across the working groups // *Climatic Change*. V. 108. P. 675–691.

MERRA-2 (2017): *Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyk G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B.* (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *Journal of Climate*. V. 30 (14). P. 5419–5454. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/14/jcli-d-16-0758.1.xml>.

Molina L. T., Gallardo L., Andrade M., Baumgardner D., Borbor-Córdova M., Bórquez R., Casassa G., Cereceda-Balic F., Dawidowski L., Garreaud R., Huneeus N., Lambert F., McCarty J. L., Mc Phee J., Mena-Carrasco M., Raga G. B., Schmitt C., Schwarz J. P. (2015). Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere // *Earth's Future*. V. 3. P. 345–369. DOI: 10.1002/2015EF000311.

NASEM (2016): National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2016). Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change. — Washington, DC: The National Academies Press. 144 p. DOI: 10.17226/21852.

NCEP/NCAR (1996): *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R.,*

Jenne R., Joseph D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of American Meteorological Society. V. 77. P. 437–470.

Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., Manning M. R., Lowry D., Fisher R. E., France J. L., Michel S. E., Miller J. B., White J. W. C., Vaughn B., Bousquet P., Pyle J. A., Warwick N. J., Cain M., Brownlow R., Zazzeri G., Lanoisellé M., Manning A. C., Gloor E., Worthy D. E. J., Brunke E. G., Labuschagne C., Wolff E. W., Ganesan A. L. (2016). Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift // Global Biogeochemical Cycles. V. 30. P. 1356–1370.

NOAAGlobalTemp (2015): Zhang H.-M., Huang B., Lawrimore J., Menne M., Smith T. M. (2015). NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 4.0 / NOAA National Centers for Environmental Information. DOI: 10.7289/V5FN144H.

Rignot E., Mouginota J., Scheuchla B., van den Broeked M., van Wessemd M. J., Morlighem M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017 // Proceedings of the National Academy of Sciences. 9 p. URL: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1812883116.

Skiles S. M., Flanner M., Cook J. M., Dumont M., Painter T. H. (2018). Radiative forcing by light-absorbing particles in snow // Nature Climate Change. V. 8 (11). P. 964–971. DOI: 10.1038/s41558-018-0296-5.

Velicogna I., Mohajerani Y., Landerer G. A. F., Mouginot J., Noel B., Rignot E., Sutterley T., van den Broeke M., van Wessem M., Wiese D. (2020). Continuity of Ice Sheet Mass Loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-On Missions // Geophysical Research Letters. URL: <https://doi.org/10.1029/2020GL087291>.

Voosen P. (2020). Seas are rising faster than ever // Science. V. 370, Issue 6519. P. 901. DOI: 10.1126/science.370.6519.901.

Vuille M., Carey M., Huggel C., Buytaert W., Rabatel A., Jacobsen D., Soruco A., Villacis M., Yarleque C., Timm O. E., Condom T., Salzmann N., Sicart J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes — Impacts, uncertainties and challenges ahead // Earth-Science Review. V. 176. P. 195–213. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.09.019.

WMO (2018). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018 / Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 58. 588 p. URL: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-05/SAP-2018-Assessment-report.pdf>.

WMO (2019). The Global Climate in 2015–2019. 24 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9936.

WMO (2021). State of the Global Climate 2020 / WMO. № 1264. 56 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618.

Zhang Y., Kang S., Sprenger M., Cong Z., Gao T., Li C., Tao S., Li X., Zhong X., Xu M., Meng W., Neupane B., Qin X., Sillanpää M. (2018). Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau // *The Cryosphere*. V. 12. P. 413–431. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-12-413-2018>.

Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P. J., Wang X. (2019). Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. V. 116, № 48. P. 23947–23953. URL: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1915258116.

Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature*. V. 568 (7752). P. 382–386. DOI: 10.1038/s41586-019-1071-0.

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ И ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ
АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

Е. И. Хлебникова, В. А. Задворных, В. В. Стадник

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbyshev st. 7

E-mail: khlebnikova_e@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022
Поступила после доработки 15.09.2022

Введение

Изменение климата Земли в значительной степени определяется глобальным энергетическим балансом. Наряду с данными о радиационных потоках на верхней границе атмосферы, получаемыми в настоящее время в рамках спутниковых программ наблюдений, для анализа изменений климата принципиальное значение имеет слежение за различными компонентами радиационного баланса земной поверхности. Закономерности изменения солнечной радиации, достигающей земной поверхности, существенно зависят от особенностей изменения облачности и прозрачности атмосферы, определяемой вариацией ее газового и аэрозольного состава. Структура временной изменчивости приходящей радиации весьма сложна и содержит большой вклад долгопериодных колебаний, обусловленных как антропогенными, так и естественными причинами.

Первые работы, в которых было обращено внимание на значительные междесятилетние колебания в изменении солнечной радиации, приходящей к земной поверхности, относятся к началу 1990-х годов. Среди наиболее ранних исследований по этому вопросу следует отметить работы отечественных специалистов, где эта крупномасштабная тенденция была выявлена на значительной части Евразийского континента (Житорчук и др., 1994; Abakumova et al., 1996). Уменьшение прихода солнечной радиации, начавшееся в 1950-х и продолжавшееся до конца 1980-х годов, было зафиксировано и в других регионах земного шара (Stanhill, Cohen, 2001). В последующие десятилетия повышенный интерес проявляется к анализу влияния (прямого или косвенного) аэрозолей и облачности на обнаруживаемые крупномасштабные особенности изменения солнечной радиации (Forster et al., 2021).

Во Втором Оценочном докладе (2014) обсуждались основные закономерности многолетних изменений радиационных характеристик на территории России. В частности, обращалось внимание как на уменьшение прихода солнечной радиации в 1960-е – 1980-е годы, так и на ослабление к концу XX в. отрицательной тенденции в поступлении прямой солнечной радиации.

В настоящей работе рассматриваются современные региональные особенности изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности (прямой солнечной, рассеянной, суммарной радиации) с учетом данных наблюдений за 1961-2020 гг. Кроме того, представлены результаты сопутствующего анализа климатических изменений характеристик облачного покрова на территории России.

Данные и методика их обработки

Информационной основой исследования являются данные наземных наблюдений на актинометрической сети Росгидромета, которая в целом сформировалась в 60-х годах XX в. По состоянию на январь 2018 г. сеть насчитывала 168 пунктов наблюдений (Луцько и др., 2018), в том числе около 100 станций, ведущих

наблюдения по полной программе, которая позволяет осуществлять оценку радиационного баланса и его коротковолновых составляющих. При этом на станциях, выполняющих непрерывные наблюдения, определяются часовые суммы составляющих радиационного баланса. На станциях, выполняющих «срочные» наблюдения, радиационный баланс и его составляющие измеряются в фиксированные сроки (0:30, 6:30, 8:30, 12:30, 15:30, 18:30) по среднему солнечному времени. Эти данные используются для получения месячных сумм составляющих радиационного баланса путем численного интегрирования.

Из двух указанных видов актинометрических наблюдений, выполняемых по полной программе, при анализе климатических изменений предпочтение отдано срочным наблюдениям в силу большего количества этих станций (около 70) на территории России. Кроме того, существенно, что для большинства действующих станций со срочными наблюдениями (в отличие от станций, ведущих наблюдения с помощью регистраторов) привлечение исторических данных из актинометрических ежемесячников дает возможность рассчитать нормы за базовый период 1961–1990 гг.

Для анализа тенденции климатических изменений в рамках задачи мониторинга радиационного режима рассматривались пространственно-осредненные аномалии сезонных и годовых сумм основных составляющих радиационного баланса (прямой солнечной, рассеянной и суммарной радиации). Под аномалиями понимались отклонения соответствующих величин от средних многолетних значений за 1961–1990 гг., выраженные в процентах. По отношению к сезонным аномалиям осреднение производилось для всей территории России, а осредненные значения годовых аномалий определялись для отдельных физико-географических регионов, таких как Европейская часть России, Западная Сибирь, Средняя Сибирь, Прибайкалье и Забайкалье, Восточная Сибирь, Приамурье и Приморье (Хлебникова, Салль, 2014; Доклад Росгидромета, 2021).

В процессе выполнения срочных наблюдений отмечают общее количество облаков и количество облаков нижнего яруса, а также формы всех наблюдаемых облаков. Важно подчеркнуть, что — в отличие от наблюдений за облачностью, выполняемых

в синоптические сроки — на актинометрической сети характеристики облачности определяются по среднему солнечному времени. Это обстоятельство дает возможность сформировать однородные ряды характеристик облачности, относящихся к фиксированному сроку, без проведения интерполяционных процедур.

В рамках данной работы анализу подвергались средние за месяц значения общего количества облаков и количество облаков нижнего яруса (в баллах), а также повторяемость (число случаев) следующих форм облачности: кучевые (Cu), кучево-дождевые (Cb), перистые (Ci), перисто-кучевые (Cc), перисто-слоистые (Cs) и слоисто-дождевые (Ns). Изучение долговременных тенденций характеристик облачности было основано на рядах сезонных аномалий количества облаков (в баллах), а также сезонных аномалий такой величины как отношение числа случаев с наличием облачности определенного вида к общему числу случаев с наличием облаков.

Особенности климатических изменений основных составляющих радиационного баланса земной поверхности в регионах России

Антропогенное воздействие на климат сопровождается модификацией радиационных потоков в климатической системе. Увеличение выбросов парниковых газов приводит к усилению нисходящего длинноволнового излучения, составляющему по модельным оценкам в настоящее время около 2 Вт/м^2 за десятилетие. Эти оценки подтверждаются высокоточными измерениями теплового излучения, однако таких данных пока еще очень мало (Wild, 2016).

В контексте проблемы изменений климата существенное значение имеют междесятилетние колебания нисходящей коротковолновой солнечной радиации, которые могут быть проанализированы по данным наземных актинометрических наблюдений. Основная особенность глобальных многолетних изменений приходящей к земной поверхности солнечной радиации состоит в уменьшении

поступающей солнечной радиации, начавшемся в 1950-х и продолжавшемся до конца 1980-х годов (Wild, 2009, 2012).

Отмеченная особенность междесятилетних изменений прихода солнечной радиации хорошо проявляется по данным наблюдений российской актинометрической сети (Хлебникова, Махоткина, 2014; Хлебникова, Салль, 2014; Доклад Росгидромета, 2021; Горбаренко, 2016, 2019). Анализ сезонных аномалий прямой радиации, осредненных по территории России (рис. 1), демонстрирует единообразие векового хода аномалий для различных сезонов, свидетельствующее о крупномасштабности воздействия, приведшего к пониженным значениям прямой радиации в последней четверти XX в. на территории России. В начале XXI в. аномалии близки к нулю и значительно отстоят от экстремально низких значений, достигнутых в начале 90-х годов прошлого столетия. В последнее десятилетие XX столетия во всех крупных физико-географических районах России произошел возврат к значениям приходящей радиации, близким к норме.

Анализ многолетних колебаний пространственно-осредненных аномалий годовых сумм прямой радиации показывает, что в начале XXI в. значения, близкие к норме, наблюдаются практически на всей территории России.

В большей степени, чем для других регионов, отклоняются от нормы годовые суммы прямой радиации на территории Средней Сибири (рис. 2), где в течение ряда лет регистрируются отрицательные аномалии.

В Европейской части России, в особенности в центральных и южных районах, сохраняется положительная тенденция в изменении прямой радиации. На фоне резкого снижения рассеянной радиации в начале 90-х годов XX в. суммарная радиации в Европейской части России проявляет слабую, но значимую тенденцию к повышению.

Наблюдаемые в двадцатом столетии особенности в поступлении солнечной радиации к земной поверхности («global dimming» и последующее частичное восстановление прихода радиации — «brightening») являются предметом многочисленных исследований (Sanchez-Lorenzo et al., 2015; Wild et al., 2017), выполненных

в последнее десятилетие после выхода в свет Пятого оценочного доклада МГЭИК.

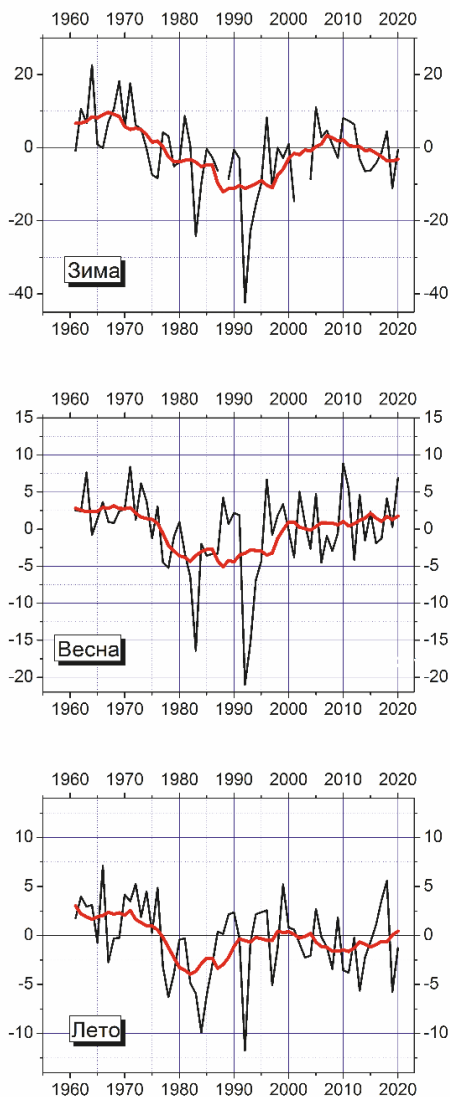


Рис. 1. Аномалии (в процентах от среднего за 1961–1990 гг.) сезонных сумм прямой радиации, приходящей к земной поверхности, осредненные по территории РФ. 1961–2020 гг. (Доклад, 2021)

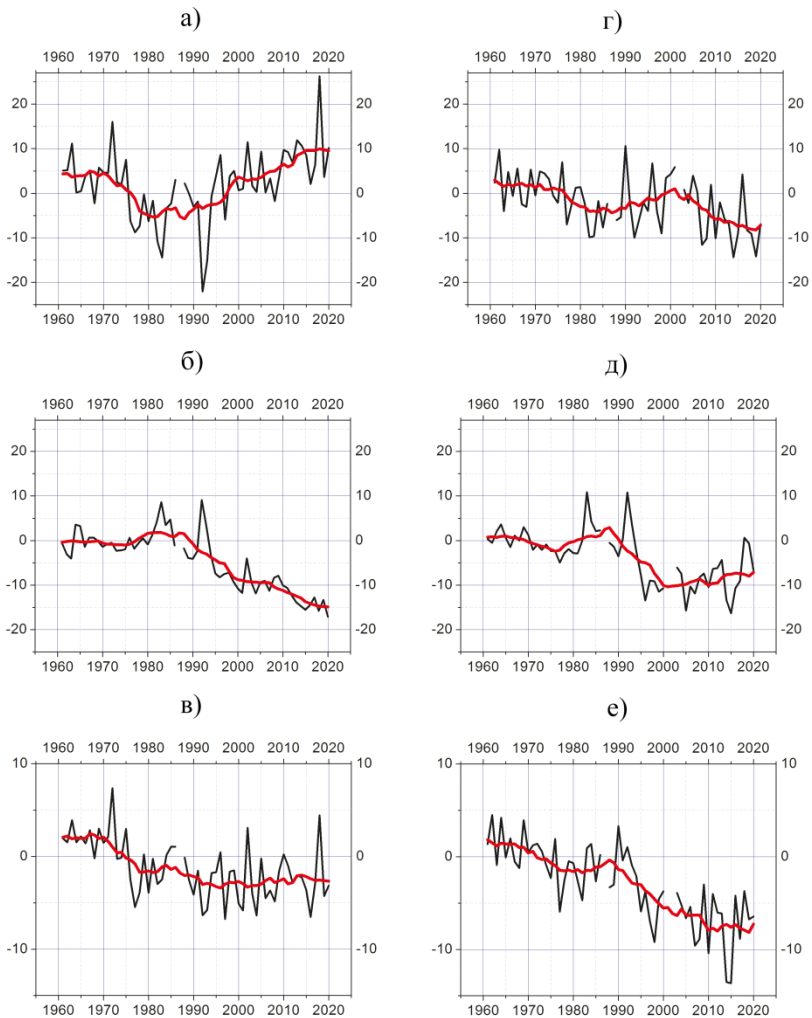


Рис. 2. Регионально-осредненные аномалии (в процентах от среднего за 1961–1990 гг.) годовых сумм прямой (а, г), рассеянной (б, д) и суммарной радиации (в, е). Слева – ЕЧР, справа – Средняя Сибирь.

Во многих работах обсуждаются возможные механизмы возникновения данного явления (Mateos et al., 2014; Wang et al., 2014; Wild, 2016). В настоящее время наиболее распространенной является

точка зрения (Wild, 2016), что облачный покров эффективно модулирует изменения солнечной радиации на межгодовых масштабах, в то время как крупномасштабная долговременная тенденция связана с влиянием аэрозолей — как прямым, так и косвенным (Lohmann, Feiter, 2005). Такая интерпретация подтверждается оценками приходящей солнечной радиации для условий безоблачного неба в Центральной Европе, которые демонстрируют ключевую роль состава атмосферы (прежде всего, аэрозолей) в возникновении выраженных междесятилетних вариаций приходящей радиации (Wild et al., 2021). Эти результаты согласуются с оценками аэрозольной оптической толщины атмосферы, полученными для территории России по данным актинометрических наблюдений (Хлебникова, Махоткина, 2014).

Заметим, что в перспективе на территории России можно будет оценивать климатические изменения длинноволнового излучения (нисходящего и восходящего). Соответствующие измерительные комплексы установлены на ряде станций в процессе модернизации актинометрической сети Росгидромета (Луцько и др., 2018), однако в настоящее время объем накопленной информации еще недостаточен для обобщения.

Климатические изменения облачного покрова над территорией России

Облачность является важнейшим регулятором солнечного и земного излучения и может обеспечивать формирование механизмов обратной связи, обусловленных антропогенными воздействиями. Однако, несмотря на существование большого числа глобальных баз данных по облачности, основанных на разных источниках (Chernokulsky, Mokhov, 2012), к настоящему времени сохраняется большая степень неопределенности в оценке наблюдаемых изменений облачного покрова как глобального, так и регионального масштаба.

В Оценочных Докладах для территории России (Оценочный Доклад, 2008, 2014) основное внимание уделялось изучению региональных тенденций в изменении характеристик облачности

по результатам наземных наблюдений во второй половине XX столетия. Пространственное осреднение характеристик общей облачности для крупных регионов выявило во второй половине XX столетия тенденцию к увеличению общей облачности, наиболее выраженную в Азиатской части России. Однако на рубеже XX–XXI в. сохранения этой тенденции не наблюдалось.

Более устойчивые изменения были обнаружены в отношении распределения разных видов и форм облачности по частоте их повторения (Хлебникова, Салль, 2009). Анализ современных данных, включающих информацию по 2020 г., выполненный по данным наземной актинометрической сети России, позволяет подтвердить и отчасти детализировать сделанные ранее выводы.

В последние десятилетия сохраняется тенденция увеличения частоты появления конвективной облачности, наиболее хорошо выраженная в переходные сезоны, особенно весной.

В летний сезон практически на всей территории России ярко проявляется увеличение частоты облаков верхнего яруса. В остальные сезоны относительное увеличение вклада облачности верхнего яруса отмечается, в основном, в южных районах страны (рис. 3). Продолжается перераспределение вклада дождевой облачности разных типов, проявляющееся в росте доли кучево-дождевых облаков и уменьшении вклада слоисто-дождевой облачности (рис. 4).

Эти выводы хорошо согласуются с оценками, полученными в отношении тенденции изменения осадков разного генезиса по данным метеорологических наблюдений в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2019).

Результаты, касающиеся изменения общей и нижней облачности (в баллах), в большей степени отражают региональную специфику. На европейской территории в весенний и летний сезоны доминирует тенденция к уменьшению общей облачности. В то же время четко проявляется увеличение этого показателя в Западной и Средней Сибири, а также на Дальнем Востоке, Приамурье и Приморье.

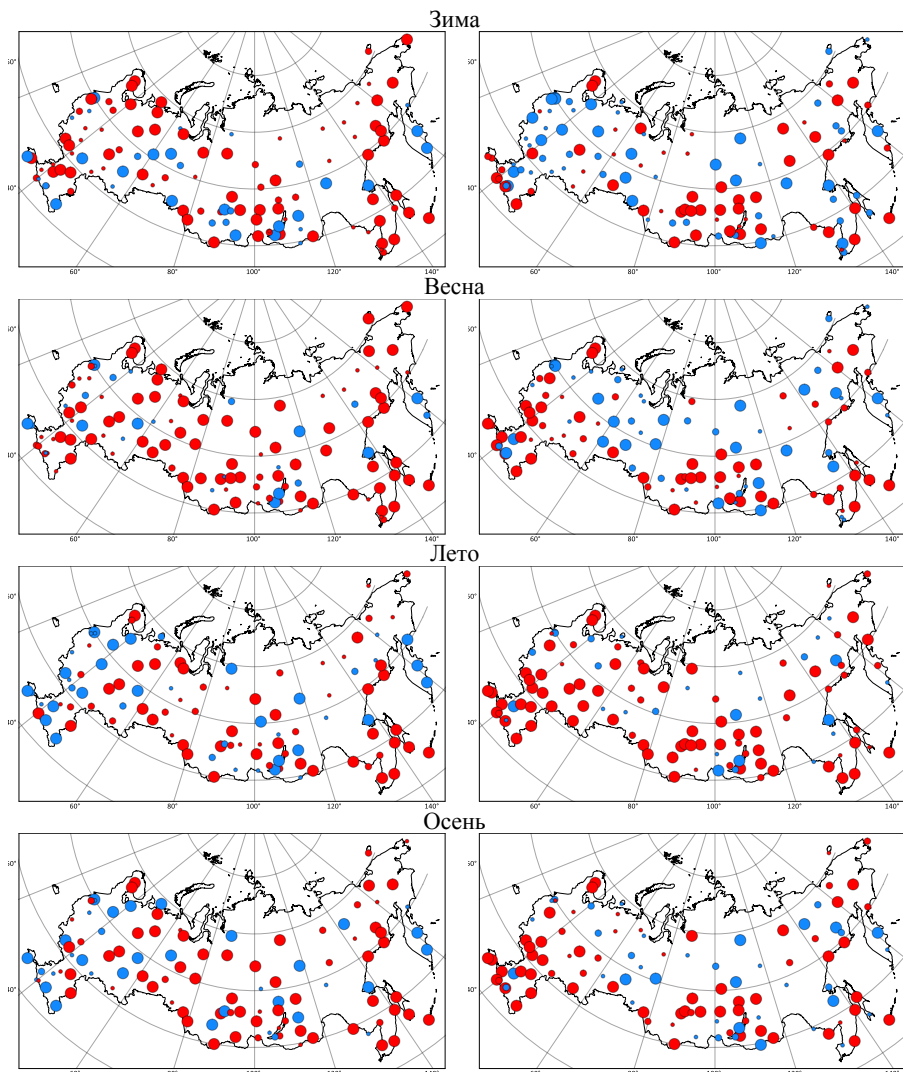


Рис. 3. Изменение вклада (в % от общего числа наблюдений с наличием облаков) различных форм облачности на интервале 1976–2020 гг.

Слева – Cu, Cb, справа – Ci, Cs, Cs

Примечание: Здесь и далее крупными (средними) красными кружками выделены станции с положительным трендом на уровне значимости 5(10) %; синими кружками – то же с отрицательным трендом. Анализ трендов выполнен по методу Манна-Кендалла.

