

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А.И. Воейкова

Выпуск

575

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

Санкт-Петербург
2014

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

Редакционная коллегия

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

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

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

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

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

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

Editorial board

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

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

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

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

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»,
2014

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Т. В. Павлова, В. М. Катцов, В. П. Мелешко, И. М. Школьник, В. А. Говоркова, Е. Д. Надежина.</i> Новое поколение климатических моделей.....	5
<i>И. М. Школьник, В. П. Мелешко, И. Л. Кароль, А. А. Киселев, Е. Д. Надежина, В. А. Говоркова, Т. В. Павлова.</i> Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке.....	65
<i>Г. Б. Пигольцина, Н. А. Зиновьева.</i> Закономерности изменения скорости ветра с высотой на подветренном склоне горного хребта (на примере северного склона хребта Аибга).....	119
<i>И. И. Кононов, А. В. Снегуров, В. С. Снегуров, И. Е. Юсупов.</i> Точностные характеристики разностно-дальномерной системы местоопределения гроз.....	131
<i>Л. И. Дивинский, Л. А. Майборода.</i> Анализ погрешностей определения координат мелкомасштабных атмосферных электрических разрядов.....	142
<i>Э. Ю. Безуглая, Т. П. Ивлева, И. В. Смирнова.</i> К вопросу об индикаторах качества воздуха.....	170
<i>М. А. Салль.</i> Погодно-климатические риски как объект управления.....	183
<i>С. Г. Долгих, В. М. Шаймарданов.</i> Развитие технология управления данными в автоматизированной архивной системе.....	204

CONTENTS

<i>T. V. Pavlova, V. M. Kattsov, V. P. Meleshko, I. M. Shkolnik, V. A. Govorkova, E. D. Nadyozhina.</i> New generation of climate models.....	5
<i>I. M. Shkolnik, V. P. Meleshko. I. L. Karol. A. A. Kiselev, E. D. Nadyozhina. V. A. Govorkova. T. V. Pavlova.</i> Expected climate change on the territory of the Russian Federation in the XXI century.....	65
<i>G. B. Pigoltsina, N. A. Zinovyeva.</i> Regularities of wind speed variation with altitude at the downwind slope of mountain range (the case of northern slope of Aibga range).....	119
<i>I. I. Kononov, A. V. Snegurov, V. S. Snegurov, I. E. Yusupov.</i> Monitoring of the atmospheric transparency: results of the measurements during last decades	131
<i>L. I. Divinsky, L. A. Majboroda.</i> Error analysis of determining of small-scale atmospheric electrical discharges coordinates.....	142
<i>E. Yu. Bezuglaya, T. P. Ivleva, I. V. Smirnova.</i> Indicators of ambient air quality.....	170
<i>M. A. Sall.</i> Risk management of weather and climate phenomena.....	183
<i>S. G. Dolgih, V. M. Shaymardanov.</i> The development of technology of data management in an automated archival system.....	204

УДК 551.583

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

*Т. В. Павлова, В. М. Катцов, В. П. Мелешко, И. М. Школьник,
В. А. Говоркова, Е. Д. Надежина,*

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

Поступила в редакцию 8.09.2014
Поступила после доработки 22.10.2014

Введение

Можно выделить два уровня оценки пригодности моделей для расчетов будущих изменений климата: компонентный и системный. На компонентном уровне рассматриваются отдельные составляющие климатической системы и климатически значимые процессы, представленные в моделях, а также используемые численные аппроксимации (включая разрешение) и параметризации. На системном уровне оценивается способность моделей воспроизводить современное состояние климатической системы, а также различные ее состояния в прошлом, в соответствии с имеющимися данными наблюдений. К проблемам оценки моделей на системном уровне относятся непредсказуемая собственная изменчивость, а также неопределенности во внешних воздействиях на климатическую систему и в данных наблюдений за климатом, используемых для верификации расчетов. Очевидной мерой качества модельного воспроизведения той или иной климатической характеристики является разброс соответствующих наблюдательных оценок и/или реанализов. В ряде случаев, в особенности в высоких широтах, этот разброс бывает весьма значительным.

Качество воспроизведения климатическими моделями наблюдаемых состояний глобальной климатической системы — как для различных характеристик ее компонентов, так и в различных регионах — остается ключевым условием доверия к оценкам будущих изменений климата, получаемым с использованием этих моделей. Развитие климатических моделей, состоящее как в улучшении их пространственного разрешения, так и во включении новых процессов и компонентов, позволяющих все более полно описывать обратные связи, действующие в климатической системе, «усложнение» моделей, далеко не всегда приводят к улучшению соответствия между данными наблюдений и результатами моделирования.

В то же время, анализ модельных данных, призванный оценить качество моделей климата на основе сопоставления результатов моделирования с доступными данными наблюдений, требует понимания фундаментальных свойств климатической системы, таких, например, как ее предсказуемость. Оценка качества климатических моделей предшествует оценке неопределенностей климатических прогнозов. В последнее время оценка качества климатических моделей привлекла большое количество исследователей в связи с потребностью в дискриминации климатических моделей в составе мультимодельных ансамблей, используемых в оценках будущих изменений климата. Перечисленным проблемам моделирования климатической системы посвящена обширная научная литература. На русском языке их краткое изложение можно найти в Первом оценочном докладе Росгидромета (Катцов и др., 2008).

В рамках подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013) был организован очередной проект по анализу расчетов климата с помощью глобальных климатических моделей. Основу этого проекта, получившего название CMIP5 и являющегося пятой фазой проекта CMIP (Taylor et al., 2012), составили расчеты климата XX века при заданных в соответствии с наблюдениями концентрациях парниковых газов и аэрозолей, а также сценарные расчеты климата XXI века для новой группы сценариев антропогенных выбросов — так называемых RCP, в соответствии с номенклатурой МГЭИК.. Всего в проекте по состоянию на конец 2013 г. приняло участие более

пяти десятков моделей, разработанных в разных исследовательских центрах мира.

Целью настоящего исследования является оценка качества глобальных климатических моделей СМIP5. При этом не ставится задача полномасштабной и всесторонней оценки качества моделей СМIP5, подобно тому, как это делается в главе 9 Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013). Основное внимание в настоящей работе уделено расчетам климата на территории Российской Федерации. Сравнительный анализ моделей СМIP5 проводится не только с имеющимися данными наблюдений и реанализов, но и с данными предшествующей фазы проекта СМIP — СМIP3, создавшего основу для Четвертого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2007) и Первого оценочного доклада Росгидромета (ОД_РФ-1, 2008).

1. Климатические модели СМIP5

С целью научного обеспечения подготовки Пятого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению Климата (МГЭИК) (IPCC, 2013) Всемирная программа исследований климата (ВПИК) инициировала 5-ю фазу Международного проекта сравнения объединенных моделей СМIP5 (Taylor et al., 2012). В результате реализации экспериментальной части СМIP5 моделями был суммарно сгенерирован беспрецедентный совокупный объем данных — порядка петабайта (против десятков терабайт предыдущего этапа этого проекта — СМIP3 (Meehl et al., 2007)). Это увеличение явилось следствием расширения списка экспериментов, а также роста количества участвующих в проекте моделей, улучшения их пространственного разрешения и временной дискретизации архивируемых данных (суточного и более высокого разрешения). Модельные данные архивируются в Ливерморской лаборатории США и предоставляются для исследований участникам диагностической части СМIP5. Диагностическая часть СМIP5 состоит из большого числа проектов, направленных на анализ модельных данных в

широком тематическом диапазоне, в том числе — в исследованиях региональных аспектов эволюции климатической системы.

По сравнению с СМIP3 (IPCC, 2007), в СМIP5 произошло определенное улучшение качества моделей как класса во многих, хотя и не во всех, аспектах. Это улучшение, очевидно, обусловлено не только увеличением разрешения многих из них, а также совершенствованием используемых вычислительных методов и параметризаций, но и включением рядом моделей описаний дополнительных климатически значимых процессов (IPCC, 2013). В частности, по оценке МГЭИК, которой присвоен *очень высокий уровень достоверности*, модели на континентальных масштабах воспроизводят наблюдаемые в течение многих десятилетий тренды и структуру изменений приземной температуры, в том числе более быстрое потепление, отмечаемое с середины XX века, и похолодания, немедленно следующие за крупными извержениями вулканов. Долгосрочные расчеты по климатическим моделям показывают тренд средней глобальной приземной температуры в 1951—2012 гг., совпадающий с данными наблюдений (*очень высокий уровень достоверности*). Однако на коротких интервалах (10—15 лет) отмечаются различия между модельными и наблюдаемыми трендами (например, с 1998 г. по 2012 г.)¹. Уверенность в способности моделей воспроизводить приземную температуру на региональном уровне ниже, чем в более крупном масштабе. Однако с *высокой достоверностью* констатируется более высокое качество моделирования региональной приземной температуры моделями СМIP5, нежели СМIP3. Отмечается значительный прогресс в моделировании экстремальных погодных и климатических явлений. Модельные средние глобальные тренды частоты экстремально жарких и экстремально холодных дней и ночей во второй половине XX века, как правило, совпадают с данными наблюдений.

¹ Возможным причинам этого расхождения между модельными расчетами и наблюдающимся замедлением глобального потепления в Пятом оценочном докладе МГЭИК уделяется большое внимание.

Хотя качество моделирования осадков в масштабах континентов повысилось, на региональном уровне оно хуже, что усугубляется неопределенностями в данных наблюдений. Модели стали лучше воспроизводить некоторые важные климатические явления. С *высокой достоверностью* повысилось качество статистики по муссонам и явлению Эль Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК). Хотя климатические модели стали включать больше процессов, связанных с облаками и аэрозолями, а также с их взаимодействием, результаты воспроизведения этих процессов в моделях оставляют желать лучшего. Определенный прогресс достигнут в воспроизведении наблюдаемого тренда площади морского льда в Северном полушарии, однако в Южном полушарии (при значительном межмодельном разбросе) знаки средне-модельного и наблюдаемого (небольшого восходящего) трендов не совпадают. Многие модели воспроизводят наблюдаемое изменение теплосодержания верхних слоев океана (0—700 м) с 1961 г. по 2005 г. (*высокий уровень достоверности*). Климатические модели, включающие углеродный цикл (модели Земной системы), воспроизводят глобальную структуру потоков CO₂ между океаном и атмосферой с выделением CO₂ в тропиках и поглощением в средних и высоких широтах. В большинстве этих моделей масштабы глобальных стоков углерода в почву и океан за последнюю часть XX века находятся в диапазоне оценок, основанных на наблюдениях.

Следует отметить более чем двукратное, по сравнению с СМIP3, увеличение числа глобальных моделей, участвующих в сравнении. Некоторые центры представили для участия в СМIP5 более одной версии своих моделей, что внесло существенный вклад в указанное увеличение. Описанная ситуация создала дополнительные трудности в применении мультимодельного ансамблевого подхода и сделала более актуальным поиск альтернатив «модельной демократии» при формировании ансамблей для оценок будущих изменений климата.

В табл. 1 приводятся характеристики 31 модели СМIP5, которые были отобраны для использования в оценках будущих изменений климата, и большая часть которых использовалась для установления

причин наблюдающихся изменений климата (Спорышев и Говоркова, 2013).

Модели включают весьма различающиеся по полноте и сложности методы параметризации физических процессов. В течение нескольких лет, прошедших после публикации Четвертого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2007) и Первого оценочного доклада Росгидромета (ОД_РФ-1, 2008), одной из наиболее значимых тенденций развития климатических моделей стало включение биогеохимических компонентов в модели общей циркуляции атмосферы и океана и превращение их тем самым в модели Земной системы.

В оценках качества воспроизведения моделями наблюдаемого климата использованы различные источники данных, включая реанализы. Расхождения между данными наблюдений (реанализов) на рассматриваемой территории могут достигать сравнительно больших значений и в некоторых случаях сопоставимы с межмодельным разбросом для соответствующих характеристик. Последние, впрочем, включают не только модельные ошибки, но и в определенной степени отражают собственную изменчивость климатической системы, неустранимую осреднением модельных данных по времени и пространству. Сводка источников данных наблюдений и реанализов, использованных в настоящей работе, приводится в табл. 2.

В качестве «базового» климатического периода в настоящей статье выступает период 1981—2000 гг., а также, в ряде случаев, — 1980—1999 гг., использовавшийся в Четвертом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2007) и Первом оценочном докладе Росгидромета (ОД_РФ-1, 2008). Использование двух базовых периодов обусловлено наличием обоих в публикациях, посвященных анализу результатов CMIP5, в особенности в сравнениях этих результатов с CMIP3. Сколько-нибудь существенных различий, возникающих в результате применения указанных базовых периодов, не обнаружено.

Таблица 1

Модели CMIP5, использовавшиеся в анализе современного климата и его будущих изменений

№	Индекс модели и год создания	Научные организации, страна	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
1	ACCESS1.0, 2011	CSIRO&BOM, Австралия	N96 (1.875°×1.25°)L38	MOM4p1(1°×0.3°-1.0°)L50	—	✓	✓
2	ACCESS1.3, 2011	CSIRO&BOM, Австралия	N96 (1.875°×1.25°)L38	MOM4p1(1°×0.3°-1.0°)L50	—	✓	✓
3	BCC-CSM1.1 2011	ВСС, Китай	T42 (2.8°× 2.8°)L26	MOM4 (1°× 0.3°-1.0°)L40	✓	✓	✓
4	BNU-ESM ² , 2011	BNU, Китай	T42 (2.8°× 2.8°)L26	MOM4p1(1°× 0.3-1.0°)L50	—	✓	✓
5	CanESM2, 2010	CCCMA, Канада	T63 (1.9°× 1.9°)L35	(~0.7° × ~0.9°)L40 256 × 192	✓	✓	✓
6	CCSM4, 2010	NCAR, США	f09_g16(1.25°×0.9°)L27, 288×192	POP2(1.1°× 0.3~0.6°)L60 320×383	✓	✓	✓
7	CESM1-BGC, 2010	NSF-DOE-NCAR, США	f09_g16(1.25°×0.9°)L27 288×192	POP2(1.1°×0.3~0.6°)L60 320×384	—	✓	✓
8	CESM1-CAM5 ³ , 2010	NSF-DOE-NCAR, США	f09_g16(1.25°×0.9°) L27 288×192	POP2(1.1°×0.3~0.6°)L60 320×384	✓	✓	✓
9	CMCC-CM, 2009	CMCC, Италия	T159(0.75°×0.75°) L31 480×240	ORCA2(2.0°×0.5~2°)L31 182×149	—	✓	
10	CMCC-CMS, 2009	CMCC-CMS, Италия	T63(1.9°x1.9°) L95	ORCA2(2.0°×0.5~2°)L31 182×149	—	✓	✓

Продолжение таблицы 1

² Данные этой модели не использовались при анализе ледовых характеристик

³ Данные этой модели не использовались при анализе снежного покрова и многолетней мерзлоты в расчетах по сценариям RCP4.5, RCP8.5

№	Индекс модели и год создания	Научные организации, страна	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
11	CNRM-CM5, 2010	CNRM, Франция	TL127 (1.4°×1.4°)L31	ORCA1 (~1°×1~0.3°)L42 256×128	✓	✓	✓
12	CSIRO Mk3.6, 2010	CSIRO, Австралия	T63 (1.9°×1.9°)L18	MOM2.2 (1.9°×0.9°)L31	✓	✓	✓
13	GFDL-CM3, 2011	GFDL, США	AM3 C48 (2°×2.5°)L48	MOM4 T(1° × 0.3-1.0°)L50 360×200	✓	✓	✓
14	GFDL-ESM2G, 2010	GFDL, США	AM2 M45 (2°×2.5°)L24	TOPAZT(1° × 0.3-1.0°) L63, 360×210	✓	✓	✓
15	GFDL-ESM2M, 2010	GFDL, США	AM2 M45 (2°×2.5°)L24	MOM4((1° × 0.3-1.0°)L50 360×200	✓	✓	✓
16	GISS-E2-H, 2004	NASA, США	(2.0°× 2.5°)L40	HYCOM(1°×0.2~1.0°)L26	✓	✓	✓
17	GISS-E2-R, 2011	NASA, США	(2.0°× 2.5°)L40	Russel(1°×1.25°)L32	✓	✓	✓
18	HadGEM2-AO, 2008	NIMR/КМА, Корея	N46(2.0°×2.5°)L38	(1°×0.3~1°)L40	✓	✓	✓
19	HadGEM2-CC, 2011	Hadley Centre, Великобритания	HadGEM2N96 (1.875°×1.25V)L60	HadGOM2(1°× 0.3-1.0°) L40	—	✓	✓
20	HadGEM2-ES, 2009	Hadley Centre, Великобритания	HadGEM2N96 (1.875°×1.25°)L38	HadGOM2(1°× 0.3-1.0°) L40	✓	✓	✓
21	INM CM4, 2009	ИВМ, Россия	(2.0° × 1.5°)L21	R1×(1.0°-0.5°)L40 360×340	—	✓	
22	IPSL-CM5A-LR ⁴ , 2010	IPSL, Франция	LMDZA (1.9°×3.75°)L39 96×95	ORCA2 (2°×2°)L31 182×149		✓	✓