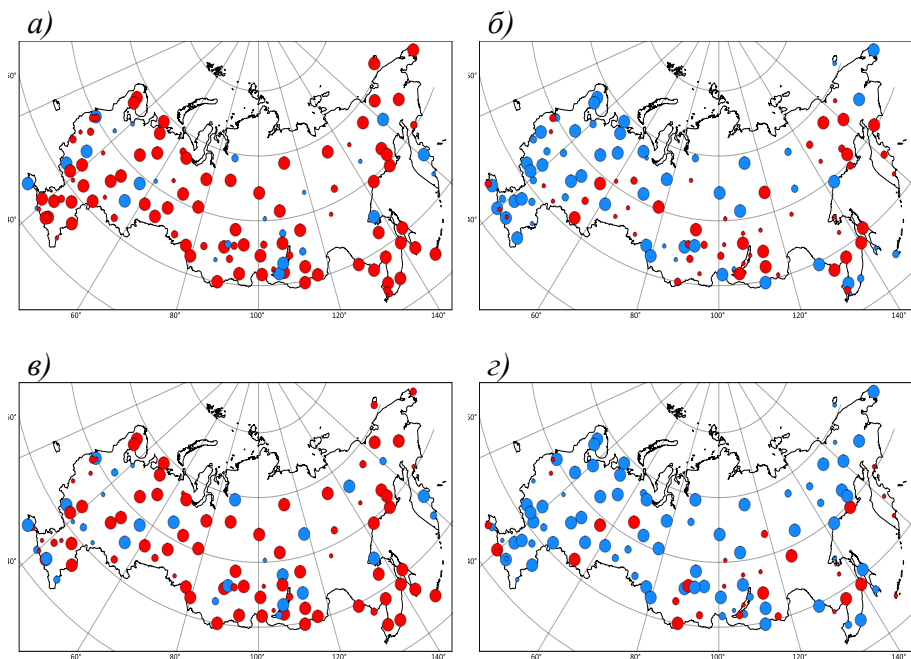


Рис. 4. Изменение вклада (в % от общего числа наблюдений с наличием облаков) различных видов дождевой облачности: Cb (слева) и Ns (справа) весной (а, б) и осенью (в, г) на интервале 1976–2020 гг.

Примечание: Обозначения – см. рис. 3

Многолетние изменения нижней облачности ярко проявляются в переходные сезоны. При этом в ЕЧР и АЧР наблюдаются противоположные тенденции изменения. На азиатской территории отмечается хорошо выраженная тенденция к увеличению нижней облачности и весной, и осенью. В то же время в ЕЧР в эти сезоны доминирует тенденция к уменьшению нижней облачности (рис. 5).

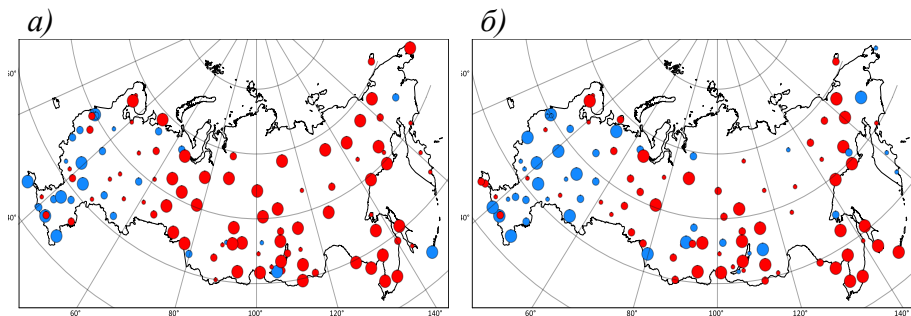


Рис. 5. Изменение количества облаков нижнего яруса в весенний (а) и осенний (б) сезоны на интервале 1976–2020 гг.

Примечание: Обозначения – см. рис. 3

Заключение

Анализ данных актинометрических наблюдений на интервале 1961–2020 гг. позволил сделать выводы о современных особенностях проявления долговременных тенденций в изменении основных составляющих радиационного баланса земной поверхности и характеристик облачного покрова на территории России.

Показано, что в ЕЧР сохраняется положительная тенденция в изменении годовых сумм прямой радиации. На фоне резкого снижения рассеянной радиации в начале 90-х годов XX в. в последующие десятилетия в ЕЧР отмечается слабая тенденция к повышению суммарной радиации. На остальной территории в начале XXI в. значения приходящей радиации близки к норме. В наибольшей степени отклоняются от нормы годовые суммы прямой радиации в Средней Сибири.

В последние десятилетия сохраняется тенденция увеличения частоты появления конвективной облачности, растет доля облачности верхнего яруса. Продолжается перераспределение вклада дождевой облачности разных типов.

Особенности изменения общей и нижней области отражают региональную специфику и согласуются с сохраняющейся в ЕЧР тенденцией к росту прямой радиации. Вместе с тем, при интерпретации результатов важно принимать во внимание сложный характер аэрозольно-облачного взаимодействия и его влияние на величину приходящей радиации.

Работа выполнена при поддержке Программы НИТР Росгидромета (тема 3.2 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга» Плана НИТР на 2020–2024 гг., утвержденного приказом № 745 от 31.12.2019 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Горбаренко Е.В. (2019). Изменчивость солнечного сияния в Москве за период 1955–2017 гг. // Метеорология и гидрология. № 6. С. 24–36.

Горбаренко Е.В. (2016). Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ // Метеорология и гидрология. № 12. С. 5–12.

Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории России за 2020 г. (2021) — М.: Росгидромет. 110 с.

Житорчук Ю.В., Стадник В.В., Шанина И.Н. (1994). Исследование линейных трендов во временных рядах солнечной радиации. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, том 30. № 3, с.389-391.

Луцько Л.В., Ерохина А.Е., Бычкова А.П., Махоткина Е.Л., Махоткин А.Н., Бекенева О.Б. (2018). Актинометрическая сеть Росгидромета: текущее состояние // Труды ГГО. Вып. 589. С. 125–152.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т.1. (2008) — М., Росгидромет.

Хлебникова Е.И., Салль И.А. (2009). Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России // Метеорология и гидрология. № 7. С. 5–13

Хлебникова Е.И., Махоткина Е.Л. (2014). Облачность и радиационный режим. / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации — М.: Росгидромет. С. 110–123.

Хлебникова Е.И., Салль И.А. (2014). Региональные климатические изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности на территории России // Труды ГГО. Вып. 570. С. 34–49.

Abakumova G.M., Feigelson E.M., Russak V.K., Stadnik V.V. (1996). Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness and surface temperature on the territory of the former Soviet Union // *J. Clim.* V. 9. P. 1319–1327.

Chernokulsky A.V., Mokhov I.I. (2012). Climatology of total cloudiness in the Arctic: An intercomparison of observations and reanalyses // *Advances in Meteorology*. V. 2012. 15 p. ID 542093., DOI: 10.1155/2012/542093.

Chernokulsky A.V. et al. (2019). Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 14045001

Forster, P., Storelvmo T., Armour K., Collins W., Dufresne J.-L., Frame D., Lunt D.J., Mauritsen T., Palmer M.D., Watanabe M., Wild M., Zhang H. (2021): The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity / In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate* — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. P. 923–1054/ doi:[10.1017/9781009157896.009](https://doi.org/10.1017/9781009157896.009).

Lohmann U., Feiter J. (2005). Global indirect aerosol effects: a review // *Atmos. Chem. Phys.* V. 5: 715–737/

Mateos D., Sanchez-Lorenzo A., Anton M., Cachorro V.E., Calbo J., Costa M.J., Torres B., Wild M. (2014). Quantifying the respective roles of aerosols and clouds in the strong brightening since the early 2000s over the Iberian Peninsula // *J Geophys Res-Atmos*, V. 119:10,382–10,393.

Sanchez-Lorenzo A., Wild M., Brunetti M., Guijarro J.A., Hakuba M.Z., Calbó J., Mystakidis S., Bartok B. (2015). Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012) // *J. Geophys Res Atmos/* 120. doi:10.1002/2015JD023321.

Wang K., Ma Q., Wang X.Y., Wild M. (2014). Urban impacts on mean and trend of surface incident solar radiation // *Geophysical Research Letters*. V. 13. № 41. P. 4664–4668.

Wild M. (2016). Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. V. 1. № 7. P. 91–107.

Wild M. (2012). Enlightening global dimming and brightening // *Bulletin of the American Meteorological Society*. V. 1. № 93. P. 27–37.

Wild M. Global dimming and brightening: A review. (2009) // Journal of Geophysical Research Atmospheres. V. 12. № 114. P. 1–31: doi:10.1029/2008JD011470.

Wild M., Ohmura A., Schär C., Müller G., Folini D., Schwarz M., Hakuba M., Sanchez-Lorenzo A. (2017). The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: A database for worldwide measured surface energy fluxes //Earth System Science Data. V. 2. № 9. P. 601–613.

Wild, M., S. Wacker, S. Yang, and A. Sanchez-Lorenzo (2021). Evidence for Clear-Sky Dimming and Brightening in Central Europe // Geophysical Research Letters. 48(6). 2020GL092216, doi:10.1029/2020gl092216.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ НА СТАНЦИЯХ РОСГИДРОМЕТА

А. Н. Махоткин, Е. Л. Махоткина

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbyshev st. 7

E-mail: aktinom@mail.ru

Поступила в редакцию 9.04.2022
Поступила после доработки 12.07.2022

Введение

В результате проведенных в последние десятилетия работ по модернизации актинометрической сети для непрерывной регистрации составляющих радиационного баланса на 22 станциях были установлены и введены в эксплуатацию автоматизированные актинометрические комплексы (ААК), оснащенные датчиками фирмы Kipp&Zonen. ААК по стандартной программе обеспечивает наблюдения за прямой солнечной (S), рассеянной (D), суммарной (Q), отраженной (Rk), а также уходящей (Eu) и приходящей (Ed) длинноволновой радиацией (Луцько и др., 2018). Первые комплексы были введены в эксплуатацию в 2013, последние — в 2018 г. Это обеспечило организацию на сети Росгидромета регулярных наблюдений за длинноволновой радиацией.

В соответствии с руководящими документами ОСТ 52.04.10-82 и ИЗМ № 1/45-2019 РД 52.04.562-96, длинноволновая радиация — это энергетическая освещенность, создаваемая излучением с длиной волны более 4 мкм; длинноволновая земная (уходящая) радиация

определяется как энергетическая освещенность, создаваемая собственным излучением поверхности земли, а длинноволновая атмосферная (приходящая) радиация — как энергетическая освещенность, создаваемая тепловым излучением атмосферы.

Сбор информации ААК осуществляет ГГО в соответствии с порядком, установленным в (ИЗМ № 1/45-2019 РД 52.04.562-96, 2020). По состоянию на конец 2022 г. информация поступала с 19 пунктов.

Цель настоящей работы — обобщение эмпирических данных о длинноволновых составляющих радиационного баланса (приходящей E_d и уходящей E_u длинноволновой радиации) для определения критериев их контроля.

Организация наблюдений за длинноволновой радиацией

Измерения длинноволновых составляющих радиационного баланса на сети Росгидромета выполняются с помощью пиргеометров CGR4 фирмы Kipp&Zonen (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид пиргеометра CGR4

Пиргеометр имеет следующие технические характеристики:

- спектральный диапазон от 4,5 до 42 мкм;
- чувствительность от 5 до 10 мкВ/Вт м⁻²;
- сопротивление от 40 до 200 Ом;
- инерция менее 18 с;

- зависимость чувствительности от температуры:
 - при температуре от -40 до -20 °С менее 5 %;
 - при температуре от -20 до $+50$ °С менее 1 %;
- погрешность суммарного значения при измерении в течение дня менее 3 %.

Пиргеометры CGR4 фирмы «Kipp&Zonen», входящие в состав ААК, калибруются в отделе метрологии ГГО по эталонному пиргеометру CGR4 зав. № 100210, на специальной установке CFI фирмы «Kipp&Zonen».

Эталонный пиргеометр ГГО раз в пять лет калибруется по Международному эталону длинноволновой радиации (WISG — World Infrared Standard Group) на базе Мирового Радиационного Центра (г. Давос, Швейцария).

Для регистрации длинноволнового излучения атмосферы пиргеометр размещается на трекере ААК и постоянно затеняется экраном (зачерненным шаром), а для регистрации земного излучения — на торце стойки-стрелы, при этом его приемная поверхность обращена вниз (рис. 2).

а)



б)



Рис. 2. Размещение пиргеометра, измеряющего E_d , на трекере (а) и пиргеометра, измеряющего E_g , на стойке (б)

Сбор показаний актинометрических датчиков ААК, преобразование их в цифровой код и передача информации в персональный компьютер со специализированным программным

обеспечением осуществляется контроллером. Дискретность получения выходной информации 1 мин.

В результате обработки первичной информации ежемесячно формируются файлы данных минутных и среднечасовых значений длинноволновой радиации. Интервал осреднения определяется по истинному солнечному времени.

Наряду с данными о радиации в файлах содержатся средние часовые или минутные метеорологические характеристики:

- температура воздуха, °С;
- относительная влажность воздуха, %;
- атмосферное давление, гПа;
- скорость ветра, м/с;
- температура подстилающей поверхности, °С.

За сутки файлы с минутными данными содержат 1440, а файлы со среднечасовыми данными — 24 записи.

Кроме того, формируются электронные таблицы часовых сумм E_d и E_u , аналогичные по структуре таблицам ТМ-13 (РД 52.04.562-96, 1997).

При проведении наблюдений по ААК результаты измерений длинноволновой радиации используются для получения радиационного баланса (B), рассчитываемого по данным о суммарной (Q), отраженной (R_k) и длинноволновых составляющих E_d и E_u :

$$B = Q - R_k + E_d - E_u.$$

Экспериментальные данные о длинноволновой радиации

Поскольку до внедрения ААК наблюдения за длинноволновой радиацией на актинометрической сети Росгидромета не проводились, экспериментальные данные о E_d и E_u немногочисленны. Так, в монографии Ю. Д. Янишевского (1957) приведена зависимость E_d от температуры воздуха:

$T, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40
$E_d, \text{кВт/м}^2$	0,370	0,425	0,486	0,553

По его оценкам E_d изменяется в пределах от 0,105 до 0,419 кВт/м², а в условиях сплошной облачности может достигать 0,524 кВт/м².

В классическом учебнике метеорологии П. Н. Тверского (1962) приведены данные:

	T = 273K	T = 300 K
E_u , кВт/м ²	0,316	0,461
E_d , кВт/м ²	0,279	0,349
E_d макс, кВт/м ²	0,419	0,489

В докладах Межправительственной группы по изучению климатических изменений (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) неоднократно отмечалось, что наибольшее влияние на уходящую длинноволновую радиацию оказывают такие факторы, как изменение температуры подстилающей поверхности, вариации атмосферных профилей температуры и влажности, свойства облаков, концентрация парниковых газов и аэрозолей. В настоящее время единственным способом определения этих параметров в глобальном и региональном масштабах, позволяющим восстанавливать значения E_u на верхней границе атмосферы, являются данные приборов спутникового базирования. Например, запущенный на борту спутника «Aqua» гиперспектральный комплекс AIRS/AMSU позволяет получать значения интенсивности E_u с погрешностью не более 2 Вт/м² (Suskind et al., 2003; Aumann et al., 2003).

Таблица 1

Годовой ход средних месячных значений уходящей длинноволновой радиации для территории Алтайского края по данным гиперспектрального комплекса AIRS/AMSU для периода 2003–2012 гг. (Волков и др., 2014)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
E_u , Вт/м ²	210	215	234	255	268	278	282	280	270	253	230	216

Данные о длинноволновой радиации, полученные по спутниковым данным, приводятся в работах (Волков и др., 2014, Козодеров и др., 1989). Представленные в таблице 1 данные получены из глобального

архива орбитальных спутников NOAA, период осреднения 1975–1977 гг. (табл. 1 и 2).

В 2015 г. Р. В. Бекряев опубликовал работу, в которой по данным измерений E_d и E_u , выполненных с использованием пиргеометра Эппли на станциях Нью Алесунд (Шпицберген) и Барроу (Аляска) за период 1993–2014 гг., были проанализированы изменения нисходящей длинноволновой радиации и эффективного излучения. Было установлено, что рассматриваемый период характеризуется значительным ростом среднегодовых значений $E_{d\text{cp.}}$, достигающих 5 Вт/м^2 . При этом фактические данные о средних значениях уходящей длинноволновой радиации приведены только для января (см. табл. 3).

Таблица 2

Среднегодовые значения уходящей длинноволновой радиации для четырех ЭАЗО Северной Атлантики (Козодеров и др., 1989)

ЭАЗО	Границы зоны	$E_u, \text{Вт/м}^2$		
		1975	1976	1977
Норвежская	62,5 с. ш. – 2,5 в. д.	215,1	215,1	231,5
	62,5 с. ш. – 20 з. д.	210,5	209,3	212,0
Ньюфаундленская	45 с. ш. – 45 з. д.	227,5	223,7	223,4
	45 с. ш. – 20 з. д.	232,9	232,7	229,5
Гольфстрим	37,5 с. ш. – 30 з. д.	232,7	231,9	233,0
	37,5 с. ш. – 30 з. д.	244,9	246,1	240,4
Тропическая	7,5 с. ш. – 45 з. д.	251,0	248,7	249,5
	7,5 с. ш. – 30 з. д.	244,7	242,8	238,1

Примечание: ЭАЗО — энергоактивная зона океана

В Метеорологической обсерватории МГУ данные о нисходящей E_d и восходящей E_u длинноволновой радиации за период 1961–2014 гг. были получены расчетным путем. В работах (Горбаренко, 2013, 2016) представлен многолетний ход E_d и эффективного излучения и средние месячные и годовые значения этих параметров за различные периоды.

Таблица 3

Средняя за период 1993–2014 гг. нисходящая длинноволновая радиация в январе (Бекряев, 2015)

Период	Ed _{ср.} , Вт/м ²	σ	Ed _{ср.} , Вт/м ²	σ
	Ню Алесунд		Барроу	
1994–1998	203,9	54	182,2	40
1999–2003	216,6	48	189,9	40
2004–2008	235,5	48	189,9	40
2009–2013	236,5	54	180,7	41
1993–2014	227,9	52	183,3	40

Очевидно, что имеющиеся литературные данные дают представление о порядке рассматриваемых величин, но ввиду их разрозненности не могут быть использованы для текущего контроля.

Результаты обобщения данных о длинноволновой радиации

Для определения критериев контроля длинноволновых составляющих радиационного баланса были проанализированы данные о Ed и Eu, полученные на расположенных в различных регионах России станциях Каргополь, Подмосковная, Самара, Верхоянск, Огурцово, Якутск, Садгород за период 2014–2020 гг. Для каждой из перечисленных станций на основе имеющихся рядов рассматривались месячные, суточные и часовые суммы Ed и Eu: средние за рассматриваемый период, СКО (σ), коэффициенты вариации (v) и пределы наблюдаемых колебаний (экстремальные значения сумм). Далее в результате обобщения станционных данных оценивались возможные колебания Ed и Eu для различных временных интервалов.

Анализ месячных сумм Ed и Eu показал, что в их годовом ходе выделяется максимум в летние (преимущественно в июле) и минимум в зимние (январь–февраль) месяцы. Примеры годового хода месячных сумм приведены на рисунках 1 и 2.

Коэффициенты вариации месячных сумм E_d и E_u близки между собой и колеблются в одинаковых пределах от 0,23–0,25 в декабре–январе до 0,03–0,04 в июне–июле (табл. 4). По данным за 2014–2020 гг. оказалось, что экстремальные месячные суммы длинноволновой радиации близки к $\sum_{\text{мес.}} \pm \sigma$ (см. рис. 3).

Отношение $\sum E_u_{\text{мес.}} / \sum E_d_{\text{мес.}}$ по осредненным данным в течение года изменяется в пределах от 1,09 до 1,23 (табл. 4). Для конкретных станций указанное отношение может отличаться от среднего, но в целом его годовой ход сохраняется (табл. 5).

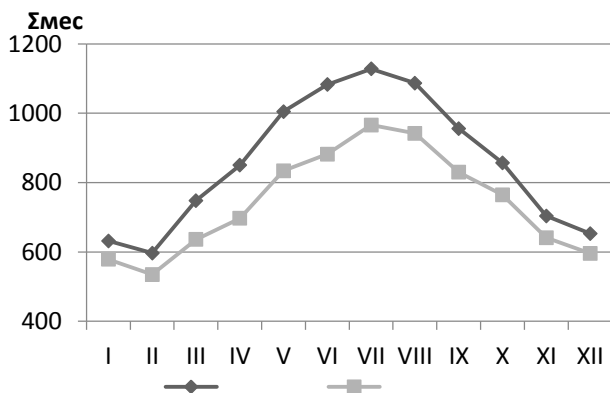


Рис. 1. Годовой ход E_d и E_u , MD/m^2 (период осреднения 2014–2020 гг.)

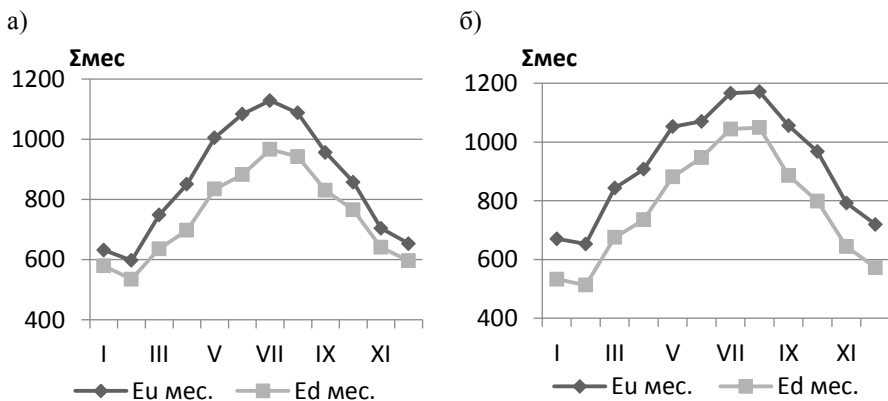


Рис. 2. Годовой ход E_d и E_u , MD/m^2 : Каргополь (а), Садгород (б)

Таблица 4

**Годовой ход средних и экстремальных месячных сумм Ed и Eu, МДж/м²
(период осреднения 2014–2020 гг.)**

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\sum Ed$ мес	579	535	636	697	834	882	966	942	830	765	641	596
σ	126	124	101	71	54	38	41	54	55	81	117	149
v	0,22	0,23	0,16	0,10	0,06	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,18	0,25
$\sum Eu$ мес.	632	597	748	850	1005	1083	1128	1087	956	857	704	653
σ	129	125	104	61	43	46	35	54	65	97	126	150
v	0,20	0,21	0,14	0,07	0,04	0,04	0,03	0,05	0,07	0,11	0,18	0,23
$\sum Eu_{мес} / \sum Ed_{мес}$	1,09	1,12	1,18	1,22	1,21	1,23	1,17	1,15	1,15	1,12	1,10	1,10
$\sum Ed$ max	707	678	734	754	888	949	1042	1052	892	839	751	762
$\sum Ed$ min	394	347	461	565	742	828	914	873	745	627	461	381
$\sum Eu$ max	760	732	855	909	1069	1181	1172	1172	1055	967	805	798
$\sum Eu$ min	431	406	587	754	943	1040	1073	1023	858	697	499	419

Примечание: Ed и Eu приведены в формате, принятом для представления сумм радиации в Научно-прикладном справочнике по климату СССР (1988–1997).

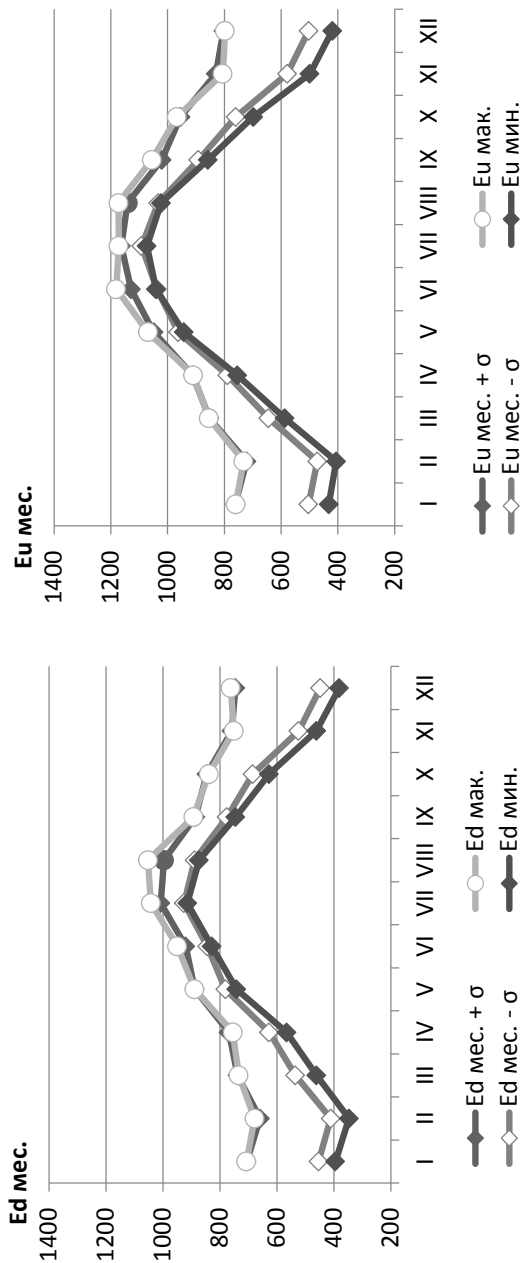


Рис. 3. Годовой ход экстремальных месячных сумм E_d и E_u , МДж/м², по данным за 2014–2020 гг.

Таблица 5

Отношение $\sum E_u$ мес./ $\sum E_d$ мес. для отдельных станций

Станция	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Каргополь	1,06	1,07	1,12	1,16	1,20	1,37	1,15	1,11	1,10	1,08	1,05	1,04
Подмосковная	1,08	1,08	1,17	1,18	1,16	1,21	1,14	1,16	1,12	1,09	1,08	1,05
Самара	1,06	1,09	1,13	1,20	1,20	1,21	1,21	1,19	1,18	1,12	1,09	1,07
Верхоянск	1,09	1,17	1,27	1,33	1,27	1,26	1,17	1,17	1,15	1,11	1,08	1,10
Якутск	1,09	1,13	1,18	1,23	1,24	1,23	1,20	1,16	1,18	1,11	1,11	1,10
Огурцово	1,04	1,06	1,16	1,21	1,18	1,20	1,18	1,17	1,14	1,11	1,07	1,07
Садгород	1,25	1,26	1,24	1,24	1,19	1,13	1,12	1,11	1,18	1,21	1,23	1,26
Среднее	1,10	1,12	1,18	1,22	1,21	1,23	1,17	1,15	1,15	1,12	1,10	1,10
σ	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,07	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07

Далее для каждого месяца были определены экстремальные часовые суммы ($\text{МДж}/\text{м}^2$) и средние часовые значения ($\text{Вт}/\text{м}^2$) E_d и E_u (см. табл. 6). Экстремальные значения выбирались из месячного массива часовых данных без учета их принадлежности к конкретному часовому интервалу. В указанной таблице суточные и часовые суммы радиации представлены в формате, принятом в Научно-прикладном справочнике по климату СССР (1988–1997). Экстремумы имеют годовой ход с максимумом в июле и минимумом в декабре–январе (рис. 4).

Суточный ход средних часовых значений E_d и E_u был рассмотрен на примере данных, полученных на станции Воейково в марте, июне и сентябре 2019 г. (рис. 5). Как и следовало ожидать, амплитуда суточного хода значительна в летние месяцы, зимой она заметно уменьшается. E_u имеет выраженный суточный ход с максимумом в 12–14 ч и «растянутым» минимумом в ночное время (от 22 до 4 ч). Для E_d суточный ход выражен слабо, минимальные значения наблюдаются в ночные часы. Средние часовые значения E_u и E_d для конкретного месяца колеблются в пределах диапазона $E_d \pm 1,5\sigma$ и $E_u \pm 1,5\sigma$.

Часовые значения E_u превышают соответствующие значения E_d .

Экстремальные значения Ed и Eu, период осреднения 2014–2020 гг.

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	<i>Суммы суточные, МДж/м²</i>											
$\sum Ed \max$	27,53	27,64	27,88	30,15	32,95	34,54	36,70	37,17	34,94	32,39	29,71	27,58
$\sum Ed \min$	9,58	9,73	11,25	14,66	19,57	23,46	25,80	23,90	20,90	14,31	10,83	9,69
$\sum Eu \max$	27,73	27,54	30,73	34,54	40,08	39,94	40,66	41,13	37,91	35,43	30,25	27,79
$\sum Eu \min$	11,53	12,26	14,71	21,02	25,11	30,02	31,09	30,12	25,41	16,73	13,01	11,86
	<i>Суммы часовые, МДж/м²</i>											
$\sum Eu \text{ ч max}$	1,19	1,19	1,25	1,35	1,47	1,56	1,57	1,58	1,50	1,42	1,28	1,22
$\sum Eu \text{ ч min}$	0,38	0,39	0,44	0,55	0,70	0,86	0,95	0,89	0,76	0,54	0,42	0,38
$\sum Ed \text{ ч max}$	1,18	1,24	1,58	1,79	1,91	1,94	2,08	2,04	1,85	1,69	1,47	1,22
$\sum Ed \text{ ч min}$	0,47	0,49	0,53	0,70	0,96	1,10	1,14	1,08	0,95	0,64	0,52	0,48
	<i>Средние часовые значения, Вт/м²</i>											
Eu ср. ч max	330	329	347	374	408	432	435	440	417	393	355	339
Eu ср. ч min	105	107	121	152	194	239	265	248	210	149	117	106
Ed ср. ч max	327	343	438	496	530	539	576	568	514	468	408	338
Ed ср. ч min	131	135	148	194	267	306	318	299	263	177	144	134

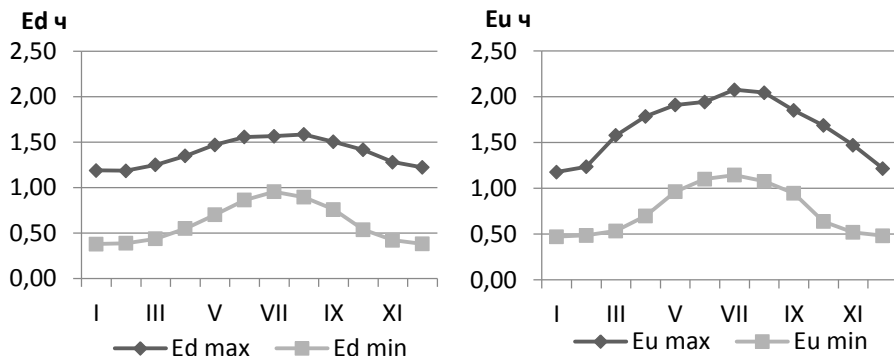


Рис. 4. Годовой ход экстремальных часовых сумм E_d и E_u , МДж/м²

С учетом проведенного анализа при контроле длинноволновых составляющих радиационного баланса для оценки достоверности полученных данных могут быть рекомендованы следующие критерии:

Параметр	Временное разрешение	Диапазон изменений
$\sum E_d$, МДж/м ²	месячные	от 400 до 1100
	суточная	от 9 до 38
	часовая	от 0,35 до 1,6
$\sum E_u$, МДж/м ²	месячные	от 400 до 1200
	суточная	от 11 до 42
	часовая	от 0,45 до 2,1

Для контроля сумм E_u и E_d с учетом их годового хода могут быть использованы предельные значения, представленные в таблицах 4 и 6. При этом должны соблюдаться соотношения:

$$\sum E_u \text{ мес.} > \sum E_d \text{ мес.}; \sum E_u \text{ сут.} > \sum E_d \text{ сут.}; \sum E_u \text{ ч} \geq \sum E_d \text{ ч};$$

$$1,05 < (\sum E_u \text{ мес.} / \sum E_d \text{ мес.}) < 1,30.$$

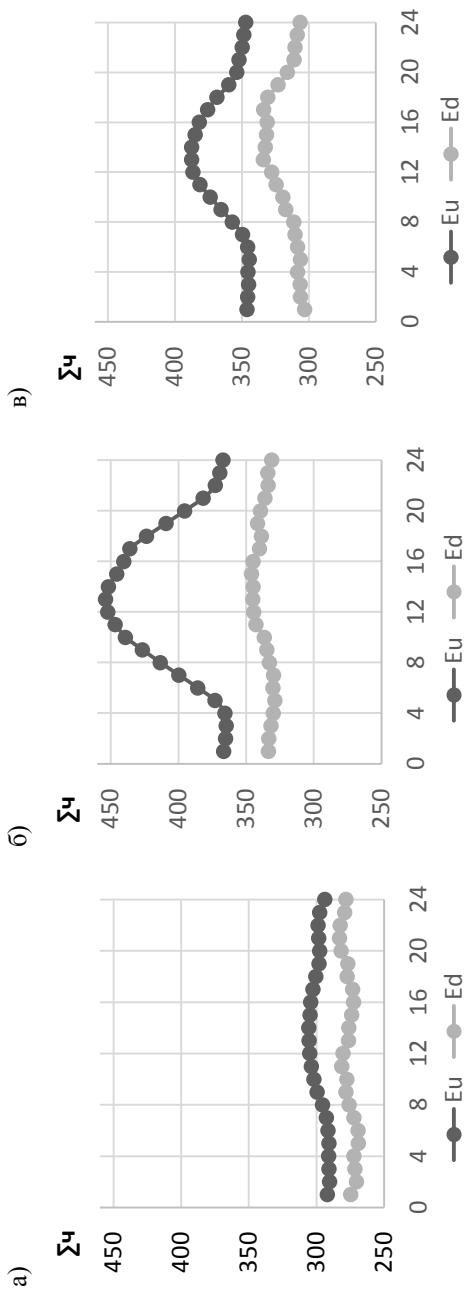


Рис. 5. Суточный ход средних часовых значений E_d и E_u , Вт/м²:
а — март, б — июнь, в — сентябрь. Воейково. 2019 г.

Заключение

Выполненное обобщение результатов регистрации длинноволновых составляющих радиационного баланса позволило оценить ориентировочные пределы изменения месячных, суточных и часовых сумм уходящей и приходящей длинноволновой радиации и определить основные закономерности ее годового и суточного хода. Полученные результаты носят предварительный характер, поскольку основаны на рядах наблюдений продолжительностью 6 лет. По мере накопления информации оценки будут уточняться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бекряев Р. В. (2015). Изменение потоков нисходящей длинноволновой радиации и эффективного излучения в высоких широтах // *Фундаментальная и прикладная климатология*. № 1. С. 27–48.

Волков Н. В., Лагутин А. А., Макушев К. М., Мордвин Е. Ю. (2014). Уходящее длинноволновое излучение по данным региональной климатической модели и спутникового комплекса AIRS/AMSU // *Известия Алтайского государственного университета*. № 1–2. С. 155–161.

Горбаренко Е. В. (2013). Многолетние изменения длинноволновой радиации в Москве // *Метеорология и метрология*. № 10. С. 29–39.

Горбаренко Е. В. (2016). Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений Метеорологической обсерватории МГУ // *Метеорология и метрология*. № 12. С. 5–17.

ИЗМ № 1/45-2019 РД 52.04.562-96 (2020). — СПб: Амирит. 36 с.

Козодеров В. В., Мохов И. И., Панова Т. В. (1989). Исследование внутригодовых вариаций радиационного баланса земли и его длинноволнового компонента по спутниковым данным // *Оптика атмосферы*. Т. 2. № 6. С. 649–654.

Луцко Л. В., Ерохина А. Е., Бычкова А. П., Махоткина Е. Л., Махоткин А. Н., Бекенева О. Б. (2018). Актинометрическая сеть Росгидромета: текущее состояние // *Труды ГГО*. Вып. 589. С. 125–152.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 1–32. (1988–1997). — Л.: Гидрометеиздат.

ОСТ 52.04.10-82 (1984). Актинометрия. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин. — Л.: Гидрометеоиздат. 24 с.

РД 52.04.562-96 (1997). Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 5. Ч. 1. — М.: Росгидромет. 222 с.

Тверской П. Н. (1962). Курс метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат. 700 с.

Янишевский Ю. Д. (1957). Актинометрические приборы и методы наблюдений. — Л.: Гидрометеоиздат. 232 с.

Aumann H. H., Chahine M. T., Gautier C. et al. (2003). AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. № 2.

Suskind J., Barnet C. D., Blaisdell J. M. (2003). Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. № 2.

УДК 551.594.21

СТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ ТОКОВОЙ ЦЕПИ С УЧЕТОМ АЭРОЗОЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ АТМОСФЕРЫ И ОБЛАКОВ

В. Н. Морозов

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: vn.morozov@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.10.2022
Поступила после доработки 24.11.2022

Введение

Влияние аэрозольной составляющей атмосферы на глобальную электрическую цепь в земной атмосфере (или токовую цепь в атмосфере) рассматривалось в ряде работ российских и зарубежных исследователей. Среди них следует отметить публикации работы (Sarkota, Varshneva, 1990; Ogawa, 1985; Makino, Ogawa, 1984;1985) и российскую работу (Морозов, 2015). В работе японских исследователей (Makino, Ogawa, 1985) показана связь вариаций потенциала ионосферы с вариациями ядер конденсации, возникающих в атмосфере при вулканических извержениях. В остальных работах, включая и российскую, для оценок изменений потенциала ионосферы при наличии определенного распределения концентрации аэрозольных частиц использовалась электрическая схема. В работе (Морозов, 2015) показано, что изменение потенциала ионосферы зависит от площади аэрозольного загрязнения. При малых площадях потенциал ионосферы остается постоянным, а столбцовое

сопротивление меняется, приводя к увеличению или уменьшению тока в данном столбце.

В настоящей статье рассматривается вариант модели токовой цепи, учитывающий влияние аэрозольной составляющей атмосферы и облаков, которые изменяют электрическую проводимость атмосферы следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda(r) &= \eta \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}, r \in [R, r_1] \\ \lambda_1(r) &= \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}, r \in [r_1, \infty). \end{aligned} \tag{1}$$

Используя разложение по сферическим гармоникам (Морозов, 2021), получим уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \varphi_{ij}(r)}{dr^2} + \alpha \frac{d\varphi_{ij}}{dr} - \frac{\mu}{R^2} \varphi_{ij} &= -\frac{1}{\lambda(r)} S_{ij}(r), \quad r \in [R, r_1], \\ \frac{d^2 \varphi_{ij}^{(1)}(r)}{dr^2} + \alpha \frac{d\varphi_{ij}^{(1)}}{dr} - \frac{\mu}{R^2} \varphi_{ij}^{(1)} &= -\frac{1}{\lambda_1} S_{ij}(r), \quad r \in [r_1, H], \end{aligned} \tag{2}$$

где $S(r, \theta, \phi)$ — функция, определяющая распределение генераторов электрического поля в фурье-разложении,

$S_{ij}(r), \varphi_{ij}(r), \varphi_{ij}^{(1)}(r)$ — функции, определяющие коэффициенты в фурье-разложении,

η — коэффициент, определяющий поглощение атмосферных ионов аэрозольными частицами, который рассмотрен в следующем разделе статьи,

R — радиус Земли,

H — высота нижней границы ионосферы,

r_1 — высота приземного слоя, содержащего аэрозоль

$\mu = i(i + 1), \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \dots$

Модель токовой цепи, учитывающая аэрозольные частицы

Для стационарного случая в сферической системе с началом в центре Земли имеем уравнение, следующее из выражения $\nabla(\lambda(r)\nabla\varphi) = 0$:

$$\lambda(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \lambda(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

где λ — электрическая проводимость воздуха, обусловленная положительными и отрицательными аэроионами,

φ — электрический потенциал,

r — расстояние до точки в атмосфере до центра Земли

Для электрической проводимости используется следующее представление:

$$\begin{aligned} \lambda_1(r) &= \eta \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}, & r \in [R, r_1) \text{ (область I)}, \\ \lambda_2(r) &= \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}, & r \in [r_1, \infty] \text{ (область II)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где η — коэффициент поглощения аэроионов, который характеризует уменьшение проводимости в области I за счет присутствия в ней аэрозольных частиц (определение данного коэффициента будет рассмотрено ниже),

$$\alpha = (0,2 - 0,3) \text{ км}^{-1}.$$

Граничные условия для решения данной задачи представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi|_{r-R=0} &= 0, \\ \varphi|_{r-R=H_0} &= \varphi_\infty. \end{aligned} \quad (5)$$

Кроме того, при $r_1 - R = H$ необходимо использовать равенство потенциалов для решений, полученных в областях I (где аэрозольные частицы присутствуют) и II (в которой нет аэрозольных частиц), и плотности электрического тока на их границе. Для проводимости,

задаваемой соотношениями (4), уравнение (3) при $r \gg \alpha^{-1}$ сводится к следующему:

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0. \quad (6)$$

Интегрируя это уравнение по области I, получим:

$$\varphi_1(r) = -\frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0} e^{-\alpha(r-R)} + C_2, \quad (7)$$

где C_1, C_2 — постоянные.

Используя при $r = R$ граничное условие $\varphi(R) = 0$, получим $C_2 = \frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0}$ и соотношение для $\varphi_1(r)$:

$$\varphi_1(r) = \frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0} (1 - e^{-\alpha(r-R)}). \quad (8)$$

Для второго решения в области II имеем:

$$\varphi_2(r) = -\frac{C_3}{\alpha\lambda_0} e^{-\alpha(r-R)} + C_4. \quad (9)$$

где C_3, C_4 — постоянные.

Используя второе граничное условие из (5), получим для этого решения представление:

$$\varphi_2(r) = \varphi_\infty + \frac{C_3}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha(r-R)}). \quad (10)$$

Принимая потенциал электрического поля и плотность тока непрерывными при $r - r_0 = H$:

$$\begin{aligned} \varphi_1(H) &= \varphi_2(H), \\ j_1(H) &= j_2(H), \\ j_1(H) &= \lambda_1(H)E_{1r}(H) = j_2(H) = \lambda_2 E_{2r}(H) \quad H = r_1 - R, \end{aligned} \quad (11)$$

где j_1, j_2 — плотности электрического тока в областях I и II, $E_{1r}E_{2r}$ — радиальные составляющие напряженности электрического поля в соответствующих областях.

Из второго уравнения системы (11) получим тождество: $C_1 = C_3$, из первого соотношения — выражение для C_1 , а с учетом (10) — выражение для $\varphi_1(r)$:

$$C_1 = \frac{\varphi_\infty}{\left[\frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]} \quad (12)$$

$$\varphi_1(r) = \frac{\varphi_\infty (1 - e^{-\alpha(r-R)})}{\alpha\eta\lambda_0 \left[\frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]}$$

Для радиальной составляющей напряженности электрического поля получим:

в области I:

$$E_{r_1}(r) = -\frac{C_1}{\eta\lambda_0} e^{-\alpha(r-R)} =$$

$$= -\frac{\varphi_\infty e^{-\alpha(r-R)}}{\eta\lambda_0 \left[\frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]} =$$

$$= -\frac{\alpha\varphi_\infty e^{-\alpha(r-R)}}{1 - e^{-\alpha H} + \eta(e^{-\alpha(r_1-R)} - e^{-\alpha H_0})}, \quad (13)$$

в области II:

$$E_{r_2}(r) = -\frac{C_1}{\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} =$$

$$= -\frac{\varphi_\infty e^{-\alpha(r-R)}}{\lambda_0 \left[\frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]} . \quad (14)$$

Потенциал ионосферы при наличии аэрозольных частиц в атмосфере связан с потенциалом в условиях незагрязненной атмосферы соотношением $\varphi_\infty^a = \frac{\varphi_\infty^0}{\eta}$, то есть при $\eta < 1$ он возрастает.

При $H < 1/\alpha$, $H_0 \rightarrow \infty$ получим в области I выражение для напряженности электрического поля:

$$E_{r1} = -\frac{\alpha\varphi_\infty}{\eta} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (15)$$

Выражение для η следует из работы (Морозов, 2015):

$$\eta = \left(\frac{(\beta N)^2}{4q\bar{\alpha}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta N}{2\sqrt{q\bar{\alpha}}}, \quad (16)$$

где β — интегральный коэффициент присоединения ионов к аэрозольным частицам; N — концентрация аэрозольных частиц; q — интенсивность ионообразования; $\bar{\alpha}$ — коэффициент рекомбинации легких ионов.

С учетом зависимости β от типа ионов выражение (16) принимает вид:

$$\eta = \left[\left(\frac{(\beta_+ N)^2}{4q\bar{\alpha}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta_+ N}{2\sqrt{q\bar{\alpha}}} \right] + \left[\left(\frac{(\beta_- N)^2}{4q\bar{\alpha}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta_- N}{2\sqrt{q\bar{\alpha}}} \right]. \quad (17)$$

Это соотношение следует из уравнений ионизационно-рекомбинационного равновесия, записанных для каждого типа ионов в стационарном случае:

$$\begin{aligned} 0 &= q - \bar{\alpha}n_+^2 - n_+ \sum_r \beta_+(r)N(r), \\ 0 &= q - \bar{\alpha}n_-^2 - n_- \sum_r \beta_-(r)N(r). \end{aligned} \quad (18)$$

Решение этих уравнений определяет концентрацию положительных и отрицательных легких ионов в зависимости от концентрации аэрозольных частиц, и более общее выражение для η имеет вид:

$$\eta = \left[\left(\frac{\sum_r \beta_+(r) N(r)^2}{4q\bar{\alpha}} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_+(r) N(r)}{2\sqrt{q\bar{\alpha}}} \right] =$$

$$= \left[\left(\frac{\sum_r \beta_-(r) N(r)^2}{4q\bar{\alpha}} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_-(r) N(r)}{2\sqrt{q\bar{\alpha}}} \right] \quad (19)$$

Результаты расчетов η в зависимости от концентрации аэрозольных частиц представлены в таблице 1, из которой следует, что с ростом концентрации аэрозолей параметр η уменьшается, а поскольку потенциал ионосферы при этом увеличивается, то можно ослабить требование к зарядам грозовых облаков.

Таблица 1

Зависимость η от концентрации аэрозольных частиц

N (м ⁻³)	10^9	10^{10}	$5 \cdot 10^{10}$
η	0,82	0,21	0,021

Вычислим отношение $\frac{E_{r1}}{\alpha\varphi_\infty} = \frac{1}{(1 - e^{-\alpha(r_1 - R)}) + \eta e^{-\alpha(r_1 - R)}}$ в области $[R, r_1]$, в котором $\alpha\varphi_\infty$ — абсолютная величина напряженности электрического поля в отсутствие аэрозоля.

Потенциал ионосферы может принимать значения: $\varphi_\infty^a = 1,21\varphi_\infty$, при $\eta = 0,82$ и $\varphi_\infty^a = 5\varphi_\infty$. при $\eta = 0,2$ На границах области $r = r_1$ напряженность электрического терпит разрыв.