Продолжение таблицы 1

⁴ Данные этой модели не использовались при анализе снежного покрова и многолетней мерзлоты

№	Индекс модели и год создания	Научные организации, страна	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
22	IPSL-CM5A-LR ⁵ , 2010	IPSL, Франция	LMDZ4 (1.9°×3.75°)L39 96×95	ORCA2 (2°×2°)L31 182×149	✓	✓	✓
23	IPSL-CM5A-MR ⁴ , 2010	IPSL, Франция	LMDZ4 (1.3°×2.5°)L39 144×143	ORCA2(2°×2°)L31 182×149	✓	✓	✓
24	MIROC5 ⁶ , 2010	AORI/NIES/JAMES&T, Япония	T85L40(1.4°×1.4°)L40	COCO4.5R(1.4°×0.5°)L50 256×224	✓	✓	✓
25	MIROC-ESM, 2010	JAMES&T/A&ORI/NIES, Япония	T42L80(2.8°×2.8°)L80	COCO3.4R(1.4°×0.5°)L44 256×192	✓	✓	✓
26	MIROC-ESM-CHEM, 2010	JAMES&T/A&ORI/NIES, Япония	T42L80(2.8°×2.8°)L80	COCO3.4R(1.4°×0.5°)L44 256×192	✓	✓	✓
27	MPI-ESM-LR, 2009	MPI, Германия	T63 (1.9° × 1.9°)L47	MPIO GR16(~1°×0.5°) L40 256×220	✓	✓	✓
28	MPI-ESM-MR, 2009	MPI, Германия	T63 (1.9° × 1.9°)L95	MPIO TP04(~0.4°×0.4°) L40 802×404	✓	✓	✓
29	MRI-CGCM3, 2011	MRI, Япония	TL159(1.1°×1.1°)L48 320×160	MRI.COM3 (1°×0.5°)L51 360×368	✓	✓	✓
30	NorESM1-M, 2011	NCC, Норвегия	F19(2.5°×1.9°)L26 144×96	MICOM(r112,0.9°×1~0.5°)L5 3 384×320	✓	✓	✓
31	NorESM1-ME, 2012	NCC, Норвегия	F19(2.5°×1.9°)L26 144×96	MICOM(r139,0.9°×1~0.5°)L5 3 384×320	✓	✓	✓

⁵ Данные этой модели не использовались при анализе снежного покрова и многолетней мерзлоты

⁶ Данные этой модели не использовались при анализе ледовых характеристик в расчетах по сценарию RCP2.6

Таблица 2

Сводная таблица источников данных наблюдений/реанализов

<i>Характеристика</i>	<i>Источник данных</i>	<i>Ссылка</i>
<i>Температура у поверхности Земли</i>	CRU — Группа анализа данных наблюдений за климатом Университета Восточной Англии, Великобритания	New et al., 1999; 2000
	CFSR (NCEP) — Национальные центры США по прогнозированию окружающей среды (реанализ)	Saha et al., 2010
	ERA40 — Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Uppala et al., 2005
	ERA-Interim — Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Dee et al., 2011
	NCEP (NCEP-DOE)- Национальные центры США по прогнозированию окружающей среды — Департамент энергетики США (реанализ)	Kanamitsu et al., 2002
	MERRA (NASA) — Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США (реанализ)	Rienecker et al., 2002
	ERA40 — Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Uppala et al., 2005
	ERA-Interim — Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Dee et al., 2011
	MERRA (NASA) — Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США (реанализ)	Rienecker et al., 2011
	CMAP (NOAA CPC) — Центр прогноза климата, Национальное управление по океану и атмосфере, США	Xie, Arkin, 1997

	GPCP (GSFC NASA) — Центр космических полетов Годдарда, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США	Huffman et al., 2001
	Legates	Legates, Willmott, 1990
	Serreze	Serreze et al., 2005
	Xie-Arkin	Xie, Arkin, 1998
<i>Давление</i>	ERA40 — Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Uppala et al., 2005
	ERA-Interim — Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Dee et al., 2011
	NCEP — Национальные центры США по прогнозированию окружающей среды	Kanamitsu et al., 2002
<i>Морской лед</i>	HadISST- архив данных о ТПО и сплоченности морского льда Центра Хэдли, Великобритания	Rayner et al., 2003
	NSIDC — Национальный центр данных о морском льде и снеге, США	Fetterer et al., 2002
	NASA — Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США	Comiso, Nishio, 2008
<i>Снег</i>	Rutgers University — Ратгерский Университет, США	Robinson, Frei, 2000
<i>Многолетняя мерзлота</i>	IPA — Международная ассоциация по мерзлотоведению	Brown et al., 1997, 1998
<i>Сток</i>		Dai A. and K.E.Trenberth, 2002

2. Подходы к дискриминации глобальных климатических моделей

Наиболее высокую успешность воспроизведения средних климатических характеристик при сравнении с данными наблюдений, как правило, показывает результат осреднения по ансамблю моделей. Это связано с тем, что систематические ошибки, присущие каждой модели в отдельности часто являются случайными по отношению к ансамблю моделей и при осреднении по ансамблю взаимно компенсируются. В настоящее время, по-видимому, нет достаточных оснований для того, чтобы автоматически переносить указанное превосходство «средней» модели над отдельными членами ансамбля на оценки будущих изменений климата. Научное сообщество ощутило потребность в создании системы показателей (на основе сравнения модельных расчетов с данными наблюдений), которые позволили бы количественно оценивать совокупное качество каждой модели, а не ограничиваться оценками качества расчетов той или иной климатической характеристики в отдельности. В последние годы, в частности, в связи с необходимостью подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013) разработке таких показателей (метрик), позволяющих ранжировать модели с точки зрения достоверности рассчитываемых с их помощью будущих состояний климатической системы и, соответственно, распределять веса между моделями в ансамблевых расчетах, было посвящено много усилий (IPCC, 2010). Однако, на сегодняшний день неясно, возможна ли в принципе разработка системы метрик, которая стала бы общепринятой (как, например, в численном прогнозе погоды), и позволила ли бы такая система взвешивать члены мультимодельных ансамблей, или, по крайней мере, «объективно» устанавливать пригодность моделей для тех или иных целей (в том числе, для тех или иных регионов) и исключать из мультимодельных ансамблей непригодные модели, а остальные члены использовать с одинаковыми весами.

Насущность дискриминации климатических моделей, формирующих ансамбли, равно как и совершенно не достаточная исследованность соответствующего круга фундаментальных проблем подтверждается нарастающим количеством научных публикаций на

соответствующую тему. Дискриминация моделей стала постоянным предметом дискуссии в научном сообществе (см., напр., (Knutti et al., 2010)).

Дискриминация предполагает построение набора метрик в функциональном пространстве модельных расчетов характеристик климата Земли в целом или совокупностей отдельных регионов, которые позволяют оценивать эффективность каждой из включенных в климатический ансамбль моделей в воспроизведении современного климата и его наблюдаемых изменений. Оценки достоверности модельных расчетов строятся в первую очередь на основе анализа воспроизведения климата Земли во второй половине XX — начале XXI века, поскольку для этого периода имеется наибольшее количество надежных данных наблюдений и реанализов.

Экспериментирование в области комплексирования ансамблей, в том числе на основе сравнения с данными наблюдений, позволило сделать ряд выводов относительно современной ситуации и перспектив дискриминации климатических моделей. На современном уровне развития моделирования и в обозримом будущем дискриминация моделей при формировании ансамблей, предназначенных для оценки будущих изменений климата, по видимому, не может представлять собой ничего большего, нежели исключение непригодных моделей (Overland et al., 2010) или моделей приблизительно равного качества, количество которых превышает «оптимальный» размер ансамбля (Генихович и др., 2010). Исключение моделей может быть особенно уместно при формировании ансамблей для региональных оценок. В некоторых регионах отдельные модели могут оказаться непригодными для оценок будущих изменений климата из-за низкого качества воспроизведения рассматриваемой климатической характеристики (например, для приземного климата высоких широт — морского льда). Маловероятно, что при современном уровне развития моделирования присвоение разным членам мультимодельного ансамбля различных ненулевых (т.е., в пределах от 0 до 1) весов может получить достаточное научное обоснование. При этом осреднение по ансамблю моделей с равными весами не является универсально наилучшим подходом (в ряде

случаев, например, предпочтительно определение «медианной» модели). Экспертные оценки региональных изменений климата на основе того или иного дискриминационного подхода к комплексированию мультимодельного ансамбля должны включать анализ робастности полученного результата. Робастность оценивается путем сопоставления с полным (недискриминированным) ансамблем, или с ансамблем, составленным на основе иной системы метрик (см., например, Мелешко и Катцов, 2008).

Сравнительный анализ вероятностных функций распределения, полученных в расчетах и по данным наблюдений, выявил ряд серьезных методических проблем, непосредственно связанных с проблемой дискриминации моделей (например, проблему корректности сравнения данных наблюдений, представляющих собой лишь одну из возможных реализаций, с модельным ансамблем, представляющим собой множество реализаций). Следует принимать во внимание, что воспроизведение эволюции климатической системы (траектории в фазовом пространстве) подразумевает надлежащую инициализацию «медленных» компонентов модельной климатической системы, прежде всего — термохалинной структуры океана и толщины морского льда. При этом остается актуальной проблема быстрого «модельного дрейфа» от начальных условий, не говоря уж о фундаментальной проблеме предсказуемости климата на временных масштабах от нескольких лет до десятилетия (Murphy et al., 2010; Катцов, 2010; Frolov and Kattsov, 2009).

На основе проведенных исследований можно сформулировать предварительные базовые рекомендации по дискриминации климатических моделей. (Разработка более строгого, чем набор рекомендаций и принципов, алгоритма дискриминации моделей на сегодняшний день не представляется принципиально осуществимой.)

Как правило, качество расчетов климата с помощью той или иной модели неодинаково для разных переменных, регионов и оценочных метрик. Причины различий редко бывают очевидны. Дискриминация моделей, таким образом, должна, по-видимому, основываться на следующих соображениях. Во-первых, должна оцениваться способность моделей воспроизводить наблюдаемый (например, в XX

— начале XXI вв.) климат, включая его изменчивость. Эта изменчивость включает годовой цикл климатических характеристик, а также ведущие пространственные и/или временные моды. Уже на этом первоначальном этапе из дальнейшего рассмотрения могут быть исключены некоторые модели. Следующим шагом отбора (присвоения весов) является рассмотрение воспроизведение климата XX в. для переменных, представляющих интерес с точки зрения конкретной задачи (приложения). При этом, несмотря на определенную привлекательность, выбор единственной «лучшей» модели и, соответственно, полученных с ее помощью оценок будущих изменений климата, очевидно, рискован, поскольку результаты ранжирования моделей, как правило, не являются робастными по отношению к выбору метрики. Кроме того, разброс расчетов с различными моделями является мерой так называемой «структурной» неопределенности, связанной с недостатками модельных описаний различных климатообразующих процессов. Наконец, должна быть рассмотрена «полнота» модельных описаний интересующих климатических параметров.

Задача обеспечения «объективности» дискриминации, очевидно, не имеет количественного решения, поэтому ключевым требованием при отборе моделей является прозрачность процедур, которой способствует максимально возможная простота используемых методов и подходов.

В настоящей работе реализован упрощенный вариант дискриминации моделей СМIP5 для отдельных регионов: Северное полушарие; северная полярная область в пределах 60° с. ш.; водосборы суши Северного Ледовитого океана; территория России; ее отдельные части (например, водосборы крупных рек или групп рек). Наиболее существенным допущением при этом была равнозначность (одинаковый вес) рассматриваемых климатических характеристик, включая равнозначность различных переменных (например, температуры и осадков), средних значений и изменчивости (например, среднеквадратичное отклонение), средних значений и трендов, средних годовых и средних сезонных значений и т. п. При этом наборы климатических характеристик для разных регионов были

различными (например, для Северного полушария, помимо прочих характеристик, рассматривалась площадь ледяного покрова океана, а для водосборов суши — речной сток).

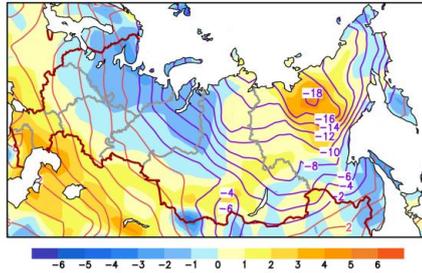
При формировании ансамбля моделей, предназначенного для использования в настоящей работе, была применена «мягкая» дискриминация (по сравнению, например, с работами В. П. Мелешко и В. А. Говорковой (2013) или О. А. Анисимова и Кокорева (2013), в которых отбирались «лучшие» модели). В итоге был сформирован ансамбль из 31 модели СМIP5 (табл. 1), что, примерно, в полтора раза больше, чем число моделей СМIP3, использовавшихся в Первом оценочном докладе Росгидромета (Катцов и др., 2008).

3. Воспроизведение наблюдаемого климата России с помощью моделей СМIP5

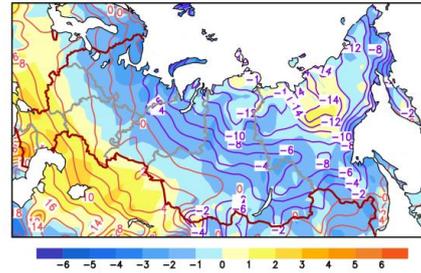
3.1. Температурный режим

Географическое распределение полученных в результате осреднения по ансамблю моделей СМIP5 отклонений средних годового и сезонных значений температуры воздуха от данных наблюдений характеризуется рядом особенностей (рис. 1). Над большей частью территории России модели занижают среднюю годовую температуру, по отношению к данным реанализов. По сравнению с данными анализа CRU, занижение температуры отмечается, главным образом, на ЕТР и на Дальнем Востоке. В то же время над Сибирью отмечается завышение температуры ансамблем моделей, по отношению к CRU. Наиболее заметной систематической погрешностью в холодный период является занижение температуры над северными регионами Европейской территории России и Западной Сибири.

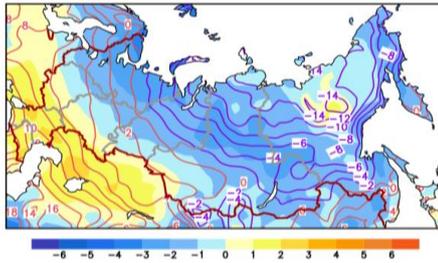
а)



б)



в)



г)

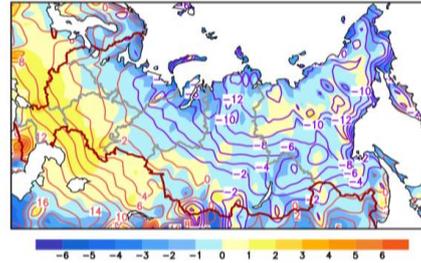


Рис. 1. Распределение средней систематической ошибки (°C) расчета средней за год температуры приземного воздуха (1981—2000 гг.), полученной в ансамбле из 31 модели CMIP5, по отношению к (а) данным наблюдений CRU и данным реанализов ERA-Interim (б), ERA40 (в), MERRA (г) (показаны изолиниями).

По отношению к среднему по ансамблю моделей СМIP3, практически на всей территории России температура воздуха у поверхности Земли в ансамбле СМIP5 повысилась, особенно в зимний период (рис. 2). Тем самым систематическая погрешность, присущая ансамблю моделей СМIP3, в целом для территории России уменьшилась (табл. 3).

Таблица 3

Средние систематические ошибки расчета температуры приземного воздуха (°С) на территории России по ансамблям из 19 моделей СМIP3 для современного климата (1980—1999 гг.) и из 31 модели СМIP5 (1981—2000 гг.), по отношению к данным наблюдений CRU.

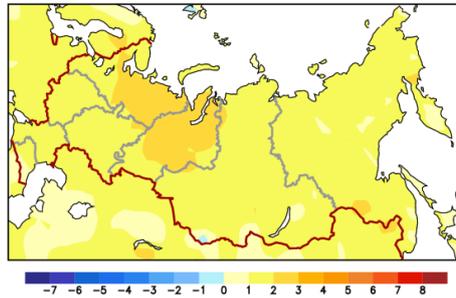
Регионы	Ансамбль	Зима	Лето	Год
Россия	СМIP3	$-1,9 \pm 2,6$	$-1,1 \pm 1,5$	$-1,8 \pm 1,5$
	СМIP5	$-0,0 \pm 2,0$	$0,2 \pm 1,5$	$-0,3 \pm 1,3$
ЕТР	СМIP3	$-3,4 \pm 2,6$	$-1,1 \pm 1,5$	$-2,3 \pm 1,6$
	СМIP5	$-1,2 \pm 2,5$	$0,1 \pm 1,5$	$-0,5 \pm 1,5$
Западная Сибирь	СМIP3	$-2,3 \pm 2,7$	$-1,2 \pm 1,7$	$-2,1 \pm 1,5$
	СМIP5	$-0,4 \pm 2,2$	$0,1 \pm 1,5$	$-0,5 \pm 1,3$
Восточная Сибирь	СМIP3	$-0,6 \pm 3,4$	$-0,8 \pm 1,8$	$-1,1 \pm 1,9$
	СМIP5	$1,2 \pm 2,7$	$0,2 \pm 1,7$	$0,3 \pm 1,6$

Примечание.

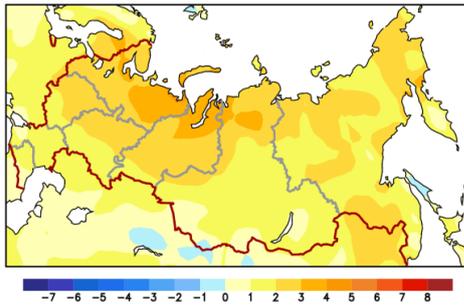
Приводятся стандартные отклонения температуры, характеризующие межмодельный разброс ($\pm\sigma$).

Большинство моделей успешно воспроизводит сезонный ход температуры приземного воздуха на крупных водосборах (рис. 3): южные реки (Днепр, Днестр, Дон, Кубань) — 3а; северные реки (Западная Двина, Печора, Мезень) — 3б; Обь — 3в; Лена — 3г; Амур — 3д, Енисей — 3е, Волга-Урал — 3ж.

a)



б)



в)

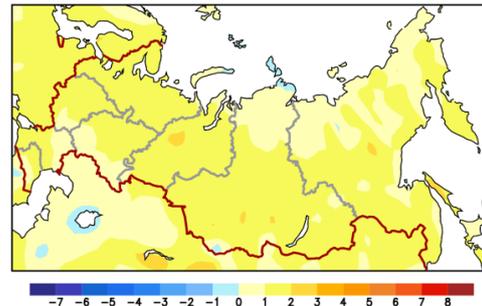
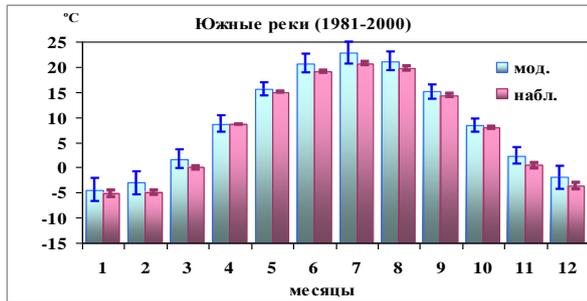
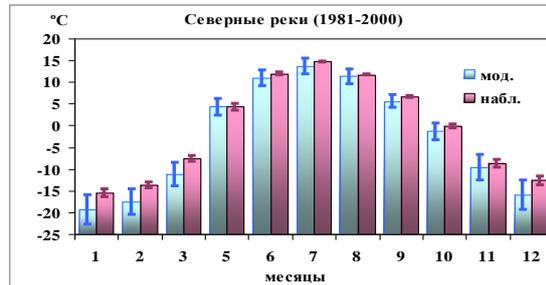


Рис. 2. Распределения разности (а) средней за год, (б) зимней и (в) летней температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) между ансамблями СМIP5(1981—2000 гг.) и СМIP3(1980—1999 гг.).

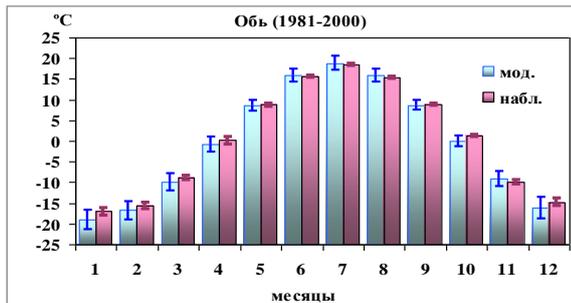
a)



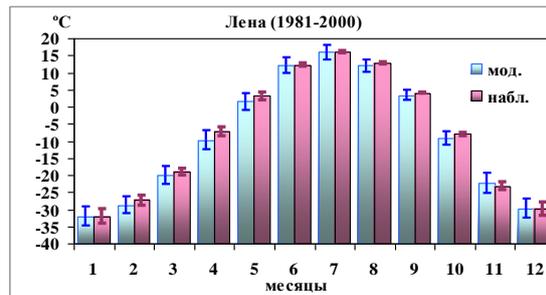
б)



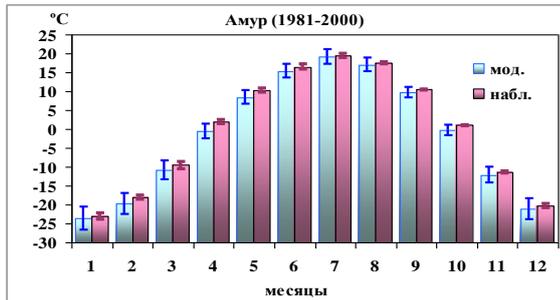
в)



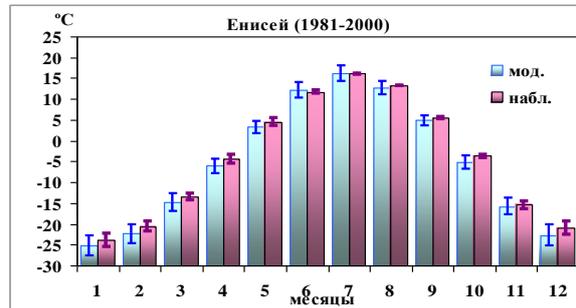
г)



д)



е)



ж)

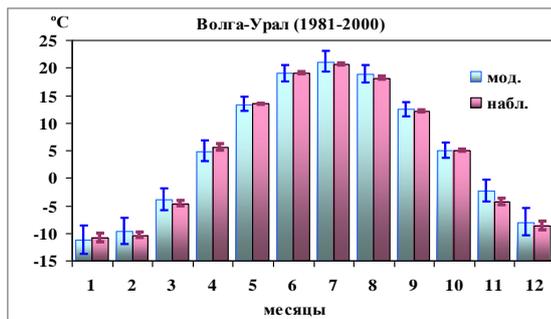


Рис. 3. Сезонные изменения температуры приземного воздуха на водосборах российских рек (1981—2000 гг.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели СМIP5 («мод.») и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (набл.).

В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm\sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов.

В большинстве случаев среднемесячные наблюдаемые значения температуры (и зачастую разбросы между данными наблюдений/реанализов) оказываются в пределах одного стандартного отклонения от среднего по модельному ансамблю (рис. 2.П, рис. 4.П(а)).

Качество расчета экстремальных значений приземной температуры воздуха в моделях СМIP5 несколько выросло по сравнению с моделями предыдущего поколения. Повышение качества расчетов затронуло, в первую очередь, экстремально высокие температуры воздуха, в то время как расчет экстремально низких температур остался примерно на прежнем уровне качества. Так, например, пространственное распределение среднего за 20 лет годового максимума температуры воздуха (в умеренных широтах отмечается обычно летом) в моделях СМIP5 хорошо согласуется с данными реанализа, в то время как оценки СМIP3 несколько заниженные относительно тех же данных (рис. 4). Среднее отклонение годового максимума температуры на территории суши Северного полушария для ансамбля СМIP3 составляет $-1,8$ °С, а для СМIP5 $-0,8$ °С. На территории России отклонения составляют $-1,8$ °С и $-0,1$ °С соответственно. Что касается среднего годового минимума температуры воздуха, то для моделей обоих поколений характерной систематической погрешностью остается недооценка экстремальности зимнего термического режима. Как следует из рисунка 5, несмотря на общую удовлетворительную согласованность пространственных распределений экстремально низких температур между реанализом и моделями СМIP3 и СМIP5, модельные температуры завышены соответственно на $4,1$ °С и $5,1$ °С (по России) и на $4,5$ °С и $4,1$ °С на территории суши Северного полушария. В небольших по размеру областях на севере Центральной и Восточной Сибири абсолютные значения отклонений температуры в СМIP5 от реанализа оказываются несколько большими по сравнению с отклонениями СМIP3. Однако в целом качество расчетов низкотемпературных экстремумов в моделях разных поколений близкое.

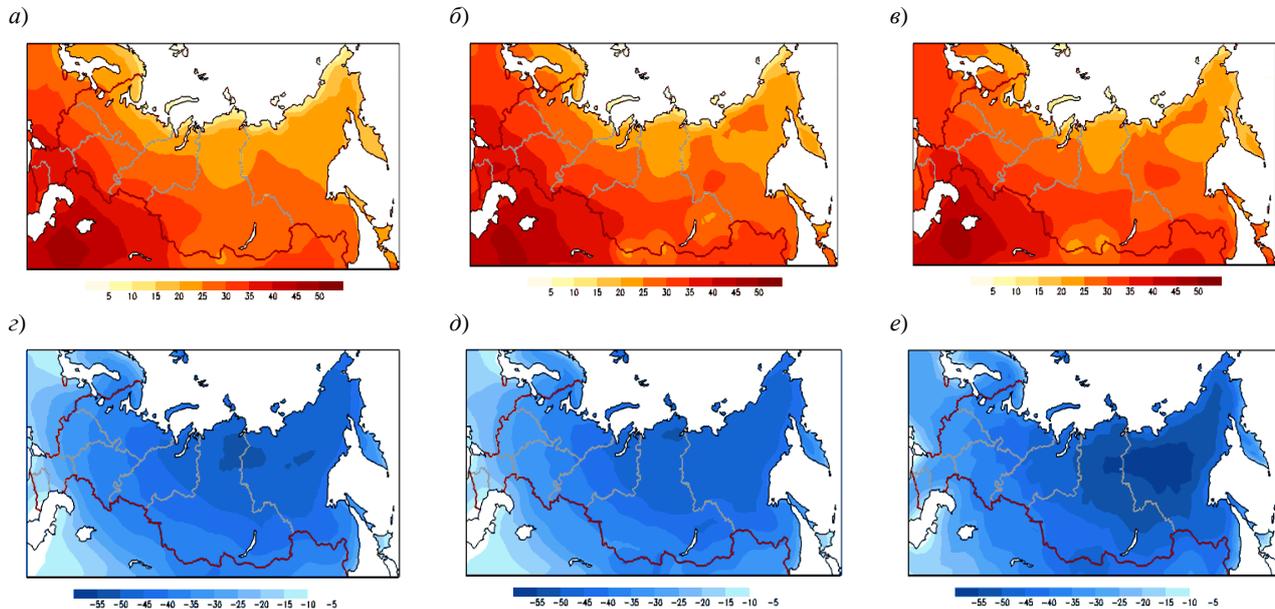


Рис. 4. Пространственные распределения среднего за период 1980—1999 гг. годового максимума (*а, б, в*) и минимума (*г, д, е*) температуры приземного воздуха по оценкам ансамбля моделей СМIP3 (*а, г*), СМIP5 (*б, д*) и по данным реанализа (*в, е*) NCEP-DOE (Kanamitsu et al., 2002). Рисунки (*а, г, в, е*) были включены в (ОД_РФ-1, 2008). Оценки рассчитаны с использованием ансамбля 9 моделей (номера 5, 11, 12, 14, 20, 22, 24, 27, 2 из табл. 1) одних и тех же исследовательских групп, принимавших участие в СМIP3 и СМIP5.

При этом необходимо отметить, что в настоящее время климатологии экстремальных явлений континентального масштаба, основанной на данных наземных наблюдений и пригодной для сравнения с модельными оценками, не существует, а в оценках экстремальности термического режима по реанализам имеется значительная неопределенность, особенно в регионах с редкой сетью метеорологических наблюдений (Kharin et al., 2005). К таким регионам относятся, в первую очередь, Сибирь и российский Крайний Север, для которых сравнение модельных оценок с реанализом представляется менее надежным по сравнению с западными регионами России.

Улучшение описания моделями термического режима и его экстремальных значений на территории России, особенно в теплое время года, позволило, в свою очередь, уменьшить ошибки в расчетах целого ряда индексов экстремальности. Так, абсолютное значение ошибки в расчете длительности вегетационного сезона (числа суток в году между датой последнего перехода к температурам выше $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ весной и датой первого осеннего понижения температуры ниже указанного значения) уменьшилось в среднем на территории России с 12 до 2 суток относительно данных реанализа.

Завышение числа дней в году с минимальной суточной температурой воздуха ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 20 суток сократилось при использовании результатов расчета температуры по моделям CMIP5 по сравнению со CMIP3 более чем в два с половиной раза (до 8 суток). Заметно возросла и степень согласованности между рассчитанной по моделям непрерывной длительностью морозного периода (периода со средней суточной температурой приземного воздуха ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) и данными реанализа: завышение длительности такого периода на 9 дней, рассчитанное по температуре из моделей CMIP3, сменилось по оценкам моделей нового поколения незначительным занижением (на 4 дня).

В то же время, существенных различий в описании средней продолжительности волн тепла летом и волн холода зимой, рассчитанных относительно соответствующих 90 и 10 квантилей максимальной и минимальной суточных температур, не отмечается.

По данным обоих ансамблей прослеживается тенденция к незначительному завышению (до 1 суток) продолжительности таких волн. По-видимому, в сохранении таких погрешностей существенную роль играют ограничения моделей в описании изменчивости приземной температуры воздуха. Такие ограничения могут быть отчасти обусловлены недостаточным модельным разрешением, приводящим к большей, чем в реанализе, сглаженности временных вариаций температуры воздуха.

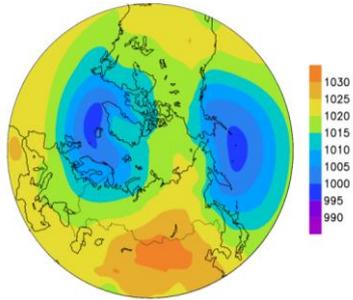
3.2. Циркуляционный режим атмосферы

Изменчивость циркуляции атмосферы над Северной Евразией зависит от сезонного положения и интенсивности основных центров действия атмосферы в Северном полушарии. Ансамбль моделей СМIP5 достаточно успешно воспроизводит положение и интенсивность Исландского и Алеутского минимумов и Сибирского максимума зимой (рис. 5). Летом более выраженными оказываются субтропические антициклоны над Атлантическим и Тихим океанами, причем в модельных расчетах они получились несколько более интенсивными, чем показывают данные наблюдений.