**Зависимость напряженности электрического поля от высоты для
различных значений η**

$r_1 - R, \text{ м}$	$\frac{E_{r1}}{\alpha\varphi_\infty}$	
	$\eta = 0$	$\eta = 0,2$
100	1,21	4,46
500	1,18	3,22
1000	1,15	2,45

Модель токовой цепи, учитывающая грозовые источники

Используя результаты работы (Морозов, 2021), приведем выражения для функции $S_{ij,m}(r)$:

$$\begin{aligned}
 S_{ij,m}(r) = f(r)/ab^2\pi^{3/2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \exp\left[-\frac{r^2}{b^2}(\cos\theta' - \cos\theta_m)^2\right] \times \\
 \times \sin\theta' \int_{\phi_1}^{\phi_2} \exp\left[-\frac{r^2}{b^2}(\phi' - \phi_m)^2\right] Y_{ij}(\theta', \phi') d\theta' d\phi' \quad (20) \\
 I_m^+ \exp\left[-\frac{(r-r_{pm})^2}{a^2}\right] + I_m^- \exp\left[-\frac{(r-r_{nm})^2}{a^2}\right]
 \end{aligned}$$

где $S_{ij,m}(r)$ — составляющая Фурье-разложения функции $S_m(r, \theta, \phi)$:

$$\begin{aligned}
 S_m(r, \theta, \phi) = \frac{1}{ab^2\pi^{\frac{3}{2}}} \exp\left\{\frac{r^2}{b^2[(\cos\theta - \cos\theta_m)^2 + (\phi - \phi_m)^2]}\right\} \\
 \times [I_m^+ \exp\left[-\frac{(r-r_{pm})^2}{a^2}\right] + I_m^- \exp\left[-\frac{(r-r_{nm})^2}{a^2}\right]], \quad (21)
 \end{aligned}$$

где m — порядковый номер источника (число источников равно N : 1, 2, 3, ..., m , ..., N).

Решение первого уравнения в системе (2) записывается при следующих предположениях:

- все источники находятся в слое, содержащем аэрозольные частицы, то есть $r \in [R, r_1]$;
- все источники находятся сверху этого слоя;
- слой аэрозольных частиц расположен выше слоя грозовых генераторов.

Рассмотрим решение для второго случая, полагая $r \in [R, r_1]$. Решение первого уравнения системы (2) записывается в виде:

$$\varphi_{ij}(r) = C_{1,ij}e^{\sigma_1 r} + C_{2,ij}e^{\sigma_2 r} \quad (22)$$

где $\sigma_1 = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\mu/R^2}}{2}$, $\sigma_2 = \frac{-\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 4\mu/R^2}}{2}$, $\mu = i(i+1)$,
 $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \dots \dots$

При $r \in [r_1, \infty)$ получим решение второго уравнения системы (2):

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}^{(1)}(r) = & C_{3,ij}e^{\sigma_1 r} - e^{\sigma_1 r} \int_{r_1}^r \frac{1}{\lambda(r')} S_{ij}(r') e^{-\sigma_1 r'} \frac{dr'}{\sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} + \\ & + C_{4,ij}e^{\sigma_2 r} + e^{\sigma_2 r} \int_{r_1}^r \frac{1}{\lambda(r')} S_{ij}(r') \times e^{-\sigma_2 r'} \frac{dr'}{\sqrt{\alpha^2 + 4\mu/R^2}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Общее решение для обоих случаев имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi(r, \theta, \phi) = & \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \varphi_{ij}(r) Y_{ij}(\theta, \phi), \\ \varphi_{ij}(r) = & \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \varphi(r, \theta, \phi) \sin\theta Y_{ij}^*(\theta, \phi) d\theta. \end{aligned} \quad (24)$$

Общее решение задачи с учетом решения в области отсутствия генераторов складывается в виде суммы решения без источников и решения для источников, которое представлено в статье (Морозов, 2021):

$$\varphi_2(r, \theta, \phi) = \varphi_2(r) + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \varphi_{ij}^{(1)}(r) Y_{ij}(\theta, \phi). \quad (25)$$

Найдем, используя (22), радиальную составляющую напряженности электрического поля. Дифференцируя выражение (22) по радиусу r , получим

$$E_r = -\frac{\partial \varphi(r, \theta, \phi)}{\partial r} = -\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \frac{d\varphi_{ij}}{dr}(r) Y_{ij}(\theta, \phi) \quad (26)$$

Определим постоянные в выражении (22). На поверхности сферической Земли при $r = R$ $\varphi_{ij}(R) = 0$. Из этого условия следует соотношение: $C_{1,ij}e^{\sigma_1 R} + C_{2,ij}e^{\sigma_2 R} = 0$. Используя это соотношение, найдем: $C_{2,ij} = -C_{1,ij}e^{(\sigma_1 - \sigma_2)R}$. Будем далее предполагать, что в области $[r_1, \infty)$ нет аэрозольного загрязнения. В этом случае имеет место решение (23). Условие конечности этого решения при r стремящемся к ∞ дает следующее выражение для $C_{3,ij}$:

$$C_{3,ij} = \int_{r_1}^{\infty} \frac{1}{\lambda(r')} S_{ij}(r') e^{-\sigma_1 r'} \frac{dr'}{\sqrt{\alpha^2 + 4\mu/R^2}}. \quad (27)$$

Остальные постоянные: $C_{1,ij}, C_{4,ij}$ определяются из условия непрерывности плотности электрического тока и потенциала при $r = r_1$. Непрерывность составляющих потенциала электрического поля φ_{ij} и соответствующей компоненты плотности электрического тока определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}(r_1) &= \varphi_{ij}^{(1)}(r_1), \\ \lambda(r_1) \frac{d\varphi_{ij}}{dr}(r_1) &= \lambda_1(r_1) \frac{d\varphi_{ij}^{(1)}}{dr}(r_1) \end{aligned} \quad (28)$$

Эти соотношения следует из формул для Фурье-преобразования (2.22).

Рассмотрим задачу об изменении потенциала ионосферы, вызванного проводимостью (4). Будем предполагать, что все грозовые источники находятся выше слоя r_1 . Внутри этого слоя имеем для составляющих фурье-разложения потенциала электрического поля уравнение:

$$\varphi_{ij}(r) = C_{1,ij}e^{\sigma_1 r} + C_{2,ij}e^{\sigma_2 r} \quad (29)$$

Для составляющих фурье-разложения потенциала электрического поля имеем при $r > r_1$ представление:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}^{(1)} = & C_{3,ij}e^{\sigma_1 r} - \\ & -e^{\sigma_1 r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')e^{-\sigma_1 r'}}{\lambda(r')\sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} dr' + C_{4,ij}e^{\sigma_2 r} + \\ & + e^{\sigma_2 r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')e^{-\sigma_2 r'}}{\lambda(r')\sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} dr' \end{aligned} \quad (30)$$

При $r \rightarrow \infty, \varphi_{ij}^{(1)} \rightarrow 0$ и из выражения (30) при $e^{\sigma_1 r} \rightarrow \infty, i \neq 0, j \neq 0$ получим:

$$C_{3,ij} = \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{ij}(r)e^{-\sigma_1 r}}{\lambda(r)\sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} dr. \quad (31)$$

Решение (30) в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}^{(1)} = & e^{\sigma_1 r} \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{ij}(r')e^{-\sigma_1 r'}}{\lambda(r')\sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} dr' + \\ & + C_{4,ij}e^{\sigma_2 r} + e^{\sigma_2 r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')e^{-\sigma_2 r'}}{\lambda(r')\sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} dr' \end{aligned} \quad (32)$$

Рассмотрим решения (29) и (32) при $i = j = 0$:

$$\varphi_{00} = C_{1,00}(1 - e^{-\alpha(r-R)}) \quad (33)$$

$$\varphi_{00}^{(1)} = \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{00}(r')}{\lambda(r')\alpha} dr' + C_{4,00}e^{-\alpha r} + e^{-\alpha r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')e^{\alpha r'}}{\lambda(r')\alpha} dr' \quad (34)$$

Для определения постоянных $C_{1,00}, C_{4,00}$ воспользуемся граничными условиями при $r = r_1$ (28):

$$C_{1,00}(1 - e^{-\alpha(r_1-R)}) = C_{3,00} + C_{4,00}e^{-\alpha r_1}$$

$$\begin{aligned} \eta\lambda_0 e^{\alpha(r_1-R)} \frac{d\varphi_{00}}{dr}(r_1) &= \eta\lambda_0 e^{\alpha(r_1-R)} C_{1,00} \alpha e^{-\alpha(r_1-R)} = \\ &= \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{00}}{\lambda(r)\alpha} dr + C_{4,00}e^{-\alpha r_1} \\ \lambda_0 e^{\alpha(r_1-R)} \frac{d\varphi_{00}^{(1)}}{dr}(r_1) &= -\alpha C_{4,ij} e^{-\alpha r_1} \lambda_0 e^{\alpha(r_1-R)} \end{aligned} \quad (35)$$

из второго выражения (35) следует связь между постоянными:

$$C_{4,00} = -e^{\alpha r_1} \eta C_{1,00} e^{-\alpha(r_1-R)} .$$

Подставляя это выражение в первое соотношение, получим для $C_{1,00}$ выражение:

$$C_{1,00} = \frac{1}{(1 - e^{-\alpha(r_1-R)}) + \eta e^{-\alpha(r_1-R)}} \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{00}(r)}{\lambda(r)\alpha} dr \quad (36)$$

Для $C_{4,00}$ имеем соотношение:

$$C_{4,00} = e^{\alpha r_1} \eta C_{1,00} e^{-\alpha(r_1-R)} \quad (37)$$

Для напряженности электрического поля при r_1 имеем:

$$\frac{d\varphi_{00}^{(1)}}{dr}(r_1) = -\alpha e^{-\alpha r_1} C_{4,00} = -\eta C_{1,00} e^{-\alpha(r_1-R)} \alpha \quad (38)$$

Записывая уравнение баланса между токами диссипации и токами заряжения, получим соотношение:

$$\eta e^{\alpha(r_1-R)} \varphi_{\infty} = \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{00}(r)}{\alpha \lambda(r)} dr \quad (39)$$

Из (39) следует выражение (40) для потенциала ионосферы, которой показывает, что потенциал ионосферы φ_{∞} при $\eta < 1$ увеличивается:

$$\varphi_{\infty} = \frac{1}{\eta \alpha} e^{-\alpha(r_1-R)} \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{00}(r)}{\lambda(r)} dr \quad (40)$$

Рассмотрим далее решение задачи при $i \neq 0, j \neq 0$. В этом случае имеем при $r \geq r_1$ решение:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}^{(1)}(r) = & C_{3,ij} e^{\sigma_1 r} - e^{\sigma_1 r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')}{\lambda(r') \sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} e^{-\sigma_1 r'} dr' - \\ & - C_{4,ij} e^{\sigma_2 r} + e^{\sigma_2 r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')}{\lambda(r') \sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} e^{-\sigma_2 r'} dr', \quad r \in [r_1, \infty] \end{aligned} \quad (41)$$

$$\text{При } r \in [R, r_1] \quad \varphi_{ij}(r) = C_{1,ij} e^{\sigma_1 r} + C_{2,ij} e^{\sigma_2 r}, \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \text{при } r = R, \varphi_{ij}(R) = 0 \\ \text{вместо (42):} \quad \varphi_{ij}(r) = C_{1,ij} (e^{\sigma_1 r} - e^{\sigma_2 r} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)R}) \end{aligned} \quad (43)$$

Система уравнений для определения постоянных $C_{1,ij}, C_{4,ij}$ при граничных условиях (28) имеет вид:

$$\begin{aligned} C_{1,ij}(e^{\sigma_1 r_1} - e^{\sigma_2 r_1} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)R}) &= C_{3,ij} e^{\sigma_1 r_1} + C_{4,ij} e^{\sigma_2 r_1} \\ \eta C_{1,ij}(\sigma_1 e^{\sigma_1 r_1} - \sigma_2 e^{\sigma_2 r_1} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)R}) &= \sigma_1 C_{3,ij} e^{\sigma_1 r_1} + \sigma_2 C_{4,ij} e^{\sigma_2 r_1} \end{aligned} \quad (44)$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$\begin{aligned} C_{1,ij} &= \frac{C_{3,ij}(\sigma_1 - \sigma_2)e^{\sigma_1 r_1}}{-\sigma_2(e^{\sigma_1 r_1} - e^{\sigma_2 r_1} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)R}) + \eta C_{1,ij}(\sigma_1 e^{\sigma_1 r_1} - \sigma_2 e^{\sigma_2 r_1} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)R})} \\ C_{4,ij} &= [C_{1,ij}(e^{\sigma_1 r_1} - e^{\sigma_2 r_1} e^{(\sigma_1 - \sigma_2)R}) - C_{3,ij} e^{\sigma_1 r_1}] / \sigma_2 e^{\sigma_2 r_1}. \end{aligned} \quad (45)$$

В области $r \in [r_1, \infty)$ имеем решение (41), которое представляется в следующее:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}^{(1)}(r) &= C_{3,ij} e^{\sigma_1 r} - e^{\sigma_1 r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')}{\lambda(r') \sqrt{\alpha^2 + \frac{\mu}{R^2}}} e^{-\sigma_1 r'} dr' + \\ &+ C_{4,ij} e^{\sigma_2 r} + e^{\sigma_2 r} \int_{r_1}^r \frac{S_{ij}(r')}{\lambda(r') \sqrt{\alpha^2 + \frac{4\mu}{R^2}}} e^{-\sigma_2 r'} dr', \quad r \in [r_1, \infty] \end{aligned} \quad (46)$$

$$C_{3,ij} = \int_{r_1}^{\infty} \frac{S_{ij}(r)}{\lambda(r) \sqrt{\alpha^2 + 4\mu/R^2}} e^{-\sigma_1 r} dr \quad (47)$$

$$\varphi_2(r, \theta, \phi) = \varphi_2(r) +$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \varphi_{ij}^{(1)}(r) Y_{ij}^*(\theta_0, \phi_0) (Y_{ij}(\theta, \phi) \quad r \in [r_1, \infty) \text{ ij}, \\ &\quad \varphi_1(r, \theta, \phi) = \varphi_1(r) + \\ &+ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \varphi_{ij}(r) Y_{ij}^*(\theta_0, \phi_0) Y_{ij}(\theta, \phi) \quad r \in [R, r_1) \end{aligned} \quad (48)$$

Вычислим потенциал электрического поля, создаваемый грозовым генератором вблизи экватора в северном районе: например, при тех же угловых параметрах $\theta = 15^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ$. Будем предполагать, что источник точечный, то есть

$$S_{ij}(r) = \frac{I_g}{R^2} [\delta(r - r_+) - \delta(r - r_-)] Y_{ij}(\theta_0, \phi_0) \quad (49)$$

$C_{3,ij}$ в этом случае равен:

$$\begin{aligned} C_{3,ij} &= \frac{I_g}{R^2} \int_{r_1}^{\infty} \frac{[\delta(r - r_+) - \delta(r - r_-)] Y_{ij}(\theta_0, \phi_0)}{\lambda(r) \sqrt{\alpha^2 + \mu/R^2}} e^{-\sigma_1 r} dr = \\ &= \frac{I_g}{R^2 \sqrt{\alpha^2 + \mu/R^2}} \left[\frac{e^{-\sigma_1 r_+}}{\lambda(r_+)} - \frac{e^{-\sigma_1 r_-}}{\lambda(r_-)} \right] Y_{ij}(\theta_0, \phi_0). \end{aligned} \quad (50)$$

Здесь $\delta(x)$ – функция Дирака.

Используя выражение из работ (Морозов, 2005; Янке, Эмде, Лёш, 1977),

$$\frac{e^{-\alpha R_1/2}}{R_1} = \frac{1}{\alpha r r_s} \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\frac{\alpha}{2}(r-r_s)} (2i+1) P_i(\cos \gamma_s) \quad (51)$$

в котором R_1 — расстояние между источником и точкой наблюдения, $P_i(\cos \gamma_0)$ — полином Лежандра,

$$\cos \gamma_0 = \cos \theta \cos \theta_0 + \sin \theta \sin \theta_0 \cos(\phi - \phi_0),$$

γ_0 — угол между направлениями на источник и точку наблюдения,

а также решения (43), (45), (47), получим выражение для потенциала электрического поля, создаваемого грозовыми источниками (Морозов, 2005, 2021):

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{(1 - e^{-\alpha(r_1 - R)}) + \eta e^{-\alpha(r_1 - R)}} \left\{ \sum_{m=1}^N Q_{i+} e^{-\alpha(r - r_{i+})/2} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha \rho_{i+}}{2}}}{\rho_{i+}} - \frac{e^{-\frac{\alpha \rho'_{i+}}{2}}}{\rho'_{i+}} \right] + \sum_{m=1}^N Q_{i-} e^{-\alpha(r - r_{i-})/2} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha \rho_{i-}}{2}}}{\rho_{i-}} - \frac{e^{-\frac{\alpha \rho'_{i-}}{2}}}{\rho'_{i-}} \right] \right\}, \quad (52)$$

$$\rho_{i+} = |\vec{r} - \vec{r}_{i+}|, \rho'_{i+} = |\vec{r} - \vec{r}'_{i+}|, \rho_{i-} = |\vec{r} - \vec{r}_{i-}|, \rho'_{i-} = |\vec{r} - \vec{r}'_{i-}|,$$

где первый член — расстояние от источника с положительным зарядом до точки наблюдения, а второй — расстояние от заряда-изображения до точки наблюдения, аналогичные выражения имеют место для отрицательного заряда грозового облака.

Рассчитаем потенциал электрического поля по формуле (52), предполагая, что все грозовые генераторы расположены в экваториальной зоне, а точка измерения напряженности электрического поля находится в арктическом регионе (станция Тикси).

При $\alpha = 0,3 \text{ км}^{-1}$ полагая расстояния между грозовым генератором и земной поверхностью равными 100, 500, 1000 км, получим для потенциала электрического поля значения:

$$\begin{aligned} \text{для расстояния 100 км} & \quad \varphi(100 \text{ км}) = 3,05 \times 10^{-7} \varphi_0, ; \\ \text{для расстояния 500 км} & \quad \varphi(500 \text{ км}) = 2,67 \times 10^{-33} \varphi_0, \\ \text{для } |\vec{r} - \vec{r}_{i,\pm}| = 1000 \text{ км} & \quad \varphi(1000 \text{ км}) = 7,18 \times 10^{-66} \varphi_0, \end{aligned}$$

где φ_0 — потенциал электрического поля при $\alpha = 0$.

Если умножить эти величины на число гроз, действующих в данный момент времени в экваториальной зоне, равное 2000, то получим также маленькие значения в пункте наблюдения.

Следовательно влияние грозовых генераторов на области, где они отсутствуют, должно проявляться через потенциал ионосферы.

Рассмотрим вычисление напряженности электрического поля в области $[R, r_1]$, используя формулу (52). Дифференцируя это выражение по r , получим:

$$E_r = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \chi \left\{ \frac{\alpha}{2} \varphi(r) - \sum_{i=1}^N Q_{i+} e^{-\frac{\alpha}{2}(r-r_{i+})} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}}}{\rho_{i+}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}}}{\rho'_{i+}} \right] + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^N Q_{i-} e^{-\frac{\alpha}{2}(r-r_{i-})} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}}}{\rho_{i-}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i-}}}{\rho'_{i-}} \right] \right\}. \quad (53)$$

где:

$$\rho_{i+} = \sqrt{r^2 + r_{i+}^2 - 2rr_{i+}\cos\gamma_{i+}}, \quad \rho_{i-} = \sqrt{r^2 + r_{i-}^2 - 2rr_{i-}\cos\gamma_{i+}}, \\ \rho'_{i+} = \sqrt{r^2 + r_{i+}'^2 - 2rr'_{i+}\cos\gamma'_{i+}} \\ \rho'_{i-} = \sqrt{r^2 + r_{i-}'^2 - 2rr'_{i-}\cos\gamma'_{i+}} \\ \chi = \frac{1}{(1 - e^{-\alpha(r_1-R)}) + \eta e^{-\alpha(r_1-R)}}$$

Последние две формулы определяют расстояние от зарядов-изображений до точки измерения. Приведем результаты вычислений производных, входящих в выражение (53):

$$I_{i+} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}}}{\rho_{i+}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}}}{\rho'_{i+}} \right] = -\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}} \left(\frac{\alpha}{2} \rho_{i+} + 1 \right) \frac{\partial \rho_{i+}}{\partial r}}{\rho_{i+}^2} + \\ + \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}} \left(\frac{\alpha}{2} \rho'_{i+} + 1 \right) \frac{\partial \rho'_{i+}}{\partial r}}{\rho_{i+}'^2} \quad (54)$$

$$\frac{\partial \rho_{i+}}{\partial r} = \frac{r - r_{i+}\cos\gamma_{i+}}{\rho_{i+}}, \quad \frac{\partial \rho'_{i+}}{\partial r} = \frac{r - r'_{i+}\cos\gamma'_{i+}}{\rho'_{i+}}.$$

$$I_{i-} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}}}{\rho_{i-}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i-}}}{\rho'_{i-}} \right] = \quad (55)$$

$$= -\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}+1\right)\frac{\partial\rho_{i-}}{\partial r}}{\rho_{i-}^2} + \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i-}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho'_{i-}+1\right)\frac{\partial\rho'_{i-}}{\partial r}}{\rho_{i-}^{\prime 2}}$$

$$\frac{\partial\rho_{i-}}{\partial r} = \frac{r - r_{i-}\cos\gamma_{i-}}{\rho_{i-}}, \quad \frac{\partial\rho'_{i-}}{\partial r} = \frac{r - r'_{i-}\cos\gamma'_{i-}}{\rho'_{i-}}.$$

Оценим расстояния r'_{i+} и r'_{i-} для зарядов-изображений, соответствующих положительным и отрицательным зарядам над земной поверхностью с расстояниями r_{i+} и r_{i-} , используя результаты, представленные в монографии (Ландау, Лифшиц, 2005).

При $r_{i+} = (6400+10)$ км и $r_{i-} = (6400+5)$ км:

$$r'_{i+} = \frac{R^2}{r_{i+}} = \frac{(6400)^2}{6410} = 6390 \text{ км, а } r'_{i-} = 6395 \text{ км}$$

Отсюда:

$$\frac{\partial\rho_{i+}}{\partial r} = \frac{2R - 2(R+10)\cos\gamma_{i+}}{\rho_{i+}}$$

$$\frac{\partial\rho'_{i+}}{\partial r} = \frac{2R - 2(R-10)\cos\gamma'_{i+}}{\rho'_{i+}} \quad (56)$$

$$I_{i+} = -\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}+1\right)\frac{\partial\rho_{i+}}{\partial r}}{\rho_{i+}^2} + \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}+1\right)\frac{\partial\rho'_{i+}}{\partial r}}{\rho_{i+}^{\prime 2}} =$$

$$= -\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}+1\right)\frac{2R-2(R+10)\cos\gamma_{i+}}{\rho_{i+}}}{\rho_{i+}^2} +$$

$$+ \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}+1\right)\frac{2R-2(R-10)\cos\gamma'_{i+}}{\rho'_{i+}}}{\rho_{i+}^{\prime 2}} \quad (57)$$

Предполагая, что $\rho_{i+} = \rho'_{i+}$, $\cos\gamma_{i+} = \cos\gamma'_{i+}$, получим для (57) и (58) выражения:

$$I_{i+} = -\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}+1\right)40\cos\gamma_{i+}}{\rho_{i+}^3} \quad (58)$$

$$I_{i-} = \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}}\left(\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}+1\right)20\cos\gamma_{i-}}{\rho_{i-}^3} \quad (59)$$

Используя представления (58) и (59), получим выражение для напряженности электрического поля у Земли

$$\begin{aligned}
 E_r &= -\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \chi \left\{ -\sum_{i=1}^N Q_{i+} e^{-\frac{\alpha}{2}(R-r_{i+})} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}}}{\rho_{i+}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}}}{\rho'_{i+}} \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{i=1}^N Q_{i-} e^{-\frac{\alpha}{2}(R-r_{i-})} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}}}{\rho_{i-}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i-}}}{\rho'_{i-}} \right] \right\} = \\
 &= \chi \left\{ -\sum_{i=1}^N Q_{i+} e^{\frac{\alpha}{2}(R-r_{i+})} \left[-\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}} \left(\frac{\alpha}{2}\rho_{i+} + 1 \right) 40 \cos\gamma_{i+}}{\rho_{i+}^3} \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{i=1}^N Q_{i-} e^{\frac{\alpha}{2}(R-r_{i-})} \left[-\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}} \left(\frac{\alpha}{2}\rho_{i-} + 1 \right) 20 \cos\gamma_{i-}}{\rho_{i-}^3} \right] \right\} \quad (60)
 \end{aligned}$$

Вычислим напряженность электрического поля, используя выражение (60) для одного генератора.