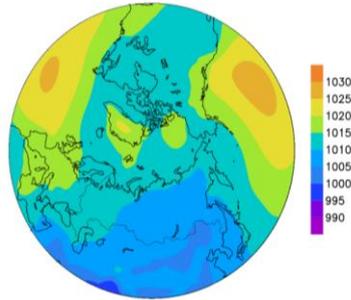
Модели СМIP5 в среднем завышают атмосферное давление над северными регионами России (в зимний период) и, в особенности, над Арктикой (и зимой, и летом). По сравнению с СМIP3, в ансамбле СМIP5 произошло уменьшение этой систематической ошибки, имеющей важное значение, с точки зрения динамического воздействия атмосферы на дрейфовую циркуляцию океана и морского льда. Улучшение результатов расчетов давления над северной полярной областью может быть в некоторой степени связано с улучшением разрешения моделей.

Модели реалистично воспроизводят области максимальной изменчивости атмосферного давления на уровне моря зимой и летом (рис. 6). Изменчивость несколько занижается моделями, по сравнению с данными наблюдений, особенно зимой.

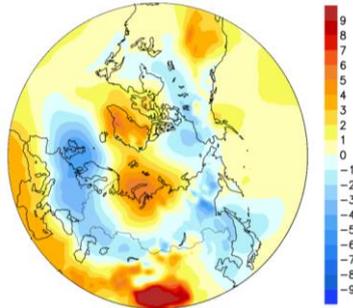
a)



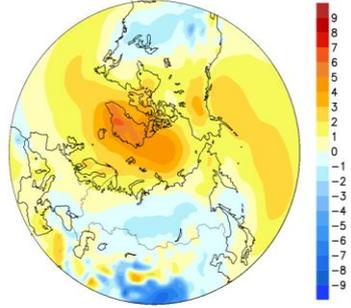
b)



c)



d)



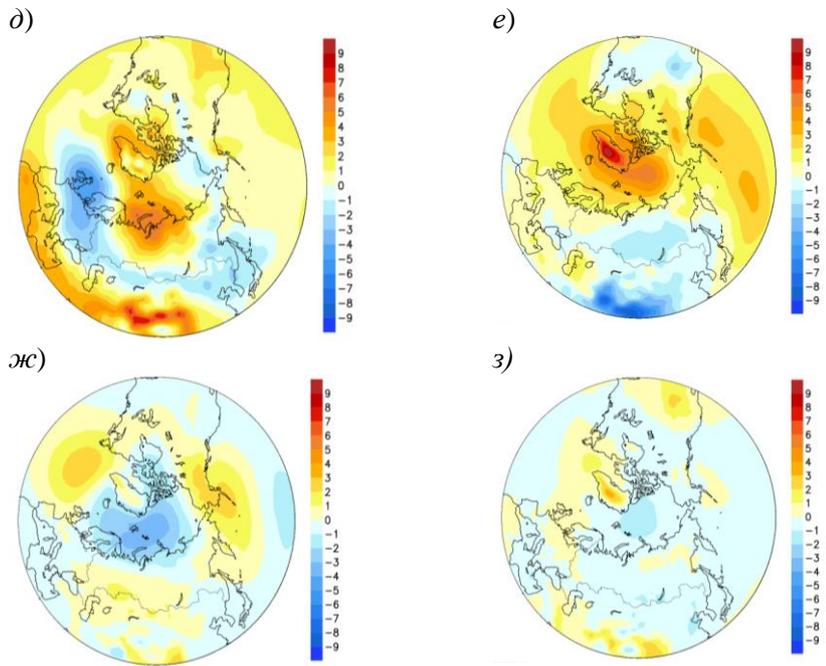


Рис. 5. Атмосферное давление на уровне моря (гПа) в среднем за период 1981—2000 гг. зимой (а) и летом (б), полученное в ансамбле из 31 модели CMIP5, а также разности давления для зимы (в, д, ж) и лета (г, е, з) между ансамблем CMIP5 и реанализом ERA-Interim (в, г), CMIP5 и реанализом NCEP-2 (д, е), CMIP5 и CMIP3 (ж, з).

Однако, в ансамбле СМIP5 отмечается некоторое улучшение в воспроизведении этой характеристики, по сравнению с СМIP3 (см. (Катцов и др., 2008), их рис. 5.8).

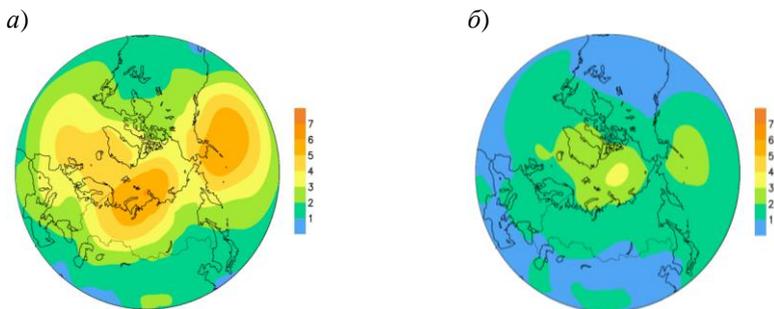


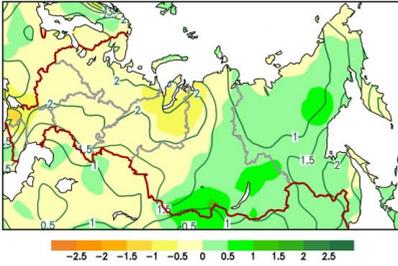
Рис. 6. Межгодовая изменчивость атмосферного давления на уровне моря (гПа) (а) зимой и (б) летом, полученная в ансамбле из 31 модели СМIP5 (1981—2000 гг.).

3.3. Атмосферные осадки и речной сток

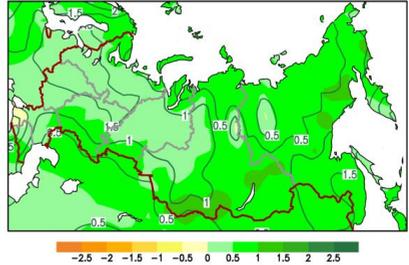
В целом, ансамбль моделей СМIP5 реалистично воспроизводит основные крупномасштабные характеристики осадков (рис. 7). На Европейской территории России наблюдаются меньшие по абсолютной величине погрешности среднегодовых осадков. Тенденция к завышению расчетных осадков отмечается на большей части Азиатской территории России. Распределения систематических ошибок по территории России зависят от того, какие данные наблюдений за осадками использованы при анализе. Интерпретировать полученные отклонения достаточно сложно, учитывая их большую пространственную изменчивость и большой разброс между данными наблюдений/реанализов⁷. Как и в СМIP3, межмодельные стандартные отклонения в ансамбле СМIP5 оказываются, как правило, значительно большими, чем средние за год погрешности для всей территории России.

⁷ По этой причине таблица для осадков, аналогичная таблице 3.1.3 для температуры, не приводится.

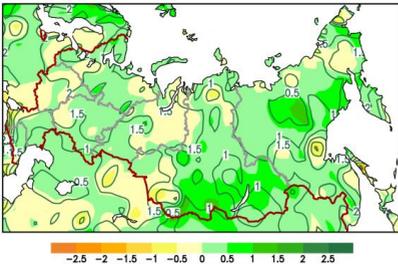
a)



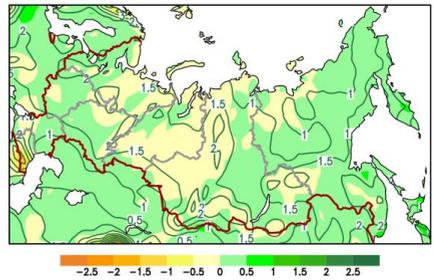
б)



в)



г)



д)

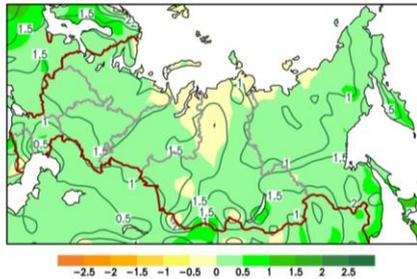
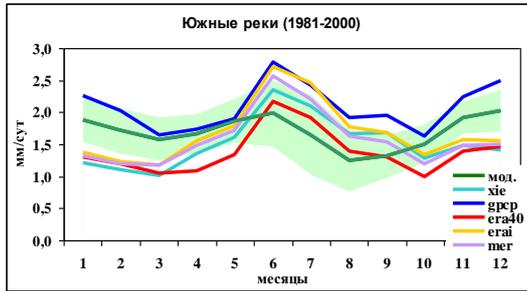
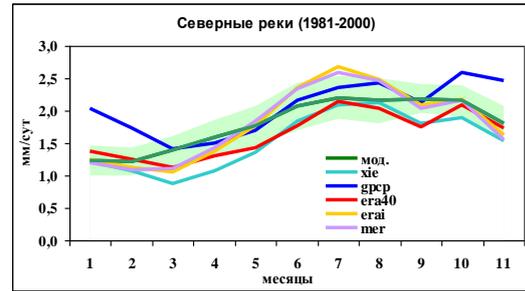


Рис. 7. Распределение средней систематической ошибки расчета средних за год атмосферных осадков (1981—2000 гг.) (показана цветом, мм/сутки), полученной в ансамбле из 31 модели CMIP5, по отношению к данным наблюдений (а) GPCP (б) XA (в) Legates и данным реанализов: (г) ERA-Interim, (д) ERA40, соответственно, (табл. 2) (показаны изолиниями).

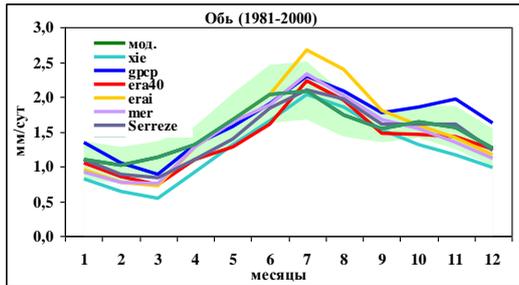
a)



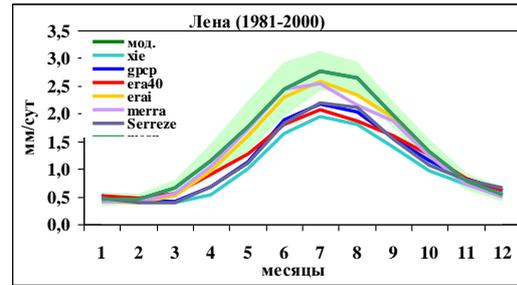
б)



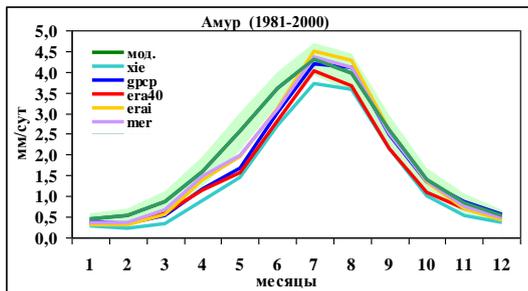
в)



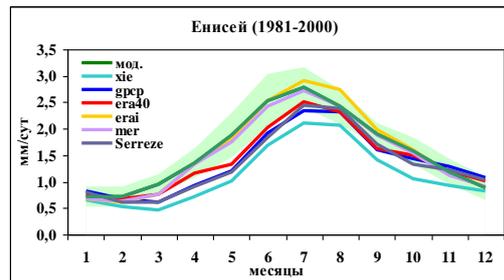
г)



д)



е)



ж)

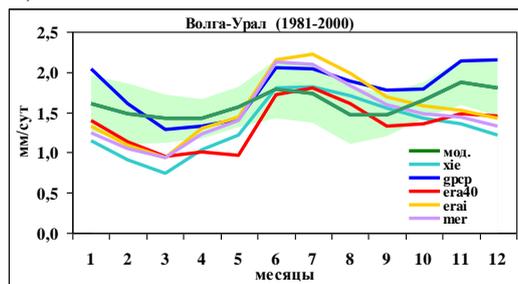


Рис. 8. Сезонный ход осадков (мм/сутки) на водосборах российских рек (1981—2000 гг.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели СМIP5 («мод.») и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (набл.) (см. табл. 2).

Заштрихованная область показывает межмодельные стандартные отклонения от среднего по ансамблю моделей ($\pm\sigma$). Расчеты представлены для семи водосборов: (а) Южные реки (Днепр, Днестр, Дон, Кубань); (б) Северные реки (Западная Двина, Печора, Мезень); (в) Обь; (з) Лена, (д) Амур, (е) Енисей, ж) Волга—Урал.

По сравнению с моделями СМIP3, ансамбль СМIP5 показывает незначительное увеличение осадков практически по всей территории России как в зимний, так и в летний период.

Средние сезонные колебания осадков в бассейнах крупных российских рек, рассчитанные по моделям СМIP5, в целом, удовлетворительно согласуются с наблюдениями/реанализами (рис. 8), особенно если учесть значительные расхождения между данными наблюдений (реанализов) из разных источников. Модельные оценки сезонного хода осадков для федеральных округов РФ представлены в Приложении (рис.3.П, рис.4.П(б))

Среднегодовые оценки стока для крупных водосборов средних и высоких широт хорошо согласуются с данными наблюдений (рис. 9). По сравнению с ансамблем СМIP3 (ОД_РФ-1, 2008; рис.5.11), качественного улучшения расчетов в ансамбле СМIP5 не произошло.

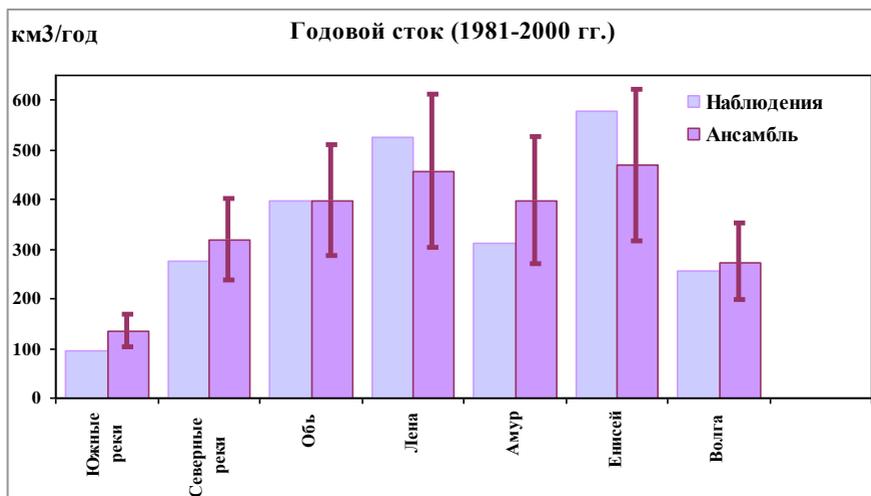


Рис. 9. Средние значения годового стока (км³/год) на крупных водосборах, рассчитанные по ансамблю из 26 моделей (1981—2000 гг.) и полученные по данным наблюдений (Dai and Trenberth, 2002; Hagemann and Dümenil, 1996).

В столбцах с модельными данными, помимо средних, приводятся стандартные отклонения, характеризующие межмодельный разброс ($\pm\sigma$).

3.4. Снежный покров суши и многолетняя мерзлота

Прогностическими характеристиками снежного покрова суши в климатических моделях обычно являются его толщина, удельная (на единицу площади) масса или водный эквивалент, температура поверхности и в толще снега, а также, в некоторых моделях, доля суши, покрытая снегом. Благодаря спутниковым наблюдениям площадь снежного покрова является наиболее надежно измеряемой характеристикой, и потому используется в сравнительных анализах модельных расчетов в качестве основной.

В целом ансамбль моделей СМIP5 удовлетворительно воспроизводит площади, занятые снегом и многолетней мерзлотой в Северном полушарии, при этом соответствие расчетных и наблюдаемых границ зоны многолетней мерзлоты лучше в Евразии, чем в Северной Америке, а для снежного покрова суши — наоборот (рис. 10).

По сравнению с моделями СМIP3, произошло некоторое улучшение качества воспроизведения площади снежного покрова в моделях СМIP5, хотя по-прежнему, часть моделей неудовлетворительно воспроизводит площадь снежного покрова на территории Китая и Монголии.

По сравнению с моделями СМIP3, ансамбль моделей СМIP5 лучше воспроизводит сезонный ход площади снега, лишь немного занижая ее в зимние месяцы и в июне, но межмодельный разброс остается значительным (рис. 11). Столь же существенный разброс остается между моделями характерен и для расчетов массы снега. По сравнению с ансамблевыми расчетами по 17 моделям СМIP3 (Павлова и др., 2007, рис.2), существенных изменений в результатах моделирования этой характеристики снежного покрова не обнаруживается (рис. 12(a)).