Пусть $\gamma_{i+} = \gamma_{i-} = 0^\circ$, тогда

$$\rho_{i+} = \sqrt{r^2 + r_{i+}^2 - 2rr_{i+}\cos\gamma_{i+}} = r_{i+} - R = 10 \text{ км},$$

$$\rho_{i-} = r_{i-} - R = 5 \text{ км}, \quad \frac{e^{-\frac{\alpha\rho_{i+}}{2}}}{\rho_{i+}^3} = 0.223 \times 10^{-18},$$

$$\frac{e^{-\frac{\alpha\rho_{i-}}{2}}}{\rho_{i-}^3} = 3.78 \times 10^{-18},$$

$$\frac{e^{-\frac{\alpha\rho_{i-}}{2}}}{\rho_{i-}^3} 20(1 + \alpha\rho_{i-}) = 13.23 \times 10^{-12},$$

$$\frac{e^{-\frac{\alpha\rho_{i+}}{2}}}{\rho_{i+}^3} 40(1 + \alpha\rho_{i+}) = 2.46 \times 10^{-12},$$

$$Q_{i+} = -Q_{i-} = 50 \text{ Кл}$$

$$Q_{i+} e^{-\frac{\alpha\rho_{i+}}{2}} = 11,15 \text{ Кл}, \quad Q_{i-} e^{-\frac{\alpha\rho_{i-}}{2}} = -23,6 \text{ Кл}.$$

Подставляя эти значения в выражение (60), получим для напряженности электрического поля:

$$E_r(R) = 3,1 \times 10^4 \text{ В/м,}$$

$$\text{при } Q_{i+} = -Q_{i-} = 10 \text{ Кл} \quad E_r(R) = 6,1 \times 10^3 \text{ В/м,}$$

$$\text{при } Q_{i+} = -Q_{i-} = 5 \text{ Кл} \quad E_r(R) = 3,1 \times 10^3 \text{ В/м,}$$

$$\text{при } \gamma_{i+} = \gamma_{i-} = \pi/2, \quad E_r(R) = 0$$

В случае, когда $\gamma_{i+} = \gamma_{i-} = \pi$,

$$\rho_{i+} = \sqrt{r^2 + r_{i+}^2 + 2rr_{i+}} = R + r_{i+} = 2R + 10 \text{ км, } \rho'_{i+} = 2R - 10 \text{ км.}$$

При этом экспоненциальные множители в выражении (60) обращаются ноль. Аналогичная ситуация имеет место и для отрицательного заряда. Следовательно, напряженность электрического поля также обращается в ноль при $r = R$.

В соответствии с проведенными расчетами потенциал ионосферы в условиях аэрозольного загрязнения в области $[R, r_1]$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} \varphi_{\infty}^a &= \frac{\varphi_{\infty}}{\eta} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{1}{4\pi R^2 \alpha} \sum_{s=1}^N I_s 1\lambda_s - 1\lambda_s = \right. \\ &= \left. \frac{1}{\eta} \left(\frac{1}{R^2 \alpha} \sum_{s=1}^N (|Q_{s-}| - Q_{s+}) \right) \right) \end{aligned} \quad (61)$$

$$Q_{s+} = \frac{I_s}{4\pi\lambda_{s+}}, \quad |Q_{s-}| = \frac{I_s}{4\pi\lambda_{s-}}.$$

Электрический ток, входящий в выражение (61), является током электризации, который определяет зарядовую структуру грозового облака. Сделаем численные оценки потенциала ионосферы, основываясь на экспериментальных данных. Как указывается в ряде работ для поддержания потенциала ионосферы, равного

$\varphi_{\infty} = (250 - 300)$ кВ, необходимо одновременное действие 2000 гроз по всему земному шару (Mühleisen, 1977). Однако в работе (Haas, Roble, 1979) предполагается, что эти грозы действуют в экваториальной зоне земного шара.

Обычно в дипольной модели облака $Q_{s1} < 0$, $Q_{s0} > 0$.

Поскольку $\lambda(z_{s0}) > \lambda(z_{s1})$, то $|Q_{s1}| > Q_{s0}$ и $\varphi_{\infty} > 0$.

При $|Q_{s1}| - Q_{s0} = 100$ Кл, $\alpha = (0,2-0,3)$ км⁻¹, $R = 6,4 \times 10^8$ м, $N = 2000$ по уравнению (61) $\varphi_{\infty}^0 = (220-140)$ кВ.

При $|Q_{s1}| - Q_{s0} = 150$ Кл и $\varphi_{\infty}^0 = (330-220)$ кВ, то есть полученные значения потенциала ионосферы соответствуют экспериментальным данным (Mühleisen, 1977) Выбираемые разности электрических зарядов не противоречат экспериментальным данным (Ruffledge et al., 1990) и модельным расчетам (Latham, Dye, 1990). Необходимо отметить, что приведенные выше оценки не учитывают аэрозольное загрязнение в приземном слое. Учет аэрозольного загрязнения приводит к появлению в знаменателе выражения (61) параметра η , который рассмотрен в первом параграфе статьи.

Как следует из этих расчетов:

при $N = 10^9$ м⁻³, $\eta = 0,82$,

при $N = 10^{10}$ м⁻³, $\eta = 0,21$,

т. е. в первом случае потенциал ионосферы увеличивается в 1,2, во втором — в 4,8 раза.

Элементарная оценка влияния аэрозоля на потенциал ионосферы

Рассмотрим простую оценку изменений потенциала ионосферы, которая следует из работы (Морозов, 2015). Как следует из этой работы, потенциал ионосферы при наличии аэрозольного загрязнения атмосферы связан с потенциалом ионосферы при отсутствии загрязнений в области грозовых облаков следующим соотношением:

$$\varphi_{\infty}^a = \frac{R_g^a}{R_g} \varphi_{\infty}, \quad (62)$$

где R_g^a — глобальное сопротивление сферической атмосферы с учетом областей загрязнения аэрозольными частицами.

Для R_g имеет место представление:

$$R_g = \frac{1}{4\pi R^2} \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)} = \frac{1}{S} \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)}, \quad (63)$$

где $S = 4\pi R^2$ — площадь земной поверхности.

В то же время для R_g^a можно записать выражение:

$$R_g^a = \left[\frac{1}{\gamma S} \int_0^H \frac{dz}{\lambda_1(z)} \times \frac{1}{(1-\gamma)S} \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)} \right] \times \frac{1}{\left[\frac{1}{\gamma S} \int_0^H \frac{dz}{\lambda_1(z)} + \frac{1}{(1-\gamma)S} \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)} \right]}, \quad (64)$$

где γ — доля поверхности, занимаемая областью аэрозольных загрязнений,

$\lambda_1(z)$ — вертикальный профиль электрической проводимости в области аэрозольных загрязнений.

Вычислим сопротивления атмосферы R_g и R_g^a , полагая, что в отсутствие аэрозольных частиц электрическая проводимость определяется выражением:

$$\lambda(z) = \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad \alpha = (0.2 - 0.3) \text{ км}^{-1}, \quad (65)$$

а при наличии аэрозольных частиц

$$\begin{aligned}\lambda_1(z) &= \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad z \in [H_0, H], \\ \lambda_1(z) &= \eta \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad z \in [h, H_0), \\ \lambda_1(z) &= \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad z \in [0, h).\end{aligned}\tag{66}$$

Вычисляя с помощью (64) и (66) сопротивления R_g и R_g^a , получим выражение для их отношения:

$$\begin{aligned}\frac{R_g^a}{R_g} &= \\ &= \frac{(1 - e^{-\alpha h}) + \eta^{-1}(e^{-\alpha h} - e^{-\alpha H_0}) + (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha H})}{\{(1 - \gamma)[(1 - e^{-\alpha h}) + \eta^{-1}(e^{-\alpha h} - e^{-\alpha H_0}) + (e^{-\alpha H_0} + e^{-\alpha H})] + \gamma(1 - e^{-\alpha H})\}}\end{aligned}\tag{67}$$

При $h = 0$

$$\frac{R_g^a}{R_g} = \frac{\frac{1}{\eta}(1 - e^{-\alpha H_0}) + (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha H})}{\{(1 - \gamma)\left[\frac{1}{\eta}(1 - e^{-\alpha H_0}) + (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha H})\right] + \gamma(1 - e^{-\alpha H})\}},\tag{68}$$

При $\gamma = 1$

$$\frac{R_g^a}{R_g} = \frac{\frac{1}{\eta}(1 - e^{-\alpha H_0}) + (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha H})}{(1 - e^{-\alpha H})},\tag{69}$$

При $\eta \ll 1$

$$\varphi_\infty^a = \frac{R_g^a}{R_g} \varphi_\infty = \frac{\frac{1}{\eta}(1 - e^{-\alpha H_0}) + (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha H})}{(1 - e^{-\alpha H})} \varphi_\infty\tag{70}$$

Приведем результаты некоторых вычислений:

$$\eta = 0,01; \quad H_0 = 1 \text{ км}, \quad H = 80 \text{ км}, \quad \alpha = 0,3 \text{ км}^{-1}, \quad e^{-\alpha H_0} = 0,74;$$

$$1 - 0,74 = 0,26; \quad \frac{1}{\eta} 0,26 = 26, \quad \gamma = 0,1.$$

Тогда из (67) получим: $\frac{R_g^a}{R_g} = 1,106$, $\varphi_\infty^a = 1,106\varphi_\infty$, соответственно, при $\varphi_\infty = 300$ кВ, $\varphi_\infty^a = 331$ кВ.

Для $\eta = 0,1$: $\frac{R_g^a}{R_g} = 1,075$, $\varphi_\infty^a = 1,075\varphi_\infty$, при $\varphi_\infty = 300$ кВ, $\varphi_\infty^a = 323$ кВ.

При $H_0 = 10$ км, $\varphi_\infty^a = \frac{1}{\eta} \varphi_\infty$.

Влияние облаков на токовую цепь атмосферы

При $\gamma \ll 1$, потенциал ионосферы можно считать постоянным. В этом случае столбцовые сопротивления и их отношение оцениваются по формулам:

$$R_{g1} = \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)}, \quad R_{g1}^a = \int_0^H \frac{dz}{\lambda_1(z)} \quad (71)$$

$$\frac{R_{g1}^a}{R_{g1}} = (1 - e^{-\alpha h}) + \frac{1}{\eta} (e^{-\alpha h} - e^{-\alpha H}) + (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha H}). \quad (72)$$

В случае облаков потенциал ионосферы не меняется.

Если $H_0 = 5$ км, $H = 80$ км, $h = 3$ км, $\alpha = 0,3$ км⁻¹:

$$\text{при } \eta = 0,1 \quad \frac{R_{g1}^a}{R_{g1}} = 2,65, \quad \text{при } \eta = 0,01 \quad \frac{R_{g1}^a}{R_{g1}} = 19,2$$

Соответственно плотность электрического тока при неизменном потенциале ионосферы $\varphi_\infty = 300$ кВ уменьшается в 2,65 и 19,2 раза, в такое же число раз уменьшается и напряженность электрического поля. Этот подход рассмотрен в работе (Zhou, Tinsley, 2010). Столбцовые сопротивления для облаков различных типов приведены в таблице 3, из которой следует, что наибольший вклад в столбцовое сопротивление атмосферы дают слоисто-дождевые и кучевые облака.

Столбцовое сопротивление различных облаков

Типы облаков	Столбцовое сопротивление, при сплошной облачности $\text{Ом} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{16}$
Кучевые	74,3
Слоисто-кучевые	56,8
Высоко-слоистые	56,7
Высоко-кучевые	73,6
Слоисто-дождевые	77,3
Перистые	26,9
Облака отсутствуют	10,4

Выводы

Рассмотрены два варианта стационарной модели токовой цепи при наличии аэрозольных частиц в приземном слое. Математические решения получены для двух моделей: модели токовой цепи без источников тока и модели цепи с источниками тока.

Теоретические расчеты показали, при наличии слоя аэрозольных частиц и токовых генераторов происходит увеличение потенциала и напряженности электрического поля. Получены оценки влияния облаков различных типов на электрическое сопротивление атмосферы.

Результаты могут использоваться при анализе данных измерений атмосферно-электрических параметров в районах с аэрозольным загрязнением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М. (2005) Электродинамика сплошных сред. Том VIII. — М.: Физматлит. 651 с.

Морозов В.Н. (2015) Влияние глобального распределения аэрозольных частиц на электрический потенциал ионосферы // Труды ГГО. Вып. 577. С.106–112.

Морозов В.Н. (2021) Стационарная модель токовой цепи с учетом пространственного распределения грозových генераторов // Труды ГГО. Вып. 601. С. 46–64.

Морозов В.Н. (2005) Модель нестационарного электрического поля в нижней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 2. С. 268–278.

Янке Е., Эмде Ф., Лёви Ф. (1977) Специальные функции — М.: «Наука». 342 с.

Hays P.B., Roble R.G. (1979) A Quasi-static model of global atmospheric electricity. I. The lower atmosphere // V. 84. № A7. P. 3291–3305.

Ogawa T. (1985) Fair-weather electricity // J. Geophys. Res. V. 90. D 4. P. 5951–5960.

Latham J., Dye J.E. (1989) Calculations on the Electric Development of a Small // J. Geophys. Res. V. 94. № D11. P. 13141–13144. 3144

Makino M., Ogawa T. (1984) Responses of atmospheric electric field and air-earth current to variation of conductivity profiles // J. Atmos. Terr. Phys. V. 46. № 5. P. 431–444.

Makino M., Ogawa T. (1985). Quantitative Estimation of Global Circuit. // J. Geophys. Res. V. 90. № D4. P. 5961–P3966

Mühleisen R. (1977.) The Global Circuit and its Parameters / Electrical Processes in Atmosphere —. Steinkopff. Darmstade. West Germany. P. 467–480

Rutledge S.A., Lu C., MacGorman D. (1990). Positive Cloud-to-Ground Lightning in Mesoscale Convective System // J. Atmos. Science. V. 47. № 17. P. 2085–2100.

Sapkota B.K., Varshneva N.C. (1990) On the global atmospheric electrical circuit // J. Atmos. Terr. Phys. V. 52. № 1. P. 1–20.

Zhou L, Tinsley B.A. (2010) Global Circuit model with cloud // J. Atmos. Sci. V. 67. P. 1143–1156.

УДК 551.577.1:551.515.4:004.94

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ ИЗ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА

В. А. Шаповалов, М. Ч. Залиханов, М. А. Шериева

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: ryer16@mail.ru

Поступила в редакцию 21.11.2022
Поступила после доработки 14.12.2022

Введение

Развитие вычислительных средств, коммуникационных сетей, информационных технологий и доступность огромных массивов данных об атмосферных процессах открывают широкие возможности для более глубокого изучения конвекции и ливней (Аджиев и др., 2015; Волкова и др., 2020).

Для исследования эволюции полей метеорологических величин в настоящее время все более актуальным представляется применение численных методов гидродинамического прогнозирования (Алексеева, Песков, 2016; Куксина и др., 2020), что обусловлено не только совершенствованием математического аппарата и алгоритмов при использовании более производительных вычислительных комплексов, но и применением современных средств метеорологических измерений совместно с способами усвоения разнородных данных наблюдений (Песков и др., 2012). Так, появились исследования на основе данных как современных численных моделей,

так и дистанционных наблюдений, в том числе, например, реанализа (Kumar et al., 2021). Особое внимание в них обращают на значительную роль условий развития конвекции и конденсации в формировании ливневых осадков в атмосфере (Ершова и др., 2012; Lasher-Trapp et al., 2018).

Образование ливневых осадков из конвективных облаков представляет собой сложный физический процесс, включающий конвекцию, конденсацию, перемещение частиц и множество других факторов, имеющих значительное влияние на окружающую среду (Fowler et al., 2021). Численное моделирование играет важную роль в предсказании и изучении ливней и связанных с ними опасных явлений погоды, что имеет прямое практическое применение в сельском хозяйстве, гидрологии, градостроительстве и других отраслях (Довгалюк и др., 2016; Михайловский и др., 2018; Пастушков, 2011).

Совершенствование методов численного моделирования процессов, сопровождающих образование ливневых осадков, может значительно улучшить наше понимание физики облаков и механизмов их влияния на климатические процессы.

Материалы и методы

Для исследования образования и развития ливневых осадков и связанных с ними опасных явлений погоды была использована разработанная в ФГБУ «ВГИ» нестационарная численная модель с детальным описанием гидротермодинамических, микрофизических и электрических процессов (Ашабоков и др., 2014; Ашабоков и др., 2017; Shapovalov et al., 2018).

В связи с тем, что военизированными службами фиксируются только градоопасные процессы, достаточно трудно выделить случаи только с ливневыми осадками. Для рассмотрения эволюции конвективного облака с выпадением интенсивных осадков в работе в качестве репрезентативного было выбрано облако, наблюдавшееся 09.07.2022 г., из которого выпадали ливневые осадки.

В трехмерной модели конвективного облака область моделирования имела размеры $40 \times 40 \times 12$ км. Шаг сетки модели составлял 500 м по горизонтали и 250 м по вертикали.

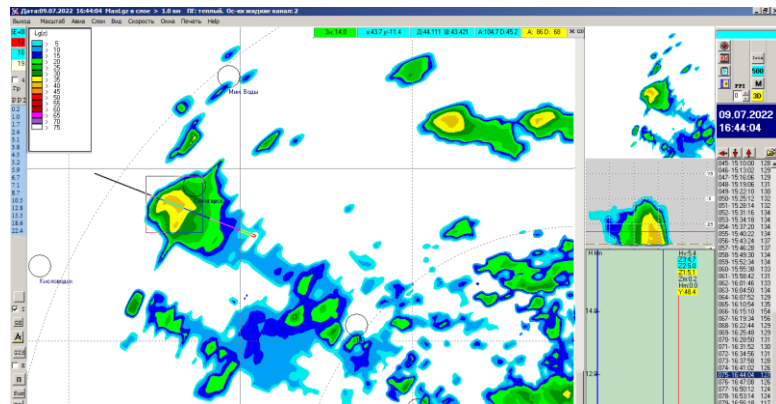


Рис. 1. Конвективное облако, дающее ливневые осадки, за 09.07.2022 г. по данным метеорологического радиолокатора МРЛ-5

Результаты и обсуждение

Остановимся на некоторых результатах моделирования выбранного облака. На рисунке 2 представлены параметры данного облака на 35-й, 45-й и 55-й минутах его развития с момента возникновения в расчетной области. Изолинии на рисунках соответствуют заданным на шкале слева значениям.

Максимальное значение влажности к 35-й минуте достигло $5,75 \text{ г/м}^3$ на высоте 4,6 км. Изолинии влажности уровня $0,5 \text{ г/м}^3$ не достигают подстилающей поверхности, т. е. сильные осадки у земли не наблюдаются. В последующие моменты времени изолинии влажности практически достигли подстилающей поверхности, что указывает на появление умеренных, а впоследствии сильных осадков. При этом максимальное значение влажности к 45-й минуте равно $5,46 \text{ г/м}^3$, что несколько меньше, чем в предыдущий момент времени. Высота расположения максимума влажности составляет 4,4 км,

что на 0,2 км ниже, чем на 35-й минуте. Размеры области, ограниченной изолиниями водности, существенно увеличились по сравнению с ее размерами в предыдущий момент времени. Можно предположить, что из облака уже выпадают умеренные жидкие осадки.

Максимальное значение лёдности на 35-й минуте развития облака фиксируется на высоте 3,4 км и составляет $1,76 \text{ г/м}^3$ (рис. 3), а изолинии лёдности $0,1 \text{ г/м}^3$ не достигают поверхности земли.

Сравнение рисунков 2 и 3 показывает, что области, ограниченные изолиниями водности и лёдности, пересекаются. Это указывает на то, что условия в облаке становятся достаточно благоприятными для роста кристаллов за счет захвата капель.

Максимальное значение лёдности на 45-й минуте развития облака фиксируется на высоте 2,6 км и составляет $1,69 \text{ г/м}^3$ (рис. 3, в центре). По сравнению с 35-й минутой наблюдается незначительное уменьшение максимального значения лёдности (на $0,07 \text{ г/м}^3$), а также положения его над поверхностью земли (уменьшение на 0,8 км). При этом размеры области, ограниченной изолиниями лёдности, существенно увеличились, она практически достигла поверхности земли.

На 55-й минуте развития облака максимальное значение лёдности снижается до $1,47 \text{ г/м}^3$ (на $0,32 \text{ г/м}^3$) и перемещается на высоту 1,8 км. Изолинии лёдности достигают поверхности земли, а размеры области, ими ограниченной, существенно увеличиваются по сравнению с предыдущим моментом времени. Можно предположить, что наряду с жидкими из облака начинают выпадать и твердые осадки.

На рисунке 4 (слева) приведены изолинии вертикальной составляющей скорости воздуха в облаке и вне его на 35-й минуте. Поле данного параметра имеет достаточно сложную структуру. Максимальное значение вертикальной составляющей скорости восходящих потоков воздуха составляет 13 м/с на высоте 3,2 км, а максимальное значение скорости нисходящих потоков — 2,7 м/с (по абсолютной величине) на высоте 5 км. Заметим, что максимальное значение скорости восходящих потоков в данный момент времени не очень велико.

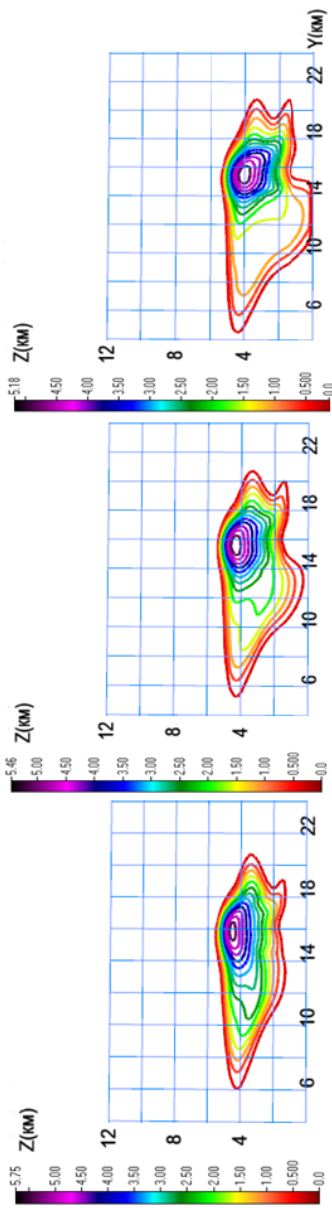


Рис. 2. Изолинии водности на 35-й, 45-й и 55-й минутах развития облака (слева направо)

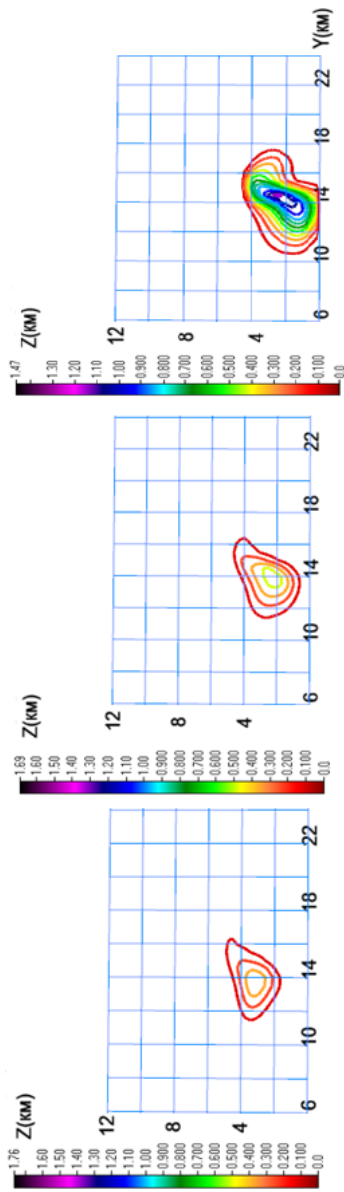


Рис. 3. Изолинии лёдности на 35-й, 45-й и 55-й минутах развития облака (слева направо)

На 45-й минуте развития облака поля восходящих и нисходящих потоков воздуха сохраняют сложную структуру (рис. 4, в центре). По сравнению с 35-й минутой наблюдается некоторое уменьшение максимальной вертикальной составляющей скорости восходящих потоков воздуха (с 13 до 12,5 м/с), но высота, на которой она фиксируется, остается равной 3,2 км. Максимальная скорость нисходящих потоков воздуха уменьшилась по абсолютной величине с 2,7 до 2,56 м/с, при незначительном изменении ее высоты над поверхностью земли (с 5 до 4,4 км). В целом можно сказать, что, начиная с 35-й минуты, облако находится в квазистационарном состоянии.

К 55-й минуте (по сравнению с 45-й) максимальная вертикальная составляющая скорости восходящих потоков воздуха изменилась в сторону уменьшения: с 12,5 до 11,3 м/с, а высота ее расположения снизилась с 3,2 до 3 км. При этом размеры области, ограниченной изолиниями скоростей восходящих потоков, остались неизменными.

Максимальная отражаемость в вертикальной плоскости на 35-й минуте развития облака составляет 37 дБZ на высоте 4,4 км (рис. 5). На 45-й минуте по сравнению с предыдущим моментом времени максимальная отражаемость увеличилась с 37 до 43,7 дБZ, а высота, расположения максимума отражаемости снизилась с 4,4 до 4,2 км. Размеры области, ограниченной изолиниями отражаемости 35 дБZ, значительно увеличились, кроме этого, сама область, ограниченная линией темно-зеленого цвета, достигла поверхности земли (см. рис. 5 в центре).

Такое поведение этих параметров указывает на то, что интенсивность осадков и площадь их выпадения увеличились по сравнению с предыдущим моментом времени.

К 55-й минуте максимальное значение отражаемости увеличилось с 43,7 дБZ до 48,3 дБZ, а высота области максимальной отражаемости снизилась с 4,2 км до 3,8 км. Размеры области, ограниченной изолиниями отражаемости 10 дБZ, значительно увеличились, а нижняя часть данной области достигает поверхности земли (см. рис. 6). Можно предположить, что на достаточно большой площади выпадают как жидкие, так и отдельные твердые осадки

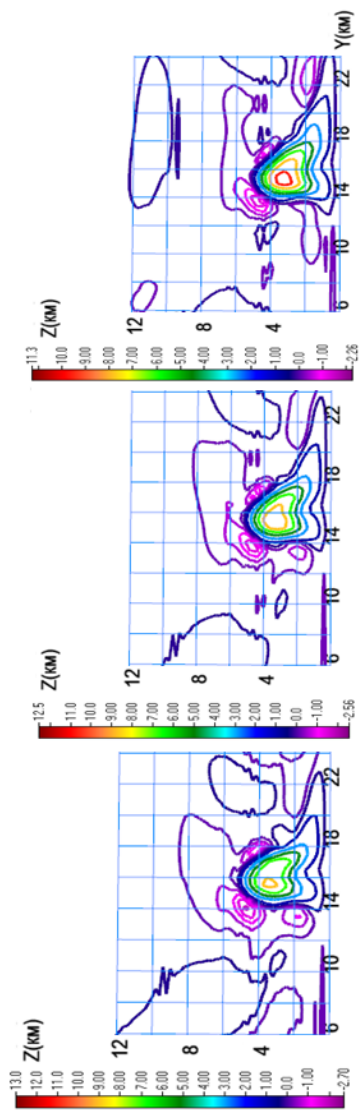


Рис. 4. Изолинии вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в облаке и околооблачном пространстве на 35-й, 45-й и 55-й минутах

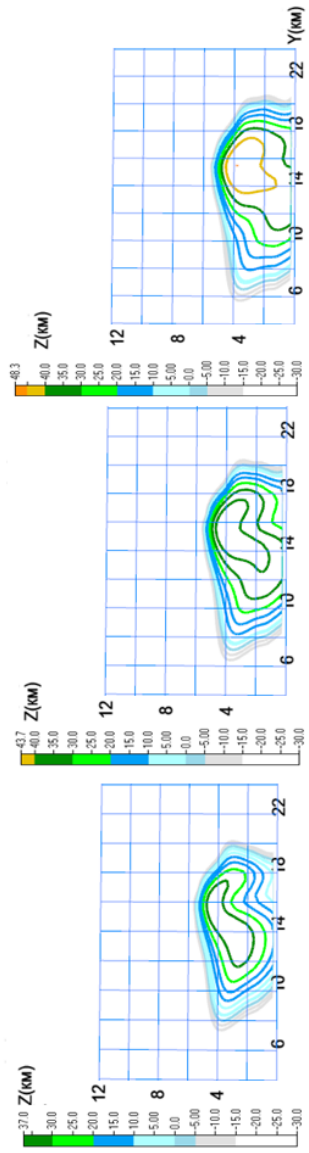


Рис. 5. Изолинии отражаемости в вертикальной плоскости на 35-й, 45-й и 55-й минутах (слева направо)

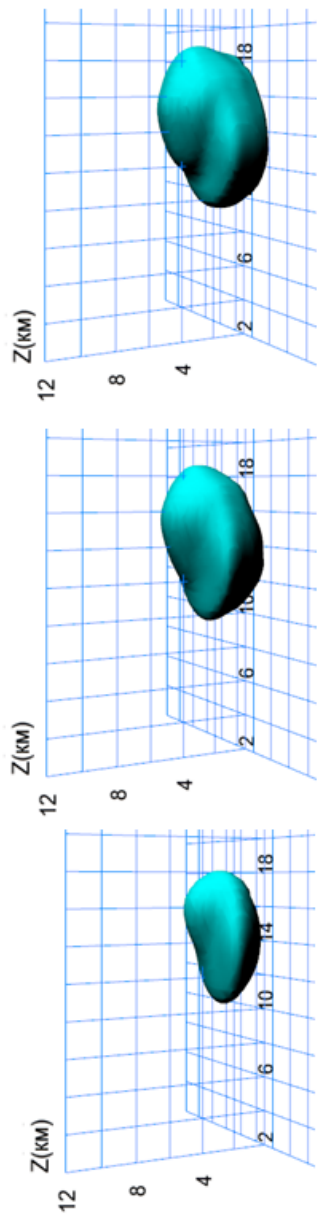


Рис. 6. Изоповерхности отражаемости уровня 10 дБZ на 35-й, 45-й и 55-й минутах (слева направо)

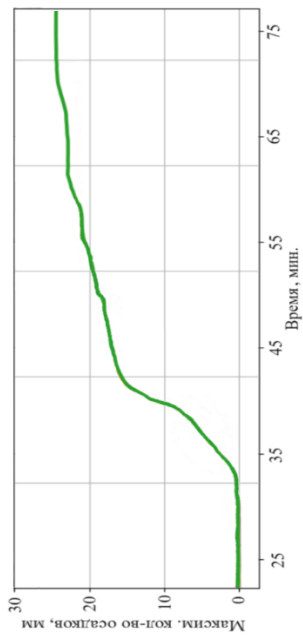


Рис. 7. Изменение количества осадков во времени

С учетом характера изменений полей изолиний и максимальных значений остальных параметров, видимо, можно сказать, что характеристики осадков достигли максимальных значений, развитие облака прекратилось и начинается процесс его диссипации. При этом, как было отмечено, из облака выпадают смешанные осадки, состоящие из капель и ледяных частиц. Для конвективной ячейки по данным интенсивности осадков на уровне 500 м путем интегрирования за каждый шаг по времени модели построен график количества осадков (рис. 7).

График количества осадков, выпадающих из конвективной ячейки (рис. 7), построен путем интегрирования модельных данных об интенсивности осадков на уровне 500 м.

Из рисунка 7 следует, что конвективное облако достигает устойчивого квазистационарного состояния к 40-й минуте после чего начинается процесс его диссипации. Максимальное количество осадков из облака с течением времени нарастает по-разному: с разной скоростью, до разных значений и за разное время, т. е. интенсивность осадков резко меняется не только в пространстве, но и во времени.

Выбранное конвективное облако, характерное для процесса 09.07.2022 г., сопровождается ливнем и обладает достаточно сложной динамикой развития.

Заключение

Полученные результаты указывают на сложную динамику развития конвективного облака, изменение его размеров и интенсивности осадков со временем, распределения их количества по подстилающей поверхности.

Максимальные значения водности и лёдности в облаке изменяются со временем и по высоте над поверхностью земли. Наблюдается увеличение размеров областей для этих параметровограниченных изолиниями 0.5 г/м^3 , а также пересечение этих областей, указывающее на благоприятные условия для роста кристаллов за счет захвата капель. Также отмечаются осадки, состоящие из жидкой и твердой фазы. Изолинии отражаемости при

этом свидетельствуют о значительных изменениях в интенсивности осадков с течением времени, подтверждая значительную роль смешанных осадков. Представленные выводы могут служить основой для дальнейших исследований процессов облако и осадкообразования.

Данные о скорости и высоте воздушных потоков, а также отражаемости в вертикальной плоскости являются важной информацией при прогнозировании погодных условий и изучении процессов формирования опасных явлений погоды, а потому являются одним из путей использования полученных результатов в практической деятельности.

Дальнейшие исследования будут направлены на детализацию описания микрофизических процессов в конвективных облаках. Новые данные, полученные в сериях численных экспериментов, будут способствовать более глубокому пониманию физических механизмов образования ливневых осадков и послужат для улучшения оперативных моделей и методов прогнозирования погоды и предупреждения возможных негативных последствий, связанных с сопутствующими им метеорологическими явлениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аджиев А. Х., Абшаев А. М., Геккиева Ж. М., Тумгоева Х. А. (2015). Исследования быстроразвивающихся опасных атмосферных процессов и разработка системы их мониторинга в интересах обеспечения безопасности жизнедеятельности // Известия ЮФО. Технические науки. № 12 (173). С. 182–193.

Алексеева А. А., Песков Б. Е. (2016). Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. № 360. С. 135–148.

Ашабоков Б. А., Кагермазов А. Х., Шаповалов А. В. (2014). О новом подходе к формированию начальных условий для моделей грозоградовых облаков // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. Т. 16. № 2. С. 102–108.

Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Шаповалов А. В., Шаповалов В. А. (2017). Физика облаков и активных воздействий на них. — Нальчик: Печатный двор. 240 с.

Волкова В. И., Бадахова Г. Х., Ашуров Ш. А. (2020). Ливневые осадки на Ставрополье // Евразийское Научное Объединение. № 5–7. С. 578–580.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Синькевич А. А., Торопова М. А. (2016). Пример результатов расчетов эволюции осадкообразующего конвективного облака с помощью полной трехмерной модели // Труды ГГО. № 582. С. 92–115.

Ершова Т. В., Горбатенко В. П., Клипова О. А. (2012). Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестник Томского государственного педагогического университета. № 7 (122). С. 9–14.

Куксина Л. В., Голосов В. Н., Промахова Е. В. (2020). Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. № 1. С. 11–22.

Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Аджиев А. Х., Геккиева Ж. М. (2018). О связях осадкообразования и электризации многоячейковых конвективных облаков / Доклады Третьей международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». — Ставрополь. С. 75–79.

Пастушков Р. С. (2011). Численное моделирование активных воздействий на конвективные облака: актуальные направления, нерешенные задачи, возникающие вопросы (по публикациям 2007–2010 гг.) / Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24–28 октября 2011 г. — Нальчик: Печатный двор. С. 16–25.

Песков Б. Е., Дмитриева Т. Г., Бухаров М. В. (2012). Развитие методов диагноза и прогноза летних шквалов и ливней с учетом спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. Т. 9. № 2. С. 234–242.

Fowler H. J., Lenderink G., Prein A. F., Westra S., Allan R. P., Ban N. et al. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes // Nature Reviews Earth & Environment. № 2. P. 107–122.

Kumar S., Panda B., Raju P. V. S. (2021). Numerical Simulation of Heavy Rainfall Using Weather Research and Forecast (WRF) System / Proceedings of International Conference on Scientific and Natural Computing. — Springer, Singapore. P. 127–136. DOI: 10.1007/978-981-16-1528-3_11.

Lasher-Trapp S., Kumar S., Moser D. H., Blyth A. M., French J. R., Jackson R. C., Plummer D. M. et al. (2018). On different microphysical pathways to convective rainfall // Journal of Applied Meteorology and Climatology. Т. 57. № 10. С. 2399–2417.

Shapovalov V. A., Shapovalov A. V., Koloskov B. P., Kalov R. Kh., Stasenko V. N. (2018). Numerical study of the dynamic, thermodynamic and microstructural parameters of convective clouds // Natural Science. V. 10. № 2. С. 63–69.

РОЛЬ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА В ЭВОЛЮЦИИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ

Л. Т. Созаева, М. Ч. Залиханов, М. А Шериева

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: ljk_62@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.11.2022
Поступила после доработки 19.12.2022

Введение

Несмотря на достижения в исследовании отдельных физических процессов, протекающих в облаках, до настоящего времени нет исчерпывающих знаний о влиянии атмосферы, особенно в приземном слое, на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков. Механизмов влияния окружающей среды на процессы облакообразования немало, и все они обусловлены состоянием атмосферы: полями температуры, влажности, давления и ветра, структурой электрического поля, составом аэрозоля и т. д. Исследование роли того или иного процесса на образование и развитие облаков основано на изучении изменений полей параметров атмосферы.

Одним из основных процессов, способствующих формированию конвективных облаков в атмосфере, является термическая конвекция, возникающая при появлении перегрева воздуха в отдельных областях подстилающей поверхности при неустойчивой температурной стратификации в нижних слоях атмосферы. В таких условия перегретый воздух начинает подниматься вверх и на уровне

конденсации становится насыщенным, что при наличии ядер конденсации приводит к образованию облачных капель. Исследования термической конвекции проводятся с помощью математических моделей облаков (Довгалоук и др., 2008, 2010; Веремей и др., 2016; Станкова, Петров, 2015; Ашабоков, Шаповалов, 2008).

Целью данной работы состоит в исследовании влияния температуры начального теплового импульса на процессы образования и развития градовых облаков

Эволюция микроструктурных характеристик градовых облаков (водность, лёдность и суммарная водность и лёдность) рассмотрена для трех вариантов начального теплового импульса.

Материалы и методы исследований

Численные эксперименты проводились с помощью модели конвективного облака, разработанной в Высокогорном геофизическом институте (Ашабоков, Шаповалов, 2008; Ашабоков и др., 2017).

Используемая модель имеет блочную структуру. Блок гидротермодинамики содержит уравнения движения, описывающие влажную конвекцию в приближении Буссинеска и учитывающие адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов. Микрофизический блок представлен системами уравнений, описывающими трансформацию функций распределения по массам капель, их осколков и ледяных частиц за счет процессов конденсации, коагуляции, аккреции, дробления, замерзания и т. д. Электрический блок включает уравнения для расчета количества электричества, уравнения Пуассона для потенциала электростатического поля и формулы для напряженности электрического поля.

Для наглядного представления результатов расчетов используется блок трехмерной визуализации полей характеристик конвективного облака. В модели рассматривается 61 категория капель с радиусами от 4 мкм до 4 мм и 75 категорий ледяных кристаллов с эффективными радиусами от 4 мкм до 2 см.

Реализация математических моделей конвективных облаков сопряжена с серьезными трудностями, связанными с формированием входных данных, определяющих начальные значения метеопараметров атмосферы. Они вызваны недостаточностью пунктов аэрологического зондирования атмосферы в масштабах расчетной области, особенно для многомерных численных моделей облаков, в том числе и для используемой в данной работе трехмерной нестационарной модели.

Возможность применения выходной продукции глобальной модели для замены данных фактического зондирования была проверена на примере расчета параметров атмосферы, используемых в прогнозе града, а следовательно, условий, приводящих к развитию мощных кучевых облаков (Кагермазов, Созаева, 2020, 2021).

Формирование исходных данных модели облака проводится по методике А. В. Шаповалова (2018), в соответствии с которой начальные значения давления, температуры воздуха, точки росы, направления и скорости ветра задаются по выходным данным глобальной модели атмосферы GFS NCEP (<https://www.emc.ncep.noaa.gov>).

Отметим, что выходная продукция этой модели выдается с шагом 22 км по горизонтали. По вертикали шаг соответствует принятым в метеорологии стандартным изобарическим уровням. Моделирование облака проводится в пространственной области размером $60 \times 60 \times 16$ км, расположенной над метеостанцией Минеральные воды.

Для начального момента времени параметры атмосферы в узлах расчетной области с шагом 0,5 км по горизонтали и 0,25 км по вертикали рассчитываются по данным глобальной модели с применением трехмерной бикубической интерполяции.

Форма теплового импульса представляется в виде объемного цилиндра высотой 2 км с радиусом 2,6 км в горизонтальной плоскости.

Результаты исследований

Результаты численных экспериментов представлены на примере моделирования развития облака за 20.08.2020 г. В этот день Ставропольской военизированной службой были зафиксированы ливни, грозы и град в радиусе репрезентативности данных аэрологического зондирования на станции Минеральные воды.

При инициализации модели начальный перегрев (тепловой импульс) задавался равным 1, 2 и 3 °С, что соответствует реальным условиям.

В результате численного эксперимента рассчитываются функции распределения капель и кристаллов по размерам во всех узлах расчетной области в различные моменты времени, на основании которых определяются водности, лёдности и суммарные водности и лёдности, обусловленные трансформацией капель и твердых частиц.

На рисунке 1 изображены изоповерхности водности и лёдности (3 г/м³) на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости на 20-й, 30-й и 40-й минутах развития облака для трех вариантов значений начального перегрева (1, 2, 3 °С).

В таблице 1 представлены Максимальные значения характеристик облака и высоты, на которых они достигаются, приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Максимальные значения характеристик облака
и уровни, на которых они достигаются**

Параметры облака	Варианты расчетов								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	20 мин			30 мин			40 мин		
Водность, г/м ³	5,0	4,8	4,7	5,3	4,7	4,4	5,0	5,1	5,1
<i>уровень, км</i>	4,4	5,5	6,0	5,0	5,0	5,0	4,5	4,5	4,5
Лёдность, г/м ³	0,1	3,9	5,5	4,4	4,5	4,3	4,1	4,3	4,3
<i>уровень, км</i>	6,5	7,0	7,5	6,5	7,0	7,0	6,0	6,0	6,0
Суммарная водность и лёдность, г/м ³	4,4	5,8	6,8	7,1	6,6	6,4	6,9	6,9	6,9
<i>уровень, км</i>	5,5	6,5	7,5	6,6	6,0	6,0	5,0	5,0	5,0
Вертикальная скорость, м/с	12	14	17	12	13	13	18	19	19

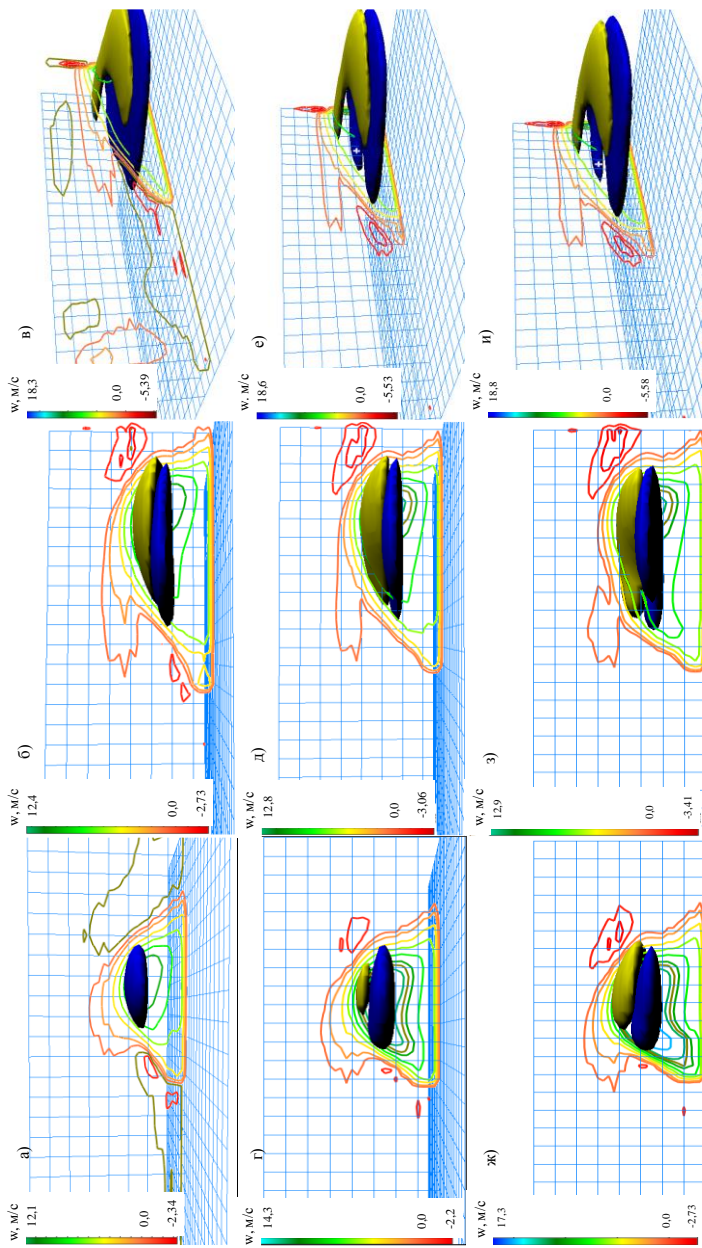


Рис. 1. Изоповерхности водности 3 г/м^3 (синим цветом) и ледности 3 г/м^3 (желтым цветом) на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости (Созаева, 2021): а), г), ж) — на 20-й мин; б), д), з) — на 30-й мин; в), е), и) — на 40-й мин развития облака;

а), б), в) — перегрев $1 \text{ }^\circ\text{C}$; г), д), е) — перегрев $2 \text{ }^\circ\text{C}$; ж), з), и) — перегрев $3 \text{ }^\circ\text{C}$. Вспомогательная сетка $2 \times 2 \text{ км}$

На рисунках 1 а, г, ж приведены изоповерхности водности и лёдности на фоне изолиний скоростей восходящих потоков на 20-й минуте развития облака для трех вариантов перегрева 1, 2 и 3 °С. По результатам моделирования получено, что в первом сформировалось только капельное облако на высоте 4,4 км, во втором — появляется незначительный объем лёдности 0,1 г/м³ на 7 км, а в третьем — он достигает 5,5 г/м³ на высоте 7,5 км.