Сравнение с данными наблюдений по-прежнему затруднительно в связи с отсутствием надежных данных наблюдений. К настоящему времени разработан ряд методов и моделей восстановления на основе спутниковых данных таких характеристик, как площадь, высота и водный эквивалент снежного покрова.

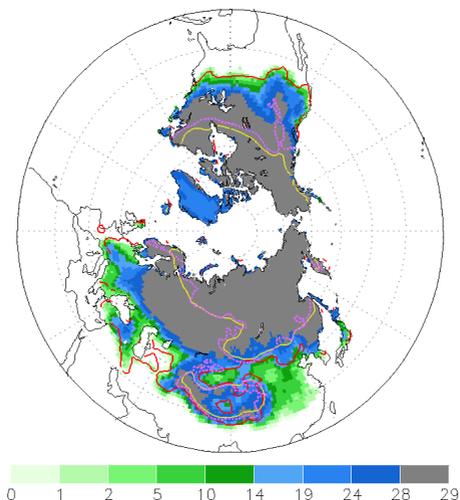


Рис. 10. Распределение снежного покрова суши в Северном полушарии в расчетах с моделями СМIP5 для февраля: за период 1980—1999 гг. В каждой ячейке модельной сетки различными цветами, в соответствии со шкалой внизу рисунка, показано количество моделей, в которых для этой ячейки получен снег удельной массой не менее 5 кг/м^2 . Красная линия — наблюдаемые границы снежного покрова (не менее 20 % дней месяца) за период 1986—2005 гг., полученные по данным (Robinson and Frei, 2000). Желтая линия — расчетная граница зоны многолетней мерзлоты, фиолетовая штриховая линия — современная наблюдаемая граница многолетней мерзлоты (Brown et al., 1997, 1998).

В основном методы отличаются в зависимости от типа используемого датчика, но могут включать учет зависимости от преобладающего типа растительности, рельефа и климатических условий. Подробный обзор методов получения и использования спутниковой информации для восстановления данных о снежном покрове приведен в работе (Dietz A. et al., 2011). Как показывают исследования (Китаев и Титкова, 2010; Носенко и др., 2005, 2006), погрешность восстановленных данных водного эквивалента снега может быть весьма значительна по сравнению с данными наземных измерений.

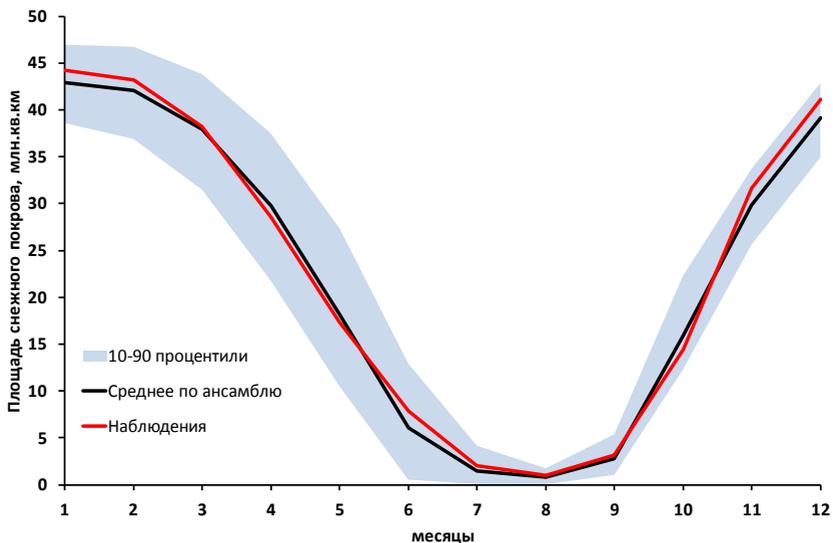


Рис. 11. Сезонный ход площади снежного покрова суши Северного полушария без учета Гренландии (млн км²) по данным модельных расчетов и данным наблюдений (Robinson and Frei, 2000) за период 1980—1999 гг.

Голубая штриховка – межмодельный разброс в пределах 10-й и 90-й процентилей.

Данные наземных наблюдений свидетельствуют о том, что в последние десятилетия на территории России происходит увеличение высоты снежного покрова как максимальной, так и средней за зиму (Булыгина и др., 2011). В работе О. Н. Булыгиной с соавторами (2011) выполнен анализ пространственных и временных изменений снежного покрова за период 1966—2010 гг. и показано (их рис. 6, 8), что положительный тренд в рядах средней за зиму высоты снега обнаруживается для регионов атлантической и сибирской Арктики, южной части Западной Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока, а максимальный за зиму запас воды в снеге увеличился на севере Восточно-Европейской равнины, юге Западной Сибири, на Дальнем Востоке и центральной части Восточной Сибири. Анализ модельных данных за этот же период показал, что в некоторых моделях и в среднем по ансамблю обнаруживается увеличение

среднемесячной массы снежного покрова в основном для регионов Восточной Сибири (рис. 12(б)).

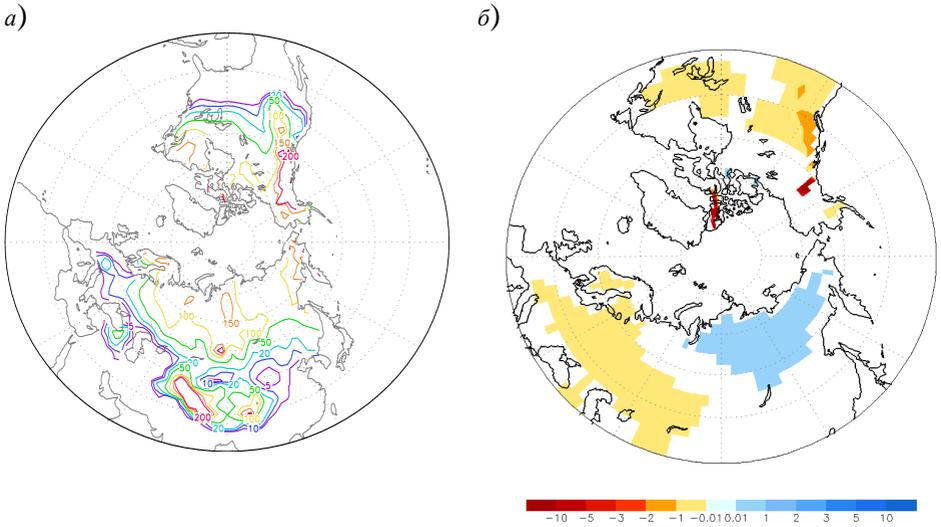


Рис. 12. Удельная масса снега по данным ансамбля СМIP5: (а) удельная масса ($\text{кг}/\text{м}^2$) для февраля за период 1980—1999 гг. и (б) линейный тренд среднемесячных значений удельной массы снежного покрова для марта 1966—2010 гг. ($\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$). Показаны области статистически значимых трендов.

Расчеты линейных трендов среднегодовой площади снежного покрова суши в Северном полушарии в ансамбле моделей СМIP5 за периоды 1900—1999 и 1980—1999 гг. показали результаты, близкие к расчетам по моделям СМIP3, а именно: для периода 1900—1999 гг. все члены рассмотренного ансамбля СМIP5 демонстрируют сокращение площади снежного покрова суши, величина тренда оказывается равной $-6,0$ тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ против $-6,2$ тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ в ансамбле СМIP3. Для периода 1980—1999 гг. в пяти моделях СМIP5 выявляется рост среднегодовой площади снежного покрова, в двадцати пяти — сокращение площади снега, величина среднего по ансамблю СМIP5 линейного тренда оказывается сопоставимой с

соответствующей оценкой, полученной по данным моделей СМIP3: $-31,6$ тыс. км²/год против $-32,5$ тыс. км²/год. Наблюдаемый тренд за период 1980-1999 гг. составил $-25,9$ тыс. км²/год (Павлова и др., 2013).

Анализ данных наблюдений (Brown and Robinson, 2011) показывает сокращение площади снежного покрова весной (март-апрель) в период с 1922 г. по 2010 г., при этом скорость сокращения возросла за последние 40 лет. Линейный тренд изменения мартовской и апрельской площади снега в период 1922—2010 гг. составил $-32,4$ тыс. км²/год и $-47,2$ тыс. км²/год соответственно, и $-72,6$ тыс. км²/год и -83 тыс. км²/год соответственно в период 1970—2010 гг. (Brown and Robinson, 2011). Тренды, полученные по данным (Robinson and Frei, 2000) несколько меньше, чем приведенные в работе (Brown and Robinson, 2011), но и в этом случае скорость сокращения площади снега в эти месяцы в среднем по ансамблю из 28 моделей СМIP5 оказывается меньше наблюдаемой: $-42,7$ тыс. км²/год в марте и $-54,4$ тыс. км²/год в апреле против наблюдаемых $-66,4$ тыс. км²/год и -70 тыс. км²/год соответственно (Павлова и др., 2013).

Снежный покров (площадь его распространения, высота, продолжительность залегания) оказывает существенное влияние на температурный режим многолетнемерзлых грунтов. Оценки площади и ряда других характеристик многолетней мерзлоты и их эволюции могут быть получены либо напрямую из климатических моделей по данным о расчетной температуре почвы на различных глубинах, либо с помощью других моделей и расчетных схем, использующих в качестве входных параметров данные о температуре воздуха (подстилающей поверхности) и высоте снежного покрова, полученные из реанализов и/или климатических моделей.

Как показано в работах (Koven et al., 2013; Slater and Lawrence, 2013), анализ современного состояния и эволюции площади многолетней мерзлоты, полученной по данным о температуре почвы в моделях, оказывается затруднительным в связи с тем, что в климатических моделях для описания процессов на поверхности и в глубине почвы используются сильно различающиеся (как по числу

уровней и глубине почвы, так и по физическим процессам) почвенные модели. Так в рассмотренных в (Slater and Lawrence, 2013) 13 моделях почвенная колонка включала от 3 до 23 слоев, а глубина ее варьировала от 3 до 47 м.

Разброс модельных значений площади многолетней мерзлоты, рассчитанной напрямую по данным о модельной температуре почвы, оказывается очень большим. Рассчитанная в 18 моделях СМIP5 современная площадь многолетней мерзлоты составила от 1,4 до 27,3 млн км² (Koven et al., 2013). Оценки современной площади многолетней мерзлоты, полученные на основе почвенно-мерзлотного индекса (Nelson and Outcalt, 1987), рассчитанного по модельным данным о снежном покрове и температуре воздуха, составили от 11 до 21 млн км² (Slater and Lawrence, 2013).

В расчетах термического состояния грунтов, выполненных с помощью модели теплопереноса в грунтах ГТО (Malevsky-Malevich et al., 2001) с использованием данных о температуре подстилающей поверхности и высоте снежного покрова, рассчитанных в 29 моделях СМIP5, положение средней по ансамблю расчетов нулевой изотермы среднегодовой температуры грунта на глубине 3,3 м удовлетворительно описывает современную границу многолетней мерзлоты, включая зоны прерывистой и островной мерзлоты (рис. 13). Площадь, занятая многолетней мерзлотой в Северном полушарии (без учета Гренландии), составила 21,9 млн км² в расчетах с данными моделей СМIP5, что практически совпадает с результатами, полученными с использованием данных СМIP3 (21,8 млн км²). Фактическая площадь этой зоны по современным оценкам 22,8 млн. км² (Zhang et al., 1999).

В целом сравнение результатов расчетов СМIP5 и СМIP3 показало, что значительных изменений в качестве воспроизведения площади снежного покрова и многолетней мерзлоты в моделях не произошло, особенности будущих изменений данных характеристик, полученные в моделях СМIP3, подтвердились в моделях СМIP5.

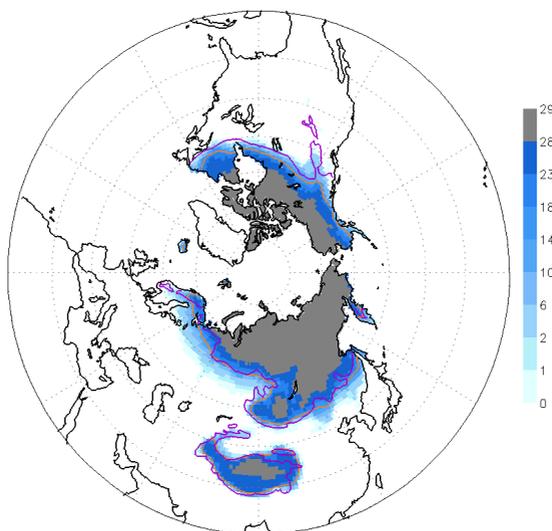


Рис. 13. Площадь, занятая мерзлотой в верхнем (3,3 м) слое почвы по данным расчетов на базе 29 моделей СМIP5 для периода 1980—1999 гг. В каждой ячейке сетки $1^\circ \times 1^\circ$ различными цветами показано количество моделей, в которых для этой ячейки усредненная за период 1980—1999 гг. среднегодовая температура грунта на глубине 3,3 м не превышает 0°C . Желтая линия показывает условную расчетную границу зоны многолетней мерзлоты, определяемую по положению среднегодовой изотермы 0°C на глубине 3,3 м, усредненной по ансамблю моделей, фиолетовая линия – современная наблюдаемая граница многолетней мерзлоты (Brown et al., 1997, 1998).

3.5. Морской лед

Прогностическими переменными ледовых компонентов климатических моделей обычно являются толщина (или удельная масса) льда, сплоченность, толщина снежного покрова, температура поверхности и в толще морского льда, а также скорость дрейфа. За редким исключением, соленость морского льда не является прогностической переменной, а альбедо ледяного покрова океана обычно весьма произвольно связано с толщиной льда и наличием снежного покрова. Площадь распространения морского льда является его сравнительно надежно измеряемой (со спутников)

характеристикой и потому используется в сравнительных анализах модельных расчетов в качестве основной. Имеющиеся данные наблюдений за толщиной и скоростью дрейфа льда не достаточны для полноценного анализа качества модельных расчетов этих характеристик.

В настоящем анализе использованы три источника данных, основанных на наблюдениях за сплоченностью морского льда: Центра Хэдли, Великобритания — HadISST (Rayner et al., 2003), Национального центра данных о снеге и льде, США — NSIDC (Fetterer et al., 2002), а также Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США — NASA (Comiso and Nishio, 2008). Точность алгоритмов восстановления данных установленных на спутниках пассивных микроволновых (ПМВ) датчиков для оценки площади и сплоченности морского льда анализировалась в ряде работ (например, Meier and Stroeve (2008)). Различия в полученных на основе разных алгоритмов интегральных оценках площади морского льда достигают 1 миллиона км² (см., например, Kattsov et al. (2010), их рис. 2). При этом тренды и аномалии в разных ПМВ продуктах, как правило, согласуются лучше, чем абсолютные значения площади.

Совокупная картина распределения морского льда в Северном полушарии для ансамбля CMIP5 (рис. 14), построенная для базового периода 1980—1999 гг., указывает на значительный разброс между моделями. При этом есть отдельные модели, существенно завышающие или существенно занижающие площадь льда. В то же время, медианное положение границы льда (т.е. граница, в пределах которой половина моделей имеет не менее 15% льда в ячейке) удовлетворительно согласуется с границей, построенной по данным анализа, что отмечалось и для моделей CMIP3 (Randall et al., 2007).

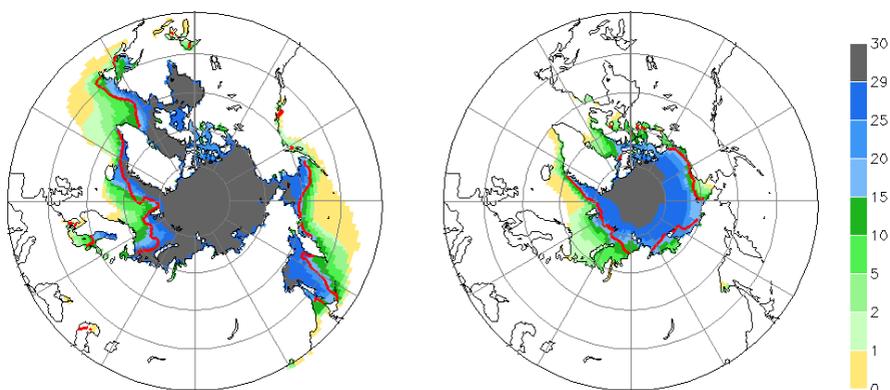


Рис. 14. Распределение морского льда в Северном полушарии для февраля (слева) и сентября (справа) в расчетах с 30 моделями CMIP5 за период 1980—1999 гг.

В каждой ячейке широтно-долготной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ различными цветами, в соответствии со шкалой внизу рисунка, представлено количество моделей, в которых для этой ячейки получен лед сплоченностью не менее 15 %. Наблюдаемые границы ледяного покрова сплоченностью не менее 15 % (красная линия) за период 1980-1999 гг. получены по данным HadISST (Rayner et al., 2003).

Несмотря на значительные различия между моделями CMIP5, рассматриваемый ансамбль *в среднем* хорошо согласуется с данными наблюдений. Средняя по ансамблю площадь льда, оцениваемая как площадь модельных ячеек, в которых концентрация льда составляет не меньше 15 %, отличается от наблюдаемых значений в Северном полушарии не более, чем на 10 % зимой и весной, практически совпадая с наблюдаемой площадью в остальные сезоны (рис. 15). Следует отметить, однако, что в ряде моделей региональные особенности распределения морского льда воспроизводятся плохо, даже если суммарная площадь близка к наблюдаемой. При этом ансамбль CMIP5 *в среднем* заметно лучше воспроизводит площадь морского льда, нежели CMIP3.

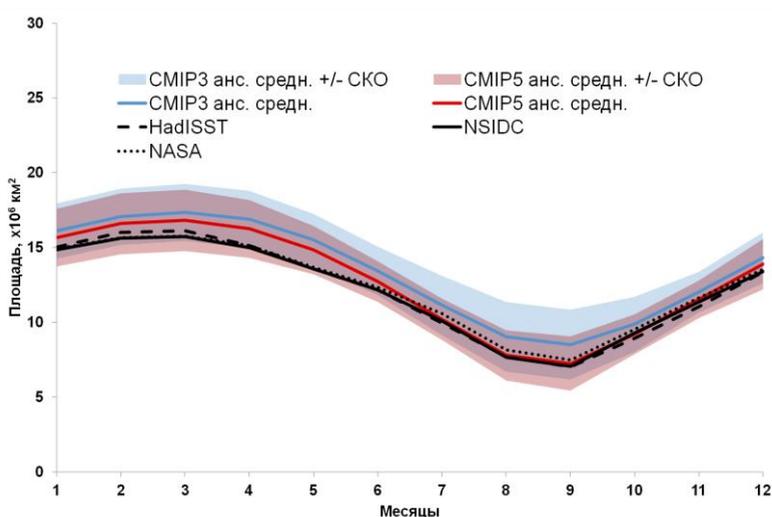


Рис. 15. Средний многолетний (за период 1980—1999 гг.) сезонный ход площади морского льда (км^2) в Северном полушарии (площадь океана, покрытого льдом сплоченностью более 15 %): полученный в ансамблях из 30 моделей CMIP5 (красная линия) и 17 моделей CMIP3 (голубая линия), а также по данным наблюдений HadISST (Rayner et al., 2003) (прерывистая черная линия); NSIDC (Fetterer et al., 2002) (сплошная черная линия) и NASA (Comiso & Nishio, 2008) (черный пунктир).

Заштрихованные области соответствуют среднеквадратичному отклонению членов ансамблей от средних по ансамблям CMIP5 (розовая) и CMIP3 (голубая).

За период спутниковых, т.е. наиболее надежных, наблюдений за ледяным покровом Мирового океана, площадь сентябрьского льда в Северном Ледовитом океане сокращается с ускорением: в 2012 г. был достигнут ее абсолютный минимум — $3,41 \times 10^6 \text{ км}^2$, а средняя скорость этого сокращения по отношению к периоду 1979—2000 г. составила 13 % за десятилетие (NSIDC).

В то же время модели CMIP3 в среднем по ансамблю показывали существенно меньшее значение. «Консервативность» моделей CMIP3

обсуждалась в ряде работ (Rampal et al., 2011; Stroeve et al., 2007; Winton, 2011; Zhang, 2010). В работе (Kattsov et al., 2010) при обсуждении возможных причин указанной «консервативности» моделей СМIP3 затрагивался вопрос о том, насколько от моделей в принципе следует ожидать воспроизведения времени быстрого сокращения площади морского льда, коль скоро соотношение внешнего воздействия (антропогенного потепления) и собственной изменчивости климатической системы в этом случае не получено. Впоследствии в работе (Notz et al., 2012) были приведены результаты анализа ансамблевых расчетов с моделью MPI-ESM, которые показывают, в частности, что собственная изменчивость климатической системы в Арктике может приводить к тому, что в отдельных реализациях для рассматривавшегося 29-летнего периода (начиная с 1979 г.) тренды площади морского льда в Арктике могут различаться не только величиной, но и знаком, несмотря на фоновое потепление климата.

В среднем ансамбль из 30 моделей СМIP5 лучше, чем СМIP3 (12 моделей), воспроизводит наблюдаемый в последние десятилетия тренд сентябрьской площади морского льда в Северном полушарии (рис. 16). Примерно, в четверти моделей СМIP5 значения сентябрьского тренда превышают по абсолютному значению наблюдаемое (Павлова и Катцов, 2013).

Модели СМIP5 в среднем по ансамблю демонстрируют улучшение, по сравнению с ансамблем СМIP3, в воспроизведении сезонного хода и тренда площади арктического морского льда. При этом проблема соотношения собственной изменчивости и изменений, связанных с внешним воздействием, в наблюдаемом резком сокращении сентябрьского льда в Арктике требует дальнейших исследований.

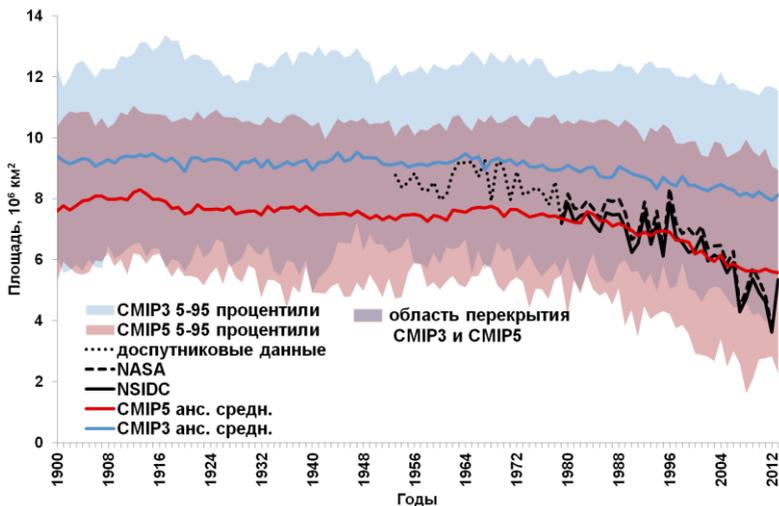


Рис. 16. Площадь морского льда в период с 1900 по 2013 гг. в Северном полушарии в сентябре по данным моделирования (CMIP5 и CMIP3) и наблюдений.

Данные моделей: среднее по ансамблю 30 моделей CMIP5 (красная линия); среднее по ансамблю 12 моделей CMIP3 (голубая линия) и области 5—95 перцентилей для обоих ансамблей (розовая и голубая штриховки, соответственно). Ретроспективные расчеты CMIP5 (т.е. до 2005 г. включительно) дополнены сценарными расчетами RCP4.5 для периода 2006—2013 гг.; расчеты CMIP3 — для периода 2000—2013 гг. — SRES A2 (см. Катцов и др., 2007). Показаны средние оценки для среднемесячных значений (не абсолютные годовые минимумы). Каждая модель в ансамбле представлена единственным расчетом. Данные наблюдений — NASA, (Comiso & Nishio, 2008); NSIDC; (Fetterer et al. 2002) — соответственно, прерывистая и сплошная черные линии). Черная пунктирная линия показывает эволюцию площади морского льда в Арктике, полученную на основе «спутниковых» данных наблюдений (Meier et al., 2008; Stroeve et al. 2012).

4. Пространственная детализация результатов моделирования глобальной климатической системы

Современные глобальные климатические модели включают описание климатообразующих процессов в самом широком диапазоне масштабов — от глобального до регионального и локального. Все эти процессы описываются моделями взаимобусловлено в рамках

замкнутой физической системы по аналогии с тем, как это происходит в реальной климатической системе Земли. Однако использование глобальных климатических моделей в оценках регионального климата и экстремальных явлений часто оказывается затруднительным по причине большой пространственной сглаженности модельного климата, занижения его естественной изменчивости и недооценки опасных погодных явлений. Проблема сглаженности обусловлена недостаточным разрешением глобальных моделей и, как следствие, ограниченным учетом влияния региональных особенностей на расчет мезомасштабной атмосферной циркуляции и характеристик приземного климата.

Использование глобальных климатических моделей высокого разрешения (с шагами сетки менее 100 км), которое необходимо для удовлетворительного описания регионального климата, затруднено чрезвычайной длительностью расчетов по таким моделям, даже с использованием современных суперкомпьютерных систем. Проблема вычислительных ресурсов усугубляется в случаях, когда ставится задача проведения массовых ансамблевых расчетов — тогда требования к производительности суперкомпьютеров возрастают многократно из-за необходимости проводить одновременно большое число экспериментов. В настоящее время расчеты климата с помощью глобальных моделей с разрешением до 20 км и переменным разрешением (с локальным сгущением сетки) проводятся лишь на сравнительно небольшие сроки (10—20 лет) в рамках атмосферных компонент моделей (Murakami et al., 2012; Fox-Rabinovitz et al., 2008) и не имеют широкого распространения.

Помимо недостаточного разрешения, имеется и другое препятствие для более широкого применения глобальных климатических моделей в исследованиях регионального климата — это единообразие подхода к описанию физических процессов одновременно во всех регионах Земли. Для реалистичного описания климатического режима конкретного региона, представляющего интерес для импактных исследований, требуется специальная адаптация используемого в глобальном масштабе обобщенного описания взаимодействия пограничного слоя атмосферы с

подстилающей поверхностью, детализация гидрологических процессов на суше и регионального термического режима.

Альтернативным источником детализированной информации о региональном климате и его изменениях служат специально разрабатываемые региональные климатические модели (РКМ), основанные на тех же физических законах и методах вычислительной математики, что и глобальные модели, но имеющие более высокое пространственное разрешение (Laprise, 2008; Rummukainen, 2010; Christensen et al., 2010). РКМ лежат в основе так называемой динамической детализации расчетов глобальных климатических моделей. Региональные модели применяются для ограниченных областей субконтинентального масштаба с использованием на боковых границах модельных областей данных об эволюции глобального климата. Если большинство современных глобальных климатических моделей имеют разрешение в диапазоне 100-300 км, то региональные климатические модели к настоящему времени в ряде случаев уже перешагнули рубеж 10 км. Наиболее распространенное сейчас разрешение РКМ — 25 км, однако часто используется и более низкое — 50 км. Разрешение 10—50 км позволяет учитывать влияние на эволюцию климата мезомасштабных факторов, начиная с реалистичной орографии, небольших внутриконтинентальных водоемов, изменчивых характеристик растительности и свойств подстилающей поверхности, и заканчивая детальным описанием прибрежных зон, экосистемы которых демонстрируют высокую чувствительность к изменениям глобального климата. Следует упомянуть, что в России протяженность прибрежных зон — самая большая в мире, а разнообразие типов подстилающей поверхности исключительно велико в силу больших размеров территории, включающей почти все типы известных науке ландшафтов. Как отмечено выше, перечисленные региональные особенности, взаимодействующие с глобальной циркуляцией атмосферы и играющие важную роль в формировании регионального баланса тепла и влаги, представлены на сетках глобальных климатических моделей со слишком большим пространственным осреднением.

Региональные модели используются в комплексе с моделями, стоящими на другой ступени модельной иерархии — это модели пограничного слоя атмосферы, теплопереноса в грунтах, динамики растительности, наводнений, пожаров, землепользования и другие модели, выходная информация которых предназначена для использования непосредственно в оценках воздействий изменений климата на региональную инфраструктуру и экосистемы и, наконец, в задачах климатического обслуживания.

В настоящее время на смену разрозненным исследованиям климата с помощью высокоразрешающих модельных систем, в рамках которых были получены детализированные оценки изменений регионального климата для нескольких регионов Северной Америки и Европы, приходят скоординированные в глобальном масштабе проекты, среди которых — крупный проект Всемирной программы исследования климата CORDEX (<http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr>). Эксперименты в рамках указанного проекта включают ансамблевые мультимодельные расчеты по РКМ для всех регионов Земли, причем не только для суши, но и для тех регионов Мирового океана, где высокое разрешение моделей необходимо для улучшения описания экстремальных режимов атмосферной циркуляции и их прогноза на будущее. Один из таких регионов — Арктика, над акваторией которой часто возникают экстремальные полярные мезоциклоны, сопровождающиеся опасными погодными явлениями (штормовой ветер и осадки исключительно высокой интенсивности). Прохождение таких циклонов несет угрозу экономической деятельности в полярных морях и наносит большой ущерб инфраструктурам в прибрежных зонах. Задача воспроизведения (и прогнозирования) таких сравнительно небольших атмосферных вихрей, какими являются полярные циклоны, ложится, в первую очередь, на климатические модели, обладающие высоким пространственным разрешением и позволяющие обеспечить лучшую согласованность числа полярных циклонов между расчетами и данными наблюдений по сравнению с глобальной моделью более низкого разрешения (рис. 17).

Для получения еще более локализованной, по сравнению с РКМ, климатической информации к результатам расчетов по глобальным

климатическим моделям и РКМ применяются специальные статистические преобразования (статистическая детализация). Такие преобразования базируются на установлении регрессионных эмпирических соотношений между оценками климатических моделей (предикторами) и данными наблюдений за климатом (предиктантами) на сети метеорологических станций (Segui et al., 2010; van Vliet et al., 2011).

К сожалению, статистическая детализация, проведенная для отдельно взятой модели климата, небольшого района и конкретного временного интервала, не может быть обобщена на другие периоды, модели и регионы. Эта особенность существенно ограничивает применимость статистических методов в задачах по «привязке» оценок будущих изменений климата по глобальным климатическим моделям к локальному масштабу. Несомненным преимуществом статистической детализации перед динамической является отсутствие необходимости использовать мощные вычислительные ресурсы.

Что касается эффективности динамической и статистической детализации расчетов глобальных климатических моделей, то она для современного климата оказывается близкой, с небольшим преимуществом одного подхода над другим в зависимости от региона. Следует отметить, что в силу линейности используемых соотношений статистическую детализацию, по-видимому, имеет смысл проводить на малые сроки в пределах небольших регионов и/или там, где изменчивость климата, обусловленная нелинейностью физических процессов и обратных связей в климатической системе, сравнительно невысокая.

Большая часть территории России включает умеренные и высокие широты, где всем, без исключения, компонентам климатической системы присущи хаотичная динамика и большая временная изменчивость. Поэтому усилия по анализу и прогнозу состояния климата России представляется целесообразным сосредоточить, в первую очередь, на комплексном использовании оценок глобальных и региональных моделей с подключением статистических методов детализации там, где их применение окажется полезным.

а)



б)

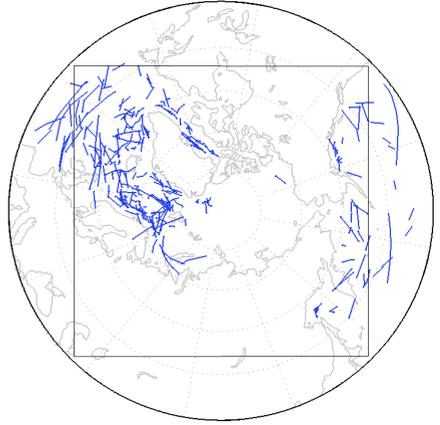


Рис. 17. Пространственное распределение траекторий полярных циклонов за десять зимних сезонов с 1981 по 1990 годы по оценкам глобальной модели атмосферы с разрешением 200 км (а) и оценкам встроеной в нее РКМ ГГО с разрешением 25 км (б) (Shkolnik et al., 2013).

По сравнению с глобальной моделью, оценки РКМ лучше согласуются с данными анализа наблюдений (Lutsenko and Lagun, 2010), согласно которым только в Северо-Европейском секторе Арктики, включающем северную часть акватории Норвежского моря, Баренцево море и часть акватории Гренландского моря, число полярных циклонов за указанный временной интервал составляет 97.

Заключение

Несмотря на значительный разброс между отдельными моделями CMIP5, удовлетворительное согласие средних по ансамблю моделей расчетов основных характеристик наблюдаемого приземного климата на территории России с данными наблюдений позволяют констатировать пригодность этого ансамбля для оценок будущих изменений климата на территории России. Сравнение моделей разных поколений указывает на постепенное улучшение воспроизведения моделями ряда характеристик приземного климата на территории России.

Отмеченные в (ОД_РФ-1, 2008) принципиальные сложности совокупной оценки качества моделей, несмотря на значительные

усилия научного сообщества, в целом, остаются актуальными. Равно как остаются открытыми и некоторые важные вопросы, касающиеся избирательной применимости (пригодности) отдельных моделей в оценках будущих изменений отдельно взятых климатических характеристик в отдельно взятых регионах. Формирование ансамблей (комплексирование) глобальных моделей для оценки будущих региональных изменений климата остается в повестке актуальных исследований.

Потребность в высоком пространственном разрешении оценок будущих изменений климата остается сильным мотивирующим фактором развития региональных климатических моделей, которые в ряде случаев демонстрируют появление «добавочного качества» по отношению к расчетам климата с помощью глобальных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О. А., Кокорев В. А. (2013). Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу // Лед и Снег. № 1 (121). С. 83—92.

Булгыгина О. Н., Разуваев В. Н., Корицунова Н. Н. (2011). Снежный покров на территории России и его пространственные и временные изменения за период 1966—2010 гг. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 24. С. 211—227.

Генихович Е. Л., Павлова Т. В., Катцов В. М. (2010). О комплексировании ансамбля климатических моделей // Труды ГГО. Вып. 561. С. 28—46.

Катцов В. М. (2010). Предсказание климата: достижения, проблемы и перспективы // Метеорология и гидрология. №1. С. 18—22.

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

Катцов В. М., Мелешко В. П. (2008). Современные приоритеты фундаментальных исследований климата // Труды ГГО. Вып. 557. С. 3—19.

Катцов В. М., Мелешко В. П., Говоркова В. А., Надеждина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М. (2008). Модели, предназначенные для оценки будущих изменений климата // Первый Оценочный доклад Росгидромета «Изменения климата и их

последствия на территории Российской Федерации» / Под ред. А. И. Бедрицкого и др. — Т. 1. М.: Росгидромет.

Кутаев Л. М., Титкова Т. Б. (2010). Оценка снеготопливности по данным спутниковой информации // Криосфера Земли. Т. XIV. № 1. С. 76—80.

Мелешко В. П., Говоркова В. А. (2013). Успешность расчета современного регионального климата с помощью ансамбля моделей СМIP3 и СМIP5 // Труды ГГО. Вып. 568. С. 26—50.

Носенко Г. А., Долгих Н. А., Носенко О. А. (2005). О возможности практической реализации существующих алгоритмов восстановления характеристик снежного покрова по данным микроволновых съемок из космоса для мониторинга водных ресурсов / В сб.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Т. II. С. 150—156.

Носенко О. А., Долгих Н. А., Носенко Г. А. (2006). Снежный покров центра Европейской части России по данным AMSR-E и SSM/I / В сб.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Вып. 3. Т. I. С. 296—301.

ОД_РФ-1 (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. А. И. Бедрицкого и др. — М.: Росгидромет.

Павлова Т. В., Катцов В. М. (2013). Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей СМIP5 // Труды ГГО. Вып. 568. С. 7—25.

Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П. В., Говоркова В. А. (2013). Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях СМIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений // Труды ГГО. Вып. 569. С. 38—61.

Павлова Т. В., Катцов В. М., Надежина Е. Д., Спорышев П. В., Говоркова В. А. (2007). Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // Криосфера Земли. Т. XI. № 2. С. 3—13.

Спорышев П. В., В. А. Говоркова. (2013). Температурные изменения на территории России по данным наблюдений и результатам модельных расчетов с раздельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий // Труды ГГО, Вып. 568. С. 51—79.

Школьник И. М., Мелешко В. П., Ефимов С. В., Стафеева Е. Н. (2012). Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология. № 2. С. 5—23.

Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A. and Melnikov E. S. (1997). International Permafrost Association Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. — U. S. Geological Survey Circum-Pacific Map Series. Map CP-45. Scale 1:10 000 000.

Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A. and Melnikov E. S. (1998). Digital circum-arctic map of permafrost and groundice conditions. In Circumpolar Active-Layer Permafrost System (CAPS) // CD-ROM. Version 1.0. National Snow and Ice Data Center. University of Colorado at Boulder.

Brown R. D. and Robinson D. A. (2011). Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922—2010 including an assessment of uncertainty // *The Cryosphere*. № 5. P. 219—229. Doi: 10.5194/tc-5-219-2011.

Christensen J. H., Kjellstrom E., Giorgi F., Lenderink G., Rummukainen M. (2010). Weight assignment in regional climate models // *Climate Research*. P. 179—194. Doi: 10.3354/cr00916.

Comiso J. C., Nishio F. (2008). Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I and SMMR data // *J. Geophys. Res.* V. 113. C02S07.

Dai A. and Trenberth K. E. (2002). Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations // *J. Hydrometeorology*. V. 3. № 6. P. 660—687.

Dee D. P. and Coauthors (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* V. 137. P. 553—597. Doi: 10.1002/qj.828.

Dietz A. J., Kuenzer C., Gessner U. and Dech S. (2012). Remote sensing of snow — a review of available methods // *International Journal of Remote Sensing*. V. 33. № 13. P. 4094—4134.

Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M. (2002). *Sea Ice Index*. — Boulder, Colorado, USA. National Snow and Ice data Center.

Fox-Rabinovitz M., Cote J., Dugas B., Deque M., McGregor J. L. and Belochitski A. (2008). Stretched-grid Model Intercomparison Project: decadal regional climate simulations with enhanced variable and uniform-resolution GCMs // *Meteorology and Atmospheric Physics*. P. 159—177. Doi: 10.1007/s00703-008-0301-z.

Frolov A. V. and Kattsov V. M. (2009). Predicting Arctic climate: knowledge gaps and uncertainties in UNESCO // *Climate change and Arctic sustainable development: scientific, social, cultural and educational challenges*. P. 302—312

Hagemann S., Duemenil L. (1998). A parameterization of the lateral waterflow for the global scale // *Climate Dyn.* V. 14. P. 17—31.

Huffman G. J., Adler R. F., Morrissey M. M., Bolvin D. T., Curtis S., Joyce R., McGavock B., Susskind J. (2001). Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations // *J. Hydrometeor.* V. 2. P. 36—50.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 996 p.

IPCC (2010). Meeting Report of the IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections .NCAR, Boulder, CO, USA, 25—27 January 2010. — IPCC WGI TSU. University of Bern. Switzerland. 117 p. (https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/supportingmaterial/IPCC_EM_MultiModelEvaluation_MeetingReport.pdf).

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.). — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 1535 p.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W. I., Woollen J. et al. (2002). NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R–2) // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* V. 83. № 11. P. 1631—1643.

Kattsov V., Ryabinin V., Overland J., Serreze M., Visbeck M., Walsh J., Meier W. and Zhang X. (2010). Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science // *Journal of Glaciology*. V. 56. № 200. P. 1115—1121.

Kharin V. V., Zwiers F. W. and Zhang X. (2005). Intercomparison of near surface temperature and precipitation extremes in AMIP-2 simulations, reanalyses and observations // *Journal of Climate*. V. 18. P. 5201—5223.

Knutti R., Furrer R., Tebaldi C., Cermak J. and Meehl G. (2010). Challenges in combining projections from multiple climate models // *J. Clim.* V. 23. P. 2739—2758.

Koven C. D., Riley W. J., Stern A. (2013). Analysis of Permafrost Thermal Dynamics and Response to Climate Change in the CMIP5 Earth System Models // *J. Climate*. V. 26. P. 1877—1900. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00228.1>.

Laprise R. (2008). Regional climate modeling // *Journal of Computational Physics*. V. 227 (7). P. 3641—3666. Doi: 10.1016/j.jcp.2006.10.024|10.1016/j.jcp.2006.10.024.

Legates D. R. and Willmott C. L. (1990). Mean seasonal and spatial variability in gauge corrected global precipitation // *Int. J. Climatol.* V. 10. P. 111—133.

Lutsenko E., Lagun V. (2010). Polar meso-scale cyclonic eddies in the Arctic atmosphere. — *Handbook. Arctic and Antarctic Research Institute*. 97 p. In Russian available at http://www.aari.ru/projects/mesocyclone/mez_ant.html.

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

Meehl G. A., Covey C., Taylor K. E., Delworth T., Stouffer R. J., Latif M., McAvaney B., Mitchell J. F. B. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 88. P. 1383—1394.

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

Murakami H., Wang Y. Q., Yoshimura H., Mizuta R., Sugi M., Shindo E., Kitoh A. (2012). Future Changes in Tropical Cyclone Activity Projected by the New High-Resolution MRI-AGCM // *Journal of Climate*. V. 25 (9). P. 3237—3260. Doi: 10.1175/JCLI-D-11-00415.1.

Murphy J., Kattsov V., Keenlyside N., Kimoto M., Meehl J., Mehta V., Pohlmann H., Scaife A., Smith D. (2009). Towards Prediction of Decadal Climate Variability and Change. White paper for the World Climate Conference 3, Geneva, 31 August – 4 September 2009. *Procedia Environmental Sciences* 1 (2010) pp. 287–304, doi:10.1016/j.proenv.2010.09.018/

Nelson F. and Outcalt S. (1987). A computational method for prediction and regionalization of permafrost // *Arct. Alp. Res.* V. 19. P. 279—288. Doi: 10.2307/1551363.

New M., Hulme M., Jones P. (1999). Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961—90 mean monthly terrestrial climatology // *Journal of Climate*. V. 12. P. 829—856.

New M., Hulme M., Jones P. (2000). Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901—96 monthly grids of terrestrial surface temperature // *Journal of Climate*. V. 13. P. 2217—2238.

Notz D., Haumann F. A., Haak H., Jungclaus J. H. and Marotzke J. (2012). Sea-ice evolution in the Arctic as modeled by MPI-ESM // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. Doi: 10.1002/jame.20016.

Overland, J. E., Wang M., Bond N. A., Walsh J.E., Kattsov V. M., Chapman W. L. (2011). Considerations in the Selection of Global Climate Models for Regional Climate Projections: The Arctic as a Case Study // *Journal of Climate*. V. 24, P. 1583–1597. doi:10.1175/2010JCLI3462.1.

Rampal P., Weiss J., Dubois C. and Campin J. M. (2011). IPCC climate models do not capture Arctic sea ice drift acceleration: consequences in terms of projected sea ice thinning and decline // *Journal of Geophysical Research-Oceans*. V. 116. Doi: 10.1029/2011jc007110.

Randall D. A., Wood R. A., Bony S., Colman R., Fichetef T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R. J., Sumi A. and Taylor K. E. (2007). Climate Models and Their Evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B.

Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). — Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, USA. P. 589—662.

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

Rienecker M. M. and Coauthors (2011). MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // *J. Climate*. V. 24. P. 3624—3648.

Robinson D. A. and Frei A. (2000). Seasonal variability of northern hemisphere snow extent using visible satellite data // *Professional Geographer*. V. 51. P. 307—314.

Rummukainen M. (2010). State-of-the-art with regional climate models // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. V. 1 (1). P. 82—96. Doi: 10.1002/wcc.8.

Saha S. and Coauthors (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 91. P. 1015—1057.

Segui P. Q., Ribes A., Martin E., Habets F. and Boe J. (2010). Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins // *Journal of Hydrology*. V. 383 (1—2). P. 111—124. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.050.

Serreze M. C., Barrett A., Lo F. (2005). Northern high latitude precipitation as depicted by atmospheric reanalyses and satellite retrievals // *Monthly Weather Review*. V. 133. P. 3407—3430.

Shkolnik I. M. and Efimov S. V. (2013). Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: added value and uncertainties // *Environ. Res. Lett.* V. 8. 045007. Doi: 10.1088/1748-9326/8/4/045007.

Slater A. G., Lawrence D. M. (2013). Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models // *J. Climate*. V. 26. P. 5608—5623. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00341.1>.

Stroeve J., Holland M., Meier W., Scambos T. and Serreze M. (2007). Arctic sea ice decline: faster than forecast // *Geophysical Research Letters*. V. 34 (9). Doi: 10.1029/2007GL029703.

Stroeve J. C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W. N. (2012). Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // *Geophysical Research Letters*. V. 39. L16502. Doi: 10.1029/2012GL052676.

Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 93. P. 485—498. Doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Uppala S. M., Kållberg P. W. and Coauthors (2005). The ERA-40 re-analysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* V. 131. P. 2961—3012. Doi: 10.1256/qj.04.176.

Van Vliet M., Blenkinsop S., Burton A., Harpham C., Broers H. and Fowler H. (2011). A multi-model ensemble of downscaled spatial climate change scenarios for the Dommel catchment Western Europe // *Climatic Change*. 1—29. Doi: 10.1007/s10584-011-0131-8.

Winton M. (2011). Do Climate Models Underestimate the Sensitivity of Northern Hemisphere Sea Ice Cover? // *Journal of Climate*. V. 24 (15). P. 3924—3934.

Xie P., Arkin P. A. (1998). Global monthly precipitation estimates from satellite-observed outgoing longwave radiation // *Journal of Climate*. V. 11. P. 137—164.

Xie P., Arkin P. A. (1997). Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates and Numerical Model Outputs // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 78. P. 2539—2558.

Zhang T., Barry R. G., Knowles K., Heginbottom J. A. and Brown J. L. (1999). Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere // *Polar Geography*. V. 23. № 2. P. 132—154.

Zhang X. (2010). Sensitivity of arctic summer sea ice coverage to global warming forcing: towards reducing uncertainty in arctic climate change projections // *Tellus Series a Dynamic Meteorology and Oceanography*. V. 62 (3). P. 220—227. Doi: 10.1111/j.1600—0870.2010.00441.x.

Приложение

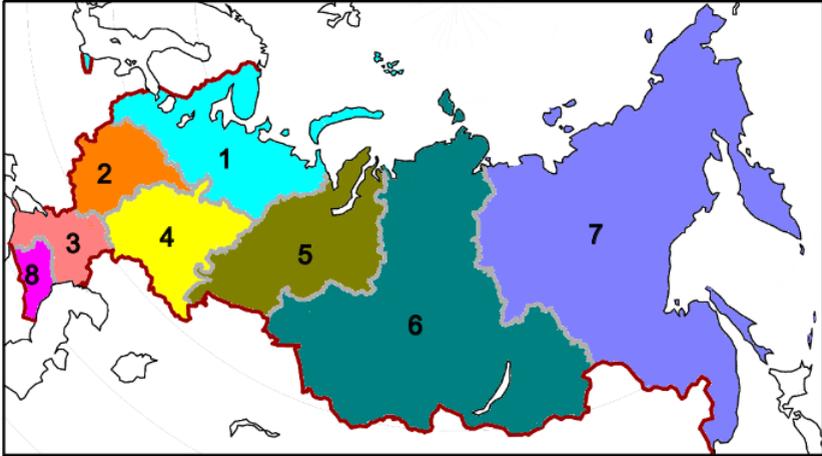


Рис. 1.П. Федеральные округа РФ, для которых в настоящей статье получены оценки современного климата и его будущих изменений: 1. Северо-Западный; 2. Центральный; 3. Южный; 4. Приволжский; 5. Уральский; 6. Сибирский; 7. Дальневосточный; 8. Северо-Кавказский.