На этой стадии развития облака вертикальные скорости характеризуются большой изменчивостью 12–17 м/с (табл. 1). Перегрев, равный 3 °С, способствует более интенсивному подъему начального «термика» и выносу конденсированной влаги в более высокие слои атмосферы с отрицательной температурой. Все это приводит к ускорению образования ледяной фракции вследствие замерзания переохлажденных капель.

На рисунках 1 б, д, з приведены изоповерхности водности и лёдности на 30-й минуте развития облака также для трех вариантов перегрева. На этой стадии продолжается формирование ледяной фракции во всех трех вариантах. Но в первом варианте значение лёдности достигает максимума на высоте 6,5 км и отстает от максимального значения водности, хотя и в меньшей степени, чем на 20-й минуте его развития, когда вертикальные скорости почти выравниваются.

На 40-й минуте развития максимальные характеристики облака (водность, лёдность, суммарная водность и лёдность, вертикальная скорость) слабо зависят от начального перегрева (рис. 1 в, е, и). Причем не отличаются и высоты, на которых они достигаются.

Таким образом, на начальной и средней стадиях развития конвективного облака на формирование ледяной фракции оказывает влияние степень перегрева: чем она больше, тем выше скорость восходящих потоков и тем быстрее растет верхняя граница облака, и, следовательно, быстрее образуется ледяная фаза.

Заключение

Результаты математического моделирования облаков, выполненного на ограниченном материале, показывают, что перегрев

(начальный тепловой импульс) вызывает увеличение интенсивности развития конвективного облака на начальной и средней стадиях.

С физической точки зрения это можно объяснить тем, что увеличение начального перегрева способствует более высоким скоростям восходящих потоков, которые интенсивнее поднимают начальный «термик» в верхние слои атмосферы, где активно формируется ледяная фаза.

Численные эксперименты для исследования роли теплового импульса в эволюции конвективного облака предполагается продолжить на расширенном материале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В. (2008). Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. — Нальчик: КБНЦ РАН. 257 с.

Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Шаповалов А. В., Шаповалов В. А. (2017). Физика облаков и активных воздействий на них. — Нальчик: Печатный двор. 240 с.

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С. (2016). Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. Вып. 582. С. 45–91.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров А. С., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Стасенко В. Н., Степаненко В. Д., Шаповалов А. В., Щукин Г. Г. (2008). Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока // Труды ГГО. Вып. 558. С. 102–142.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров А. С., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Стасенко В. Н., Степаненко В. Д., Шаповалов А. В., Щукин Г. Г. (2010). Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II. Микрофизический блок модели // Труды ГГО. Вып. 562. С. 7–39.

Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. (2020). Валидация выходных данных глобальной модели атмосферы по данным аэрологического зондирования с нарастающей заблаговременностью // Наука. Инновации. Технологии. № 4. С. 137–148.

Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. (2021). Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозоградовых процессов с заблаговременностью до пяти суток // Гидрометеорология и экология. Ученые записки РГГМУ. № 65. С. 671–680. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-65-671-680.

Официальный сайт Национальных центров экологического прогнозирования США. Центр экологического моделирования [Электронный ресурс]. <https://www.emc.ncep.noaa.gov/> (дата обращения: 16.04.2020).

Созаева Л. Т., М. А. Шериева (2021). Влияние температуры начального теплового импульса на процессы образования облаков по результатам математического моделирования / В сб.: Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (08–10 сентября 2021 г.). — Нальчик: Принт Центр. С. 43–46.

Станкова Е. Н., Петров Д. А. (2015). Комплексная информационная система, предназначенная для формирования входных данных моделей конвективных облаков // Вестник СПбГУ. Сер. 10. Вып. 3. С. 83–95.

Шаповалов В. А. (2018). Использование выходных данных глобальной модели атмосферы в качестве предикторов при численном моделировании облаков // Ученые записки РГГМУ. № 52. С. 40–48.

К 150 ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ СЛУЖБЫ ПОГОДЫ В ГЛАВНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ (ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ) ОБСЕРВАТОРИИ

1 (13) января 1872 г. в Главной физической обсерватории (ГФО) вышел первый рукописный «Метеорологический бюллетень».

Этот день принято считать днем рождения российской службы погоды. Первоначально в «Ежедневном бюллетене», составляемом лейтенантом флота Э.В. Майделем, который был прикомандирован в ГФО, представлялись данные 28 метеостанций: 26 российских и 2 зарубежных. Однако уже к концу 1872 г. в «Ежедневный бюллетень» включались телеграфные сообщения с 55 станций, при этом число западноевропейских станций увеличилось до 19. Карта атмосферного давления для территории Европейской части России появилась в «Бюллетене» лишь спустя 2 года.

В июле 1876 г. в ГФО было создано отделение морской метеорологии, которое начало работу с 1877 г. под руководством М.А.Рыкачева. В разные годы в этом отделении работали известные специалисты: Э.В.Майдель, В.В. Кеппен, И.П. Семенов-Тянь-Шанский, Ю.М. Шокальский, А.А. Фридман. В функции отделения входили рассылка штормовых предупреждений и издание «Ежедневного бюллетеня». Штормовые предупреждения стали составляться вначале для Ладоги и Балтийского моря, а позже для Черного и Каспийского морей. Если в 1874 г. было отправлено 5 штормовых предостережений, то в 1878 г. их число достигло 123. Важным событием в истории службы погоды явилось введение предсказаний погоды для Петербурга с заблаговременностью 1 сутки. В прогнозе приводилась ожидаемая температура на 7 часов утра, облачность, направление и сила ветра. Вариант «Бюллетеня погоды» печатался в «Санкт-Петербургских ведомостях», на него можно было подписаться: стоимость подписки в конце XIX века для граждан России составляла 12 рублей, а для зарубежных 18 рублей.

После начала Первой мировой войны ГФО по соглашению с Главным управлением Генерального штаба и Морским генеральным

штабом приступила к составлению прогнозов погоды для военных нужд. Летом 1915 г. ГФО перешла на передачу зашифрованных метеорологических сводок, прекратились издание метеорологического бюллетеня и публикация синоптических карт в газетах. Отделение ежедневного метеорологического бюллетеня ГФО стало одним из оперативных рабочих органов Главного метеорологического управления. Именно в нем составлялись синоптические карты и прогнозы погоды для обширных территорий театров военных действий, отправляемые в армейские штабы различных уровней.

Опыт развития военной метеорологии в годы Первой мировой войны, включая построение «обрезанной карты», широко использовался в годы Великой Отечественной войны.

В настоящее время благодаря усовершенствованию глобальных и мезомасштабных прогностических моделей оправдываемость суточных прогнозов погоды в субъектах Российской Федерации сохраняется на уровне 96% (96,6). Оправдываемость штормовых предупреждений об опасных гидрометеорологических явлениях составляет порядка 95% (95,5). На основе штормовых предупреждений принимаются превентивные меры, позволяющие смягчить последствия стихийных бедствий.

Подробнее об истории становления, развитии и современном состоянии службы погоды можно узнать из статей:

Кознов С.П. (1972) Служба погоды Санкт-Петербурга — Петрограда — Ленинграда (к 100-летию со дня организации) // Метеорология и гидрология. № 9. С. 111-114.

Петросянец М.А. (2001) История развития службы погоды в России / В сб. 165 лет Гидрометеорологической службе России — СПб: Гидрометеоиздат. С. 45–67.

Мещерская А.В. Долгосрочные метеорологические прогнозы (2001) / В сб. Современные исследования Главной геофизической обсерватории. Том 2. — СПб: Гидрометеоиздат. С.75–96.

Вильфанд Р.М. (2011). Развитие технологий метеорологического прогнозирования в Российской Федерации / В сб. Труды VI Всероссийского метеорологического съезда — СПб: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». С. 65–75.

Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б. (2015). Технологии метеорологического прогнозирования в Российской Федерации: состояние и перспективы / В сб. Труды VII Всероссийского метеорологического съезда — СПб: ООО «Д Арт». С. 32–42.

В настоящей публикации вниманию читателей предлагается статья Евгения Ивановича Тихомирова — геофизика широкого профиля, синоптика – энциклопедиста, метеоролога, опубликованная в 1925 г. в журнале Климат и погода, вып. 2–3, с. 60–64.

К ИСТОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ СЛУЖБЫ ПОГОДЫ

Е. И. Тихомиров

Вопрос о предсказании погоды почти также стар, как и само человечество. Первые соответственные попытки делались еще на заре культурной жизни человека. Так при раскопках Ниневии среди глиняных дощечек, относящихся к первым временам Вавилонии, т. е. к эпохе за 3000 лет до нашей эры была найдена одна с надписью: «Когда солнце окружено кругом, то выпадает дождь». В Евангелии от Луки мы читаем: «Когда вы видите облако, поднимающееся с запада, тотчас же говорите: дождь будет и бывает дождь».

Народная практика выработала целые сборники таких примет. Среди них находится много явно нелепых, но немало и правильных, далеко еще не вполне оцененных. Все они притом относятся к тому времени, когда никаких приборов для наблюдений еще не существовало, но когда вместе с тем уже умели выделить среди комплекса сложных явлений такие, между которыми существует известный параллелизм. Круг примет, относящихся к этому периоду, хорошо обрисован в стихотворении Пушкина (1822 г.):

Старайся наблюдать различные приметы:
Пастух и земледел в младенческие лета,
Взглянув на небеса, на западную тень.
Умеют уж предречь и ветер и ясный день,
И майские дожди, младых полей отраду,
И мразов ранний хлад, опасный винограду.
Так, если лебеди на лоне тихих вод
Плескаясь вечером, окличут твой приход,
Иль солнце яркое зайдет в печальны тучи,
Знай: завтра сонных дев разбудит дождь ревучий,
Иль бьющий в окна град, а ранний селянин,
Готовясь уж косить высокий злак долин,
Услыша бури шум, не выйдет на работу.
И погрузится вновь в ленивую дремоту.

Изобретение в конце XVI в. термометра (Галилеем, 1597), а затем и барометра (Торичелли, 1648) поставили предсказание погоды на более прочную почву. Вскоре уже после изобретения последнего было замечено, что между изменениями показаний барометра и погодой существует тесная связь, так что, говоря словами Паскаля, «знание высоты ртути очень полезно земледельцу и путешественнику для знания состояния погоды как в настоящем, так и в ближайшем будущем».

Барометр, или просто «стекло», как его называли в старину, быстро вошел в морскую практику и появился новый цикл примет, принадлежащих исключительно морякам. Некоторые из них были сведены вместе и, благодаря своей стихотворной форме, передавались из поколения в поколение. Вот в переводе с английского несколько таких примет:

Когда ртуть падает низко,
Готовьтесь к ветру.
Когда же ртуть поднимается высоко,
Ставьте все паруса.

Если барометр упал очень низко и потом немного поднимается,
Приготовляйтесь к очень свежему ветру.

Медленное изменение барометра служит признаком устойчивости
погоды, Быстрое изменение его влечет скорую смену погоды.

Изобретение барометра окрылило многих ученых надеждой, что скоро удастся проникнуть в природу законов, управляющих погодой. Чаяния эти весьма ярко и выпукло выражены были 170 лет тому назад Ломоносовым в следующем отрывке из его «письма к И. И. Шувалову о пользе стекла»:

Уже в стекле нам барометры
Хотят предвозвещать, коль скоро будут ветры,
Коль скоро дождь густой на нивах зашумит
Иль облаки прогнав, их солнце осушит.
Надежда наша в том не льститися:
Стекло поможет нам, и дело совершится.
Открылось точно им движение светил,
Чрез тож откроется в погоде разность сил.
Коль могут счастливы селяне быть оттоле,
Когда не будет зной ни дождь опасны в поле.
Какой способности ждать должно кораблям,
Узнав, когда шуметь или молчать волнам,
И плавать по морю безбедно и спокойно.
Велико дело в сем и гор златых достойно.

Но эта надежда оказалась обманчивой и тот же Ломоносов в своей речи «О воздушных явлениях» указывает, что несмотря «на почти бесчисленные наблюдения перемен и явлений атмосферных, производимые по всей Европе», они представляют громадный беспорядочный материал. Ломоносов говорит даже, что наблюдения производятся физиками «не столько для истолкования оных, сколько для исполнения должности», вследствие чего «утомлена и почти умерщвлена сия лучшая часть натуральной науки». И Ломоносов был

во многом прав. Наблюдения производились без строго выработанного плана, приборами, часто не сравненными между собой, а потому не имели никакого научного значения. Реомюр, например, наблюдал свой термометр частью в Париже, частью в деревне и затем обе серии свел в одну, а один добровольный наблюдатель погоды в Падуе ежедневно с 1725 г. по 1761 г. производил отсчеты по термометру, помещенному, удобства ради, у него в комнате.

В своем «Рассуждении о большой точности морского пути», прочитанном им 8 мая 1759 г. на заседании Академии Наук, Ломоносов, повторяя мысли, высказанные им в приведенном выше отрывке из «Письма», говорит: «все сие по истинной теории ничем другим, как частыми и верными мореплавающими наблюдениями и записками перемен воздуха утверждено и в порядок приведено быть должно. А особливо, когда бы в различных частях света, в разных государствах учредили самопишущие метеорологические обсерватории».

В этих словах Ломоносовым, по-видимому, впервые выражена чрезвычайно плодотворная мысль о том, что метеорологические наблюдения в одном пункте мало что могут дать для прогресса «лучшей части натуральной науки» и что для этого необходимо устройство сети таких пунктов с частыми и точными наблюдениями.

К сожалению, как и другие гениальные провидения нашего первого ученого, эта мысль еще долго не получила развития. Только учреждение в 1780 г. так называемого Пфальцского (или Мангеймского — прим. ред.) Метеорологического Общества¹ привело к тому, что на протяжении «от Уральских гор на востоке до Кембриджа в Соед. Штатах на западе и от Гренландии и Норвегии на

¹ В 1781 году Академией наук и изящной словесности курфюрста Пфальцского в немецком Мангейме на Рейне было основано первое в мире метеорологическое общество. Общество обеспечивало наблюдателей разных стран (в том числе добровольных) однотипными приборами. Принятая Обществом программа наблюдений предусматривала проведение наблюдений в четыре единых срока: в 7, 11, 14 и 21 ч. В 1799 г. Мангеймское метеорологическое общество прекратило свое существование (прим. ред.).

севере до Рима на юге» была создана сеть из 39 станций, снабженных выверенными и сравненными между собой: барометрами, термометрами, дождемерами и магнитными стрелками.

Хотя французская революция быстро положила конец столь полезному начинанию, все-таки опубликованные в 13 томах наблюдения дали возможность ряду выдающихся ученых начала XIX в. произвести чрезвычайно важные работы и этим открыть новую эпоху в учении о погоде.

Уже в 1780 г. Лавуазье, говоря в одной из заметок о предсказании погоды, так заканчивает ее: «предсказание изменений, которые должны произойти в погоде, есть искусство, имеющее свои правила и принципы, искусство, требующее большой опытности и внимательности от умелого физика. Необходимые данные для этого искусства следующие: ежедневные и постоянные наблюдения изменений высоты ртути в барометре, силы и направления ветров на различных высотах, гигрометрического состояния воздуха... Со всеми этими данными почти всегда возможно предвидеть за день–два, с очень большой вероятностью будущую погоду; думают, даже, что не невозможно каждое утро печатать дневник предсказаний, который мог бы быть очень полезным обществу».

К этим словам Лавуазье и в настоящее время мало что можно прибавить по существу. Надо только помнить, что в основе идей Ломоносова и Лаувазье лежали теоретические рассуждения, делающие чрезвычайно много чести их проницательности, но не опирающиеся

на фактические данные за отсутствием таковых. Возможность сделать этот последний, но необходимый, шаг выпала на долю немецкого физика Г. В. Брандеса (1777–1834). В опубликованной им в 1820 г., на основании материалов Пфальцского Общества, работе «История Погоды 1783 года». Брандес, опираясь на ряд полученных им выводов пришел к заключению о необходимости организовать метеорологическую службу для изучения бурь.

Только что указанная работа Брандеса, а затем его диссертация «О быстрых колебаниях, наблюдаемых в атмосферном давлении» (1826 г.) наглядно показали, что для предсказания погоды необходимо

соблюдение двух условий: существование сети наблюдательных пунктов и затем быстрая передача сведений в центр. Первое условие в это время (двадцатые годы XIX в.) было уже в известной мере выполнено. В России, например. Академия Наук в 1820 году получала наблюдения с 18 станций, а к 1830 г. с 27. Что касается быстрой передачи наблюдений, то она была в то время невозможна, и только изобретение электрического телеграфа технически разрешило эту задачу. На это обратил внимание в 1842 году ассистент Пражской Обсерватории К. Крейль, указав, что наблюдавшаяся 18 июля 1841 года в Праге буря часов 13 назад наблюдалась на юге Италии и что об ее приближении можно было предупредить по телеграфу.

18 июля 1849 г. в английской газете были помещены, полученные по телеграфу данные с 30 английских станций о силе и направлении ветра и состоянии погоды, а в 1851 г. во время происходившей в Лондоне выставке (8 августа – 11 октября) в помещении ее ежедневно вывешивалась большая карта с данными о погоде 22 английских станций. Эта попытка окончательно показала, что на пути к осуществлению идеи Брандеса препятствий больше нет. Но для проведения ее в жизнь нужно было, по-видимому, внешнее воздействие, каковым и послужила знаменитая Балаклавская буря 14 ноября 1853 года. Эта буря сильно повредила англо-французский флот, находившийся в Черном море, и уничтожила сухопутный лагерь в Балаклаве. Французское правительство поручило известному астроному Леверрье исследовать, нельзя ли было бурю предвидеть заблаговременно. Леверрье, собрав весь доступный материал, поручил его обработку астроному Лиэ², который и нашел, что буря не ограничилась только Черным морем, но прошла, хотя и с меньшей силой, через всю Европу, с запада до Черного моря и далее на восток и что, при наличии соответствующей организации, флот можно было бы предупредить. Представленный Леверрье план организации

² Эммануил Лиэ (род. в 1823 г.) — французский астроном. В 1852 г. поступил с помощью Араго в парижскую обсерваторию. Автор работ по астрономии и метеорологии. Командированный с научной целью в Бразилию, остался там и стал директором обсерватории в Рио-де-Жанейро (прим. ред.).

был утвержден и Леверье направил все свои усилия на устройство телеграфной связи со станциями не только Франции, но и всей Европы. 19-го февраля 1855 г. была составлена первая «карта погоды» для Франции, а с 11-го сентября 1863 г. Парижская Обсерватория стала издавать регулярно карты погоды для всей Европы. Примеру Франции последовали и другие страны. Не останавливаясь подробно на дальнейшем развитии службы погоды, ограничимся приведением наиболее важных дат:

1 июля 1865 г. стали издаваться карты погоды в Вене.

1 января 1872 г. вышел с наблюдениями 28 станций ежедневный метеорологический бюллетень с обзором погоды, издаваемый Главной Физической Обсерваторией. 13 мая 1889 г. он стал выходить с двумя синоптическими картами Европы, обзором и предсказанием погоды. С 1 января 1912 г. этот бюллетень стал охватывать всю Европу и Азиатскую Россию и представлял до войны самую обширную ежедневную карту погоды в мире. 6 августа 1904 г. английской газетой «Daily Telegraph» была получена с Атлантического океана по беспроволочному телеграфу первая метеорологическая депеша, а в настоящее время почти вся служба погоды ведется по радио.

Об авторе



Тихомиров Евгений Иванович (1888-1947) — геофизик широкого профиля, метеоролог, синоптик.

В 1913 г. будучи студентом начал работу в отделении ежедневного бюллетеня ГФО, к 1923 г. он уже старший физик и заведующий отделом ежедневного бюллетеня (Бюро погоды).

В 1923 г. Е. И Тихомиров назначается заместителем директора по научной части Главной физической (впоследствии геофизической) обсерватории.

В этой должности он работает до конца 1929 г., исполняя также в 1925—1926 гг. обязанности директора.

В конце 1929 г. Е. И. Тихомирову поручается организация Центрального бюро погоды в Москве. В связи с этим он оставляет работу в Главной геофизической обсерватории и переезжает в Москву, откуда вскоре возвращается в Ленинград.

С 1920 г. Е. И. Тихомиров начал заниматься педагогической деятельностью, читая курсы математики и метеорологии в высших учебных заведениях Ленинграда: в Электротехническом, Политехническом институтах и в Морской академии — математику, в Институте путей сообщения — метеорологию. В последнем по конкурсу он был избран профессором и заведующим кафедрой метеорологии на факультете воздушных сообщений, а в Электротехническом институте до 1941 г. состоял штатным доцентом по кафедре математики.

В 1936 г. Е. И. Тихомиров начал работать в Арктическом институте начальником геофизического отдела, реорганизованного в 1945 г. в отделение метеорологии, научным руководителем которого он состоял до конца жизни.

В Арктическом институте Е. И. Тихомиров с успехом продолжил свою научно-организационную деятельность в области метеорологии и геофизики. Под его руководством был выполнен ряд работ по климату Советской Арктики; им возглавлялся весь комплекс работ по научно-методическому руководству полярными станциями; им организованы новые для Арктического института отделы долгосрочных и краткосрочных прогнозов погоды.

Исключительную активность проявил Е. И. Тихомиров в годы Великой Отечественной войны, направляя работу Метеорологического отделения на выполнение задач, связанных с научно-оперативным обслуживанием морских и воздушных операций на Северном морском пути, а также боевой деятельности Северного военно-морского флота и военно-воздушных сил на арктическом театре военных действий.

Е. И. Тихомиров — автор многочисленных работ, опубликованных в журналах Метеорологический вестник, Журнал геофизики

и метеорологии, Метеорология и гидрология, Климат и погода, Геофизический сборник, Труды Главной геофизической обсерватории, Проблемы Арктики.

Значительная часть работ Е. И. Тихомирова относится к истории метеорологии. Работая в архивах Главной геофизической обсерватории и Академии Наук СССР, он обнаружил ряд неизвестных материалов по Великой северной экспедиции и, в частности, первую (в России) инструкцию по производству метеорологических наблюдений, составленную членом Петербургской Академии Наук Д. Бернулли.

За работы в области метеорологии Е. И. Тихомирову в 1925 г. была присуждена малая серебряная медаль Русского географического общества.

Е. И. Тихомиров награжден орденом Трудового Красного Знамени, орденом Знак Почета и тремя медалями: За оборону Ленинграда, За оборону Советского Заполярья, За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 гг.

Материал подготовлен
Махоткиной Е.Л.

Поступил в редакцию
15.01.2022

СТЕПАНЕНКО ВЛАДИМИР ДАНИЛОВИЧ

(1922–2010)

К 100-летию со дня рождения

5 октября 2022 г. исполнилось 100 лет со дня рождения крупного ученого в области радиолокационной метеорологии, экологии, физики атмосферы и активных воздействий, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники России Владимира Даниловича Степаненко.



Выходец из семьи сельских интеллигентов (его мать, тетка и отчим были педагогами), он родился в селе Руновщино Полтавской области. Затем семья переехала в Новороссийск. В 1939 г., окончив с отличием среднюю школу, В. Д. Степаненко поступил в Московский гидрометеорологический институт (МГМИ) на отделение океанологии.

В июне 1941 г. по комсомольскому набору он был зачислен в саперно-строительный батальон, который проводил противотанковые фортификационные работы под г. Ельня.