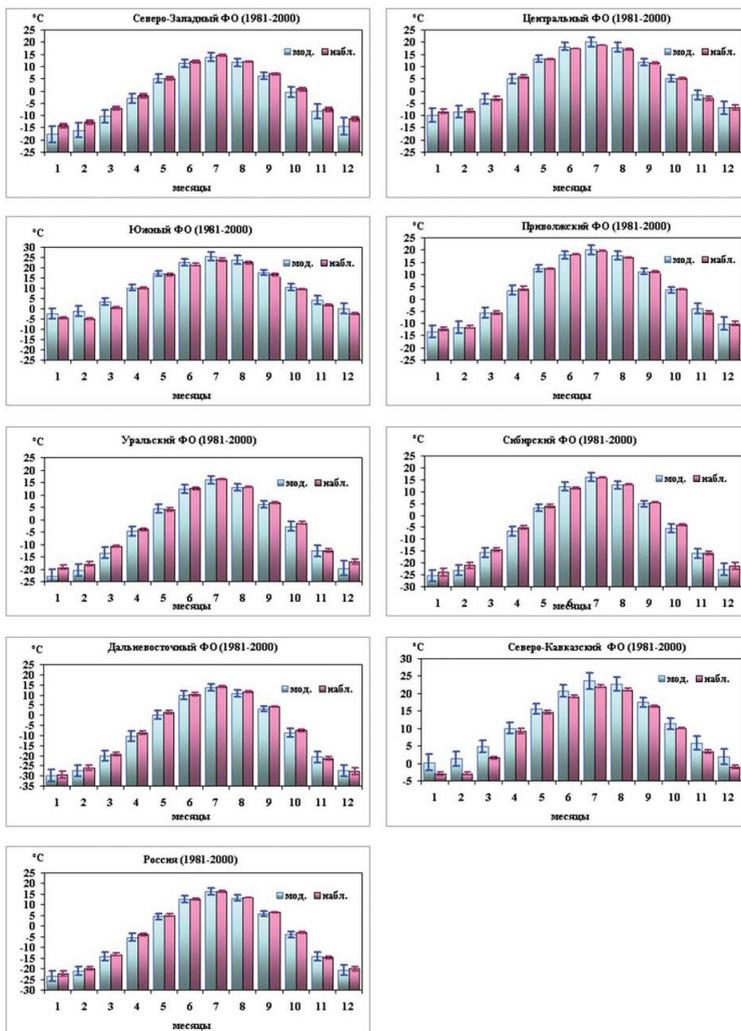


Рис. 2.П. Сезонные изменения температуры приземного воздуха (1981–2000 гг.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели СМIP5 (“мод.”) и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”). В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm \sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов. Расчеты представлены для федеральных округов (рис. 1.П) и территории РФ в целом.

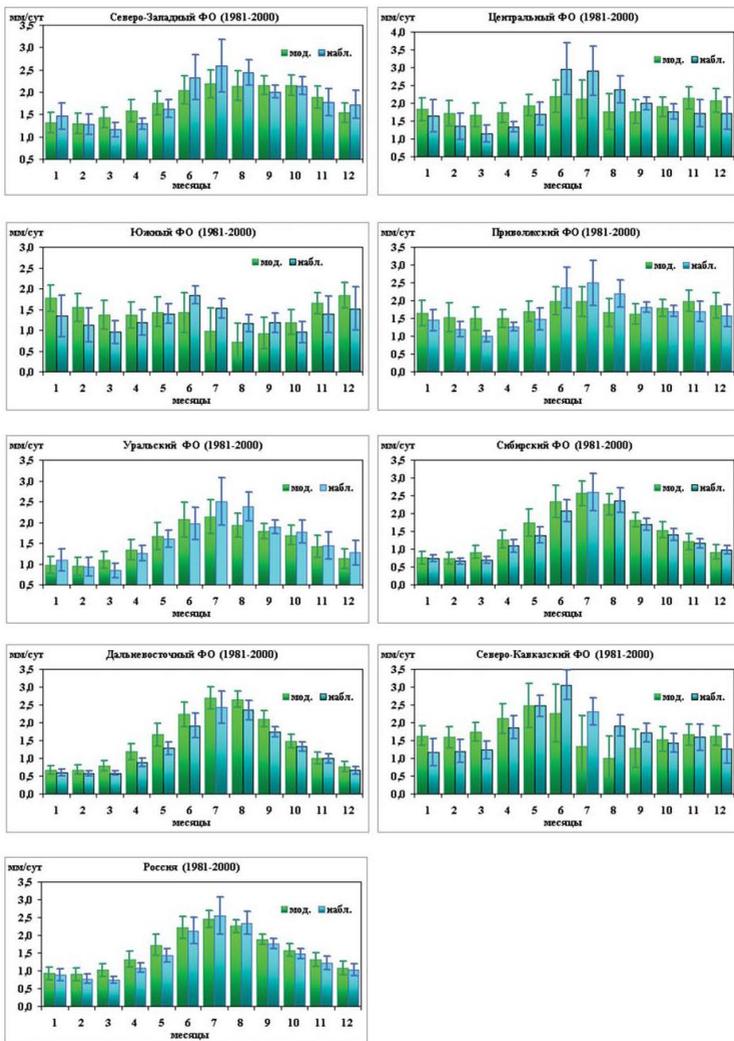


Рис. 3.П. Сезонные изменения осадков (1981–2000 гг.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели CMIP5 (“мод.”) и полученные по усредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”).

В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm \sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов.

Расчеты представлены для федеральных округов (рис. 1.П) и территории РФ в целом.

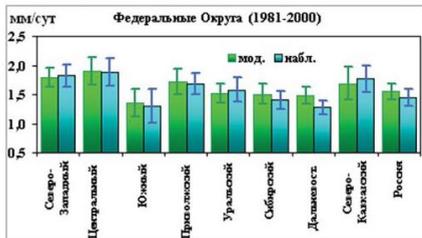
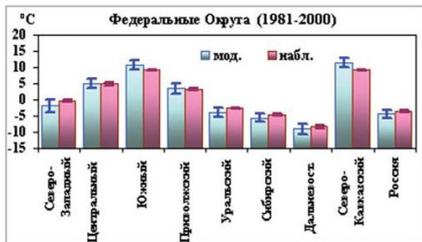


Рис. 4.П. Среднегодовые значения температуры приземного воздуха (а) и осадков (б) (1981–2000), рассчитанные по ансамблю из 31 модели СМIP5 (“мод.”) и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”).

В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm \sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов. Расчеты представлены для федеральных округов (рис. 1.П) и территории РФ в целом.

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В XXI ВЕКЕ

*И. М. Школьник, В. П. Мелешко, И. Л. Кароль, А. А. Киселев,
Е. Д. Надежина, В. А. Говоркова, Т. В. Павлова*

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

Поступила в редакцию 8.09.2014
Поступила после доработки 22.10.2014

1. Сценарии антропогенных воздействий на глобальную климатическую систему

Особенности сценариев предыдущего поколения SRES (Special Report on Emissions Scenarios — Специальный Доклад о Сценариях Выбросов) кратко описаны в главе 7.1 первого Оценочного доклада Росгидромета (ОД_РФ-1, 2008). Сценарии SRES широко использовались в модельных исследованиях последнего десятилетия. Наибольшее внимание, естественно, привлекали сценарии с экстремальными — наибольшим (A2) и наименьшим (B1) — глобальными содержаниями CO₂ в нижней атмосфере в XXI веке (см. рис. 7.1 в ОД_РФ-1).

При подготовке Пятого отчета МГЭИК были учтены недостатки «идеологии» сценариев SRES. Такие недостатки проистекали из нескольких вариантов ожидаемых путей социально-экономического развития как в глобальном, так и в региональном масштабах. Затем характеристики каждого варианта развития преобразовывались в предполагаемые изменения непосредственно эмиссий климатически активных субстанций, либо их концентраций в нижней атмосфере и на подстилающей поверхности. Эти эмиссии или концентрации и их эволюция должны служить основой для используемых в прогнозах

изменений климата в XXI веке сценариев возможной эволюции климатических характеристик в глобальном и региональном масштабах. При этом указывается, что эти сценарии нацелены на антропогенную часть климатообразующих факторов. Климатообразующие факторы, связанные с «естественной» изменчивостью климатических характеристик, сценариями SRES не охватываются. Однако в ряде публикаций (см., напр., Кароль, 1988) отмечается, что с течением времени доля и влияние антропогенных климатообразующих факторов на изменения климата будут возрастать, и потому ожидаемый эффект все более будет определяться именно этими сценариями. Достаточно полное и подробное исследование и сравнение старых (SRES) и новых (RCP) сценариев представлено в работах (Rogelj et al., 2012; Meinshausen et al., 2011).

В практике использования сценариев SRES были случаи пересечения «кривых» эволюции климатообразующих факторов в некоторые моменты времени, когда уровни содержания климатообразующих факторов от более или менее «интенсивных» в среднем сценариев менялись местами в величинах их влияния на климатическую систему из-за принятых в сценариях разных особенностей социально-экономического развития. Это затрудняло «ранжирование» сценариев по степени их эмиссий парниковых газов в атмосферу и таким образом — по степени их воздействия на климатическую систему.

Для модельных прогнозов изменений климата от антропогенных факторов основное значение имеют именно прогнозы эволюции содержания парниковых газов, а порождающие ее социально-экономические условия не входят непосредственно в прогностический механизм. Поэтому именно физические характеристики климатообразующих факторов любого сценария должны быть определяющими. Такой характеристикой в последние десятилетия служит индекс радиационного воздействия (РВ, в Отчетах МГЭИК используется также понятие «метрика»), который достаточно полно отражает степень внешнего (антропогенного) воздействия на климатическую систему и широко используется в теории и практике исследований. И при использовании сценариев SRES их общие

эффекты оценивались часто по величине их РВ. Поэтому в новой системе сценариев, используемой при составлении Пятого отчета МГЭИК, за основную исходную характеристику взяты величины эволюции ожидаемых концентраций парниковых газов и их РВ к концу XXI века. Индекс сценария обозначается величиной глобального антропогенного РВ, достигаемого в 2100 г., а именно 2,6; 4,5; 6,0 и 8,5 Вт/м² — RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, соответственно. Здесь: RCP — Representative Concentration Pathway (Репрезентативные траектории [изменения] концентраций [примесей]). В квадратных скобках упомянуты части названия, подразумеваемые, но не указанные в нем явно. Отсюда видно, что RCP8.5 — сценарий, соответствующий максимальным антропогенным выбросам, а RCP2.6 — минимальным. В последнем сценарии предполагается, что максимум РВ, равный 3,0 Вт/м², будет достигнут во второй половине XXI века, но затем РВ уменьшится до 2,6 Вт/м² к 2100 г. (van Vuuren et al., 2011).

Принципиальное отличие сценариев RCP от SRES состоит в их исходных положениях: не от недостаточно четких качественных вариантов социально-экономического развития, а от конкретных ожидаемых изменений климатообразующих факторов, в том числе концентраций парниковых газов и газов, образующих радиационно активные атмосферные аэрозоли. От этих основ развитие других составляющих сценариев идет как «вниз» по логической лестнице — к величинам эмиссий газов, изменений радиационных характеристик подстилающей поверхности и т.п., так и «вверх» — к социально-экономическим условиям существования общества и природы, с чего начинались предыдущие сценарии и что ранее не использовалось в климатических прогнозах. При этом в отличие от сценариев предыдущего поколения, устанавливаются и четко прослеживаются градации прогнозируемых климатических величин для разных сценариев.

В отличие от линейного «одноканального» пути развития сценария в прошлом, ныне предлагается его двухканальное построение: от исходных эволюций RCP (радиационного воздействия) по годам и с возможным учетом пространственной неоднородности движение идет

по «климатическому» каналу построения ожидаемых изменений климатических характеристик в глобальном и региональном масштабах. По второму «социально-экономическому» каналу исследование развивается как бы «вверх» к определению социально-экономических условий развития общества (природы), которые могут создать принятые в сценариях RCP характеристики (эволюции воздействий и других исходных факторов) ко времени «действия» этих факторов в XXI веке (см. табл. 1). При этом в имеющихся публикациях нет указаний, каким образом проводить это движение «вверх по потоку» и строить ожидаемые изменения социально-экономических условий, способные привести к имеющимся сценариям RCP.

Таблица 1

Особенности составления сценариев антропогенных воздействий на климатическую систему

а) Последовательный процесс	б) Параллельный процесс	
1. Сценарии социально-экономических процессов и эмиссии	1. Характерные пути изменения концентраций (RCP) и уровни радиационного воздействия	
2. Радиационное воздействие	2а. Модельные прогнозы изменений атмосферных циклов и климата	2б. Социально-экономические сценарии и прогнозы эмиссий
3. Климатические модели. Проекция изменений климата	3. Воздействия, адаптация и уязвимость, а также анализ смягчения последствий	
4. Воздействия, уязвимость, адаптация к последствиям		

Для климатических моделей необходима более конкретная и детальная информация об эволюции климатообразующих факторов, чем ее в состоянии представить сценарии SRES, которые к тому же не могли отражать возможные меры по сокращениям тех или иных

атмосферных эмиссий или изменений, происходящих на подстилающей поверхности. Новые сценарии должны включать проекции современного состояния и ожидаемых изменений новых элементов климатических моделей, входящих в углеродный цикл: наземную и океаническую растительность, динамику морского и материкового льда, эффекты различных аэрозолей (Hibbard et al., 2011). В соответствии с требованиями моделей интегрированной оценки (Integrated Assessment Models), новые сценарии должны учитывать, наряду с природными, социальные и экономические факторы с привлечением соответствующей исторической информации. Однако отмечается, что такая информация не должна включаться в сценарии RCP. Ниже приведены несколько дополнительных критериев, подлежащих учету при разработке сценариев RCP:

1. наличие достаточно подробной и достоверной исходной информации о характеристиках атмосферы и подстилающей поверхности;

2. четыре исходных сценария без выделения среди них «оптимального», но лишь «крайних» и промежуточных. При этом характеристики сценариев должны статистически надежно отличаться друг от друга;

3. хорошо обоснованный сценарий должен успешно обеспечивать климатические прогнозы, получаемые с помощью различных моделей;

4. используемые сценарии должны учитывать возможность включения разных климатообразующих факторов (на подробной пространственной сетке и для длительного исторического периода);

5. должна быть предусмотрена возможность адаптации сценариев для нужд климатического моделирования.

Важное развитие сценариев РВ в RCP — их экстраполяция на период после 2100 г., чего не было у предыдущих групп сценариев. Такая экстраполяция представлена на рис. 1 в виде графиков эволюции РВ и эмиссии CO₂ в системе ECP (Extended Concentration Pathway) до 2300 г. При этом экстраполяция РВ для RCP6.0

проводится в двух вариантах: помимо сохранения уровня РВ $6,0 \text{ Вт/м}^2$ в 2100 г., период после этого года еще рассмотрен сценарий ECP-SCP (Supplementary Concentration Pathway), в нем уровни РВ снижаются от РВ, равного $6,0 \text{ Вт/м}^2$ в 2100 г., до $4,5 \text{ Вт/м}^2$ к 2250 г. На рис. 1 представлены также и принятые уровни эмиссий CO_2 в период с 1900 до 2300 гг. для всех рассматриваемых сценариев. На рис. 2 и 3 представлены графики изменения со временем в XXI веке как самой величины РВ, так и соответствующих концентраций основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O для рассматриваемых здесь сценариев RCP, взятые из (van Vuuren et al., 2011)).

В табл. 2 указаны качественные особенности изменений РВ и соответствующие им величины концентрации CO_2 для каждого из сценариев. При этом в табл. 2 для каждого из сценариев указана величина ожидаемого максимального содержания суммы парниковых газов в эквиваленте CO_2 , т.е. максимальная концентрация каждого газа умножалась на величину его потенциала глобального потепления (ОД1, 2008; IPCC, 2007).

Таблица 2

**Величины максимума концентраций парниковых газов
в сценариях RCP**

Сценарий	Величина CO_2 экв.	Год ее достижения	Авторы
RCP8.5	1370 ppmv	2100 г.	IIASA
RCP6.0	850 ppmv	После 2100 г.	NIES (Япония)
RCP4.5	650 ppmv	После 2100 г.	GCAM