В конце августа 1941 г. МГМИ преобразовали в Высший военный гидрометеорологический институт Красной Армии (ВВГМИ КА), и В. Д. Степаненко стал слушателем 3-го курса этого института.



1941 г.



1945 г.

Весной 1944 г. В. Д. Степаненко проходил фронтową стажировку в оперативных подразделениях гидрометслужбы Черноморского флота и Азовской флотилии, участвовал в боевых действиях по освобождению Крымского полуострова. В этом же году он с отличием окончил институт и получил должность старшего инженера в оперативном подразделении морского отдела Центрального института прогнозов ГУГМС КА, которое занималось гидрометеообеспечением командования ВМФ.

В 1945 г. В. Д. Степаненко перевели в Ленинград на Военный факультет Ленинградского гидрометеорологического института (ЛГМИ) для обучения в адъюнктуре, после окончания которой

в 1950 г. он защитил кандидатскую диссертацию, посвященную проблемам обледенения самолетов.

С 1951 по 1957 г. Владимир Данилович — преподаватель Военного гидрометеорологического факультета Советской Армии, а с октября 1957 г. — Ленинградской военно-воздушной инженерной академии имени А. Ф. Можайского. Он ввел в учебный процесс разработанный им курс гидрометеорологии в качестве самостоятельной дисциплины. С 1965 г. В. Д. Степаненко — доктор технических наук, с 1967 — профессор.

В 1974 г. В. Д. Степаненко стал сотрудником Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, успешно сочетая выполнение обязанностей заместителя директора по науке и заведующего отделом ГГО.

Многогранную трудовую и научную деятельность В. Д. Степаненко отражает его послужной список:

август 1939 г. – август 1941 г.	студент Московского гидрометеорологического института
август 1941 г. – июль 1944 г.	слушатель Высшего военного гидрометеорологического института Красной Армии
март–апрель 1944 г.	инженер-гидрометеоролог по оперативному обеспечению боевых действий Черноморского флота и Азовской военной флотилии ВМФ
июль 1944 г. – октябрь 1945 г.	старший инженер-гидрометеоролог морского отдела Центрального института прогнозов ГУГМС
октябрь 1945 г. – февраль 1948 г.	младший преподаватель, старший офицер учебного отдела Военного факультета при Ленинградском гидрометеорологическом институте
февраль 1948 г. – январь 1951 г.	адъюнкт Военно-инженерного факультета метеослужбы ВВС
октябрь 1950 г.	защитил кандидатскую диссертацию «Исследование особенностей обледенения самолетов в различных метеорологических условиях»

январь 1951 г. – октябрь 1957 г.	преподаватель, старший преподаватель Военного гидрометеорологического факультета Советской Армии
октябрь 1957 г. – апрель 1974 г.	старший преподаватель, зам. начальника кафедры в Военно-воздушной инженерной академии им. А. Ф. Можайского
май 1965 г.	защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук
апрель–май 1974 г.	заведующий лабораторией дистанционной индикации параметров окружающей среды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова
май 1974 г. – июль 1986 г.	заместитель директора ГГО по научной работе
1975–1995 гг.	сопредседатель Рабочей группы по исследованию и предотвращению загрязнения атмосферного воздуха в рамках советско- американского сотрудничества в области охраны окружающей среды, руководитель Методического центра по радиолокационной метеорологии стран СЭВ
1986 г.	за разработку и внедрение радиометеорологических методов и технических средств гидрометобеспечения различных отраслей народного хозяйства удостоен звания лауреата Государственной премии СССР в области науки и техники
июль 1986 г.– февраль 1995 г.	заведующий отделом радиационных исследований и физики облаков ГГО
февраль 1995 г. – 2010 г.	главный научный сотрудник ГГО
1982–2005 гг.	председатель добровольного Общества охраны природы Ленинграда (Санкт-Петербурга) и Ленинградской области (на общественных началах)



В. Д. Степаненко внес весомый вклад в развитие различных областей геофизики. Исследования, выполненные под его руководством, как правило, отличались оригинальностью решений и четкой практической направленностью. Он — участник крупных экспериментов по изучению особенностей обледенения самолетов в различных метеоусловиях. Полученные результаты позволили усовершенствовать противообледенительные системы и улучшить оценку эффективности их работы, а также нашли применение при диагнозе и прогнозе обледенения как опасного для авиации явления.

В. Д. Степаненко принимал участие в разработке отечественных метеорологических радиолокаторов и их внедрении на сети в нашей стране и за рубежом. За эту работу вместе с коллегами в 1986 г. удостоен Государственной премии СССР в области науки и техники.

Им также был выполнен цикл работ по изучению особенностей распространения радиоволн миллиметрового и сантиметрового диапазона в облаках, туманах и осадках. Проведена серия исследований по использованию СВЧ-радиометров и радиолокаторов для получения данных об атмосферных осадках и других метеовеличинах. Результаты разработки были внедрены в практику, за что В. Д. Степаненко был награжден бронзовой медалью ВДНХ.

С 1986 по 2002 г. в Санкт-Петербурге под руководством Владимира Даниловича проводились работы по защите города от осадков в периоды проведения важнейших мероприятий государственного и городского масштабов.



В. Д. Степаненко на заседаниях Ученого совета ГГО

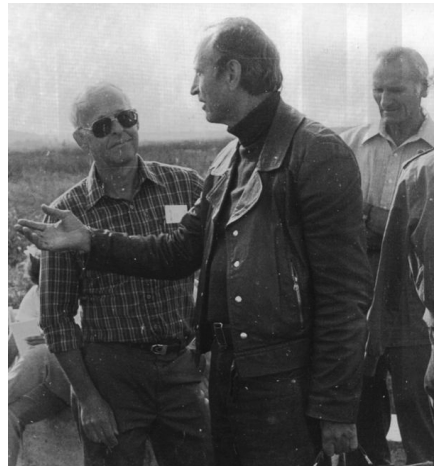


В. Д. Степаненко и В. П. Мелешко на юбилейном заседании Ученого совета ГГО. 1999 г.

Совместно с коллегами В. Д. Степаненко занимался теоретическими и экспериментальными исследованиями грозовых облаков дистанционными средствами. В ГГО были начаты работы по лидарному зондированию атмосферы для измерения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля и облаков. Были выполнены численные эксперименты по оценке влияния аэрозольных частиц на динамику электрической структуры конвективных облаков, лабораторно изучалось воздействие электрических сил на микроструктуру облака.



С коллегами у самолета-лаборатории:
слева направо: Воробьев Б.М., Синькевич А.А., Степаненко В.Д.,
Толкачев В.К.



Во время экспериментов

В. Д. Степаненко являлся соруководителем советско-американского эксперимента САМЭКС, возглавлял Методический центр стран СЭВ по радиолокационной метеорологии, участвовал в XVIII (Белград) и XIX (Нью-Йорк) конгрессах по аэронавтике и авионавтике с докладами, посвященными использованию микрорадиоволн для получения геофизической информации с ИСЗ. Он также принимал активное участие в организации метеообеспечения запуска космического аппарата «Буран».

Последние годы жизни этот крупный ученый руководил исследованиями в области радиометеорологии, физики облаков и активных воздействий, возглавляя научную школу «Радиолокационные исследования грозовых облаков и возникающих в них ионизированных образований, а также облаков экстремальных ситуаций, таких как ядерные и обычные взрывы, аварии на АЭС, пожары». Эта работа неоднократно получала гранты РФФИ и Мэрии Санкт-Петербурга, что дало возможность разработки технологии защиты территории и населения от радиоактивных заражений.



В.Д. Степаненко на юбилее заведующего библиотекой ГГО А.С. Коровченко.
Стоят слева направо: Е.П. Борисенков, В.Д. Степаненко, А.С. Коровченко,
В.В. Мухенберг, Э.В. Михайлова

В. Д. Степаненко успешно сочетал научные исследования с педагогической деятельностью. Он более 45 лет преподавал в ВКА им. А. Ф. Можайского, ЛГМИ (в настоящее время РГГМУ) и Одесском гидрометеорологическом институте. Под его руководством подготовлено 20 кандидатов наук. Многие из них стали докторами наук, они успешно трудятся в нашей стране и за ее пределами.

Владимир Данилович — автор более 270 научных работ, в том числе 11 монографий, у него 14 авторских свидетельств на изобретения, награжден знаком «Изобретатель СССР». Признанием научных заслуг В. Д. Степаненко является избрание его членом Нью-Йоркской академии наук и академиком Петровской академии наук и искусств. Он награжден многими государственными наградами: орденом Отечественной войны, двумя орденами Красной Звезды, орденом Дружбы народов, 23 медалями, одна из них — «За боевые заслуги».



Губернатор Санкт-Петербурга В. А. Яковлев вручает В. Д. Степаненко орден Дружбы народов. ГГО. 2000 г.

За свою долгую плодотворную жизнь Владимир Данилович никогда не отказывался и от общественной деятельности. Он многие годы возглавлял Санкт-Петербургское отделение «Всероссийского

общества охраны природы», участвовал в работе многих научных и общественных комиссий, комитетов, советов.



Заседание Ученого совета ГГО, посвященное 85-летию В. Д. Степаненко.
2007 г.

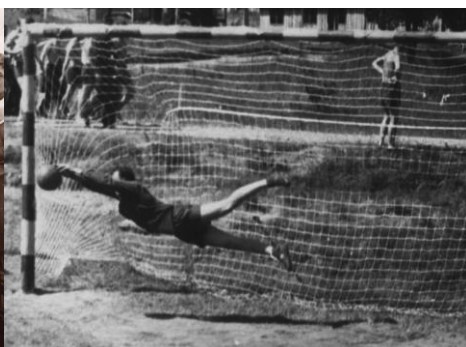
С молодых лет Степаненко любил спорт и серьезно им занимался.

Он профессионально играл в футбол, был вратарем подростковой команды ДСО «Спартак», которая в 1939 г. заняла 1-е место на Новороссийском первенстве по футболу, занимался волейболом, баскетболом.

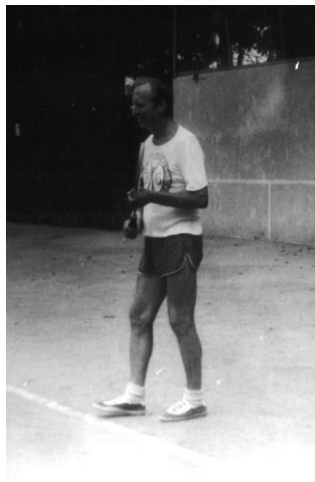


Подростковая команда ДСО «Спартак».
1939 г.

В. Д. Степаненко четвертый слева



В. Д. Степаненко — вратарь



На корте

Играть в теннис Владимир Данилович начал, когда ему было за 50, но это не помешало ему достичь успехов в этом виде спорта: он был неоднократным призером теннисных турниров, посвященных Дню Победы в Одессе и на турнирах ветеранов-фронтовиков в Санкт-Петербурге.



В.Д. Степаненко среди участников турнира ветеранов. Одесса

У Владимира Даниловича была крепкая семья. Они с женой, его верной подругой и помощницей, вырастили двоих детей, троих внуков и дождались четверых правнуков.

Владимир Данилович был на редкость добрым, чутким и доброжелательным человеком. До последних дней жизни он продолжал работать в ГГО и не представлял себя вне научного поиска и коллектива коллег и учеников. Несмотря на солидный возраст, никогда не оставался равнодушным к самым разным проблемам научной и общественной жизни.

Память о В. Д. Степаненко — большом ученом и прекрасном человеке — остается в сердцах его друзей, коллег и учеников.

От коллег, учеников и друзей:
*Баранова Н. И., Веремей Н. Е.,
Волков Н. Н., Довгалюк Ю. А.,
Куров А. Б., Махоткина Е. Л.,
Михайловский Ю. П., Синькевич А. А.,
Торопова М. Л.*

Поступила в редакцию 20.09.2022

Климатическая наука для принятия решений. Катцов В. М. Труды ГГО. 2022. Вып. 607. С. 6–39.

Данные наблюдений, моделирования и прогнозирования состояния и изменений земной системы, а также воздействующих на нее факторов служат ключевой информационной основой для выработки, практической реализации и последующей оценки результативности национальной климатической политики — как внутренней, так и внешней — в отношении целей и путей, пределов и механизмов адаптации к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климат. Решению этих задач в значительной мере призвана содействовать Федеральная научно-техническая программа в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 гг. (ФНТП). Этой программе синергичен Важнейший инновационный проект государственного значения, направленный на создание единой национальной системы мониторинга (ВИПГЗ). Миссия ВИПГЗ-ФНТП — разработка и совершенствование инфраструктуры и технологий мониторинга и моделирования для получения международно признаваемых отечественных данных в области экологии и климата, включая созданные на их основе продукты. С 2022 г. ВИПГЗ-ФНТП реализуется силами шести консорциумов, объединяющих примерно полсотни научно-исследовательских и образовательных организаций по направлениям: (1) Земная система: моделирование и прогноз (1); (2) Океан: мониторинг и адаптация (2); (3) Суша: мониторинг и адаптация (3); (4) Углерод в экосистемах: мониторинг (4); (5) Экономика климата (5); (6) Антропогенные выбросы: кадастр (6).

Ключевые слова: национальная климатическая политика, изменение климата, наблюдения, моделирование, прогнозирование, единая национальная система мониторинга, климатически активные вещества.

Ил. 5. Библ. 16.

УДК 551.501:551.583

Мониторинг современной климатической системы Земли: данные и тренды. Киселёв А. А. Труды ГГО. 2022. Вып. 607. С. 40–78.

Представлен обзор данных наблюдений за климатической системой Земли, а также средств мониторинга, обеспечивающих весь комплекс этих наблюдений. Указаны и кратко описаны построенные на базе данных измерений и их обработки наиболее часто используемые реанализы. Отмечены основные тенденции в изменениях современного глобального климата, охарактеризованы причинно-следственные связи, ответственные за эти изменения.

Ключевые слова: наблюдения за климатом, реанализы, парниковые газы, температура, осадки, уровень Мирового океана, морской лёд, экстремальность климата.

Табл. 1. Ил. 13. Библ. 56.

УДК 551.521.31

Климатические изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности и облачности по данным актинометрических наблюдений на территории России. Хлебникова Е. И., Задворных В. А., Стадник В. В. Труды ГГО. 2022. Вып. 607. С. 79–93.

Представлены результаты анализа климатических изменений основных составляющих радиационного баланса земной поверхности (прямой солнечной, рассеянной и суммарной радиации), а также характеристик облачного покрова, по данным наземных актинометрических наблюдений на территории России за 1961–2020 гг.

Ключевые слова: изменения климата, солнечная радиация, радиационный баланс, актинометрия, облачность.

Ил .5. Библ. 20.

УДК 551.521

Предварительные результаты прямых измерений длинноволновой радиации на станциях Росгидромета. Махоткин А. Н., Махоткина Е. Л. Труды ГГО. 2022. Вып. 607. С. 94–109.

Представлены результаты анализа данных о длинноволновых составляющих радиационного баланса (приходящей E_d и уходящей E_u длинноволновой радиации) по данным наземных актинометрических наблюдений на станциях Каргополь, Подмосковная, Самара, Верхоянск, Огурцово, Якутск, Садгород за 2014–2020 гг. Определены возможные колебания длинноволновых составляющих радиационного баланса в годовом и суточном ходе. Полученные результаты носят предварительный характер, поскольку основаны на коротких рядах наблюдений. По мере накопления информации оценки будут уточняться.

Ключевые слова: радиационный баланс, длинноволновая радиация, годовой и суточный ход, критерии контроля.

Табл. 6. Ил. 5. Библ. 14.

УДК 551.594.21

Стационарная модель токовой цепи с учетом аэрозольной составляющей атмосферы и облаков. Морозов В. Н. Труды ГГО. 2022. Вып. 607. С. 110–135.

Рассматривается обобщение стационарной модели токовой цепи на случай учета аэрозольной составляющей атмосферы. Получены математические решения для двух моделей: модель токовой цепи без источников тока и модель цепи с источниками тока. Аэрозольные частицы располагаются в приземном слое в модели сферической Земли. Анализ полученных решений показывает существенное влияние аэрозольной составляющей на электрические характеристики атмосферы: увеличивается потенциал и напряженность электрического поля в земной атмосфере, а также глобальная характеристика — потенциал ионосферы.

Ключевые слова: токовая цепь в атмосфере, аэрозольные частицы, электрическое поле атмосферы

Табл. 3. Библ. 14.

УДК 551.577.1:551.515.4:004.94

Некоторые результаты численного моделирования образования ливневых осадков из конвективного облака. Шаповалов В. А., Залиханов М. Ч., Шериева М. А. Труды ГГО. 2022. Вып. 607. С. 136–146.

В статье описаны численные эксперименты с использованием трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака с детальным учетом термогидродинамических, микрофизических и электрических процессов. Рассматривается развитие конвективного облака, формирующего ливневые осадки. Получены данные о пространственном распределении микрофизических и динамических характеристик облака на различных этапах его развития. Приводятся данные о количестве осадков.

Ключевые слова: численное моделирование, ливневые осадки, конвективные облака, количество осадков, эволюция конвективного облака.

Рис. 7. Библ. 15.

УДК 551.576.11

Роль теплового импульса в эволюции конвективных облаков. Созаева Л. Т., Залиханов М. Ч., Шериева М. А. Труды ГГО. 2022. Вып. 607. С. 147–154.

Рассмотрена эволюция градовых процессов по трехмерной нестационарной модели конвективного облака для трех вариантов начального перегрева у поверхности земли (1, 2 и 3 °С). Получены характеристики (водность, ледность, суммарная водность и ледность) на 20, 30 и 40-ой минутах развития облака. Показано, что увеличение перегрева до 3 °С приводит к увеличению интенсивности развития облака на начальной и средней стадиях развития облака. На стадии максимального развития (40-я минута развития) параметры облака во всех трех вариантах становятся соизмеримыми.

Ключевые слова: математическое моделирование, конвективное облако, водность, ледность, инициализация модели, перегрев у поверхности земли.

Ил. 1. Библ. 11.

Climate science for taking decisions. Kattsov V. M. Proceedings of the GGO. 2022. V. 607. P. 6–39.

Observational, modelling and projecting data on states and changes of the Earth system, as well as on impacting factors serve as a key informational basis for development, practical implementation and subsequent efficiency assessment of the national climate policy — both internal and external — with regard to goals and ways, limitations and mechanisms of climate change adaptation and mitigation. The Federal Science and Technology Programme in the field of environmental improvement and climate change for 2021–2030 (FSTP) is to address those problems. The Innovation Project of State Importance (IPSI) aimed at developing a unified national system for monitoring climatically active substances is synergetic to FSTP. The mission of IPSI-FSTP is development and enhancement of the infrastructure and technologies of monitoring and modelling for obtaining internationally acknowledged data in the field of ecology and climate, including data based products. Since 2022 IPSI-FSTP is being implemented by six consortia joining efforts of about fifty research and educational institutions: (1) Earth System: Modelling and Prediction; (2) Ocean: Monitoring and Adaptation; (3) Land: Monitoring and Adaptation; (4) Carbon in Ecosystems: Monitoring; (5) Climate Economy; (6) Anthropogenic Emissions: Cadastre.

Keywords: national climate policy, climate change, observational, modelling, projecting, unified national system for monitoring, climatically active substances.

Fig. 5. Ref. 16

Monitoring the Earth's modern climate system: data and trends.

Kiselev A. A. Proceedings of MGO. 2022. V. 607. P. 40–78.

An overview of observational data on the Earth's climate system, as well as monitoring tools that provide the entire complex of these observations, is presented. The most commonly used reanalyses, built on the basis of measurement data and their processing, are indicated and briefly described. The main trends in changes in the modern global climate are noted, and the cause-and-effect relationships responsible for these changes are characterized.

Keywords: climate observations, reanalyses, greenhouse gases, temperature, precipitation, sea level, sea ice, climate extremes.

Tab. 1. Fig. 13. Ref. 56.

Climatic changes in the main components of the radiation balance of the Earth's surface and clouds on the data of actinometric observations in Russia.

Khlebnikova E. I., Zadvornyykh V. A., Stadnik V. V. Proceedings of the GGO. 2022. V. 607. P. 79–94.

The results of an analysis of climate changes in the main components of the radiation balance of the earth's surface (direct solar, diffuse and total radiation), as well as the characteristics of cloud cover, are presented, according to ground-based actinometric observations in Russia for 1961–2020.

Keywords: climate change, solar radiation, radiation balance, actinometry, clouds.

Fig.5. Ref. 20.

Preliminary results of direct measurements of long-wave radiation at Roshydromet stations. Makhotkin A. N., Makhotkina E. L. Proceedings of the GGO. 2022. V. 607. P. 94–109.

The results of data analysis of long-wave components of the radiation balance (downward E_d and upward E_u long-wave radiation) based on ground-based actinometric observations at the stations Kargopol, Podmoskovnaya, Samara, Verkhoyansk, Ogurtsovo, Yakutsk, Sadgorod for 2014–2020 are presented. Possible fluctuations in the long-wave components of the radiation balance in the annual and daily variations are determined. The results are preliminary because they are based on short series of observations. As information accumulates, estimates will be refined.

Keywords: radiation balance, long-wave radiation, annual and daily variations, control criteria.

Tab. 3. Fig.5. Ref. 14.

Stationary current circuit model taking into account the aerosol component of the atmosphere and clouds. Morozov V. N. Proceedings of MGO. 2022. V. 607. P. 110–135.

A generalization of the stationary current circuit model to the case of taking into account the aerosol component of the atmosphere is considered. Mathematical solutions were obtained for two models: a current circuit model without current sources and a circuit model with current sources. Aerosol particles are located in the surface layer in the spherical Earth model. Analysis of the obtained solutions shows a significant influence of the aerosol component on the electrical characteristics of the atmosphere. The potential and field intensity of the electric field in the earth's atmosphere increases, as well as the global characteristic-potential of the ionosphere.

Keywords: current circuit in the atmosphere, aerosol particles, atmospheric electric field.

Tab. 3. Ref. 14.

Some results of numerical simulation of heavy rainfall formation from a convective cloud. Shapovalov V. A., Zalikhanov M. Ch., Sherieva M. A. Proceedings of MGO. 2022. V. 607. P. 136–146.

The paper describes numerical experiments using a three-dimensional unsteady numerical model of a convective cloud with a detailed account of thermohydrodynamic, microphysical and electrical processes. The development of the convective cloud forming heavy precipitation is considered. Data on the spatial distribution of microphysical and dynamic characteristics of the cloud at different stages of its development are obtained. Data on the amount of precipitation are given.

Keywords: numerical modeling, heavy rainfall, convective clouds, amount of precipitation, convective cloud evolution.

Fig.7. Ref. 15.

The role of the thermal impulse in the evolution of convective clouds. Sozaeva L. T., Zalikhanov M. Ch., Sherieva M. A. Proceedings of MGO. 2022. V. 607. P. 147–1154.

The evolution of hail processes is considered according to a three-dimensional unsteady convective cloud model for three variants of initial overheating at the earth's surface (1, 2 and 3 °C). Characteristics (liquid water content, ice water content, total water content) were obtained at the 20th, 30th and 40th minutes of cloud development. It is shown that an increase in overheating to 3 °C leads to an increase in the intensity of cloud development at the initial and middle stages of cloud development. At the stage of maximum development (40th minute), the cloud parameters in all three variants become commensurate.

Keywords: mathematical modeling, convective cloud, liquid water content, ice water content, initialization of the model, overheating at the earth's surface.

Fig. 1. Ref. 11.

**Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 607**

Подписано в печать 22.12.22. Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать
офсетная. Печ. л. 11,75. Тираж 300 экз. Заказ №2055.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ».

194044, Санкт-Петербург, Пироговская наб., д. 17 к. 6, литера А, помещ. 8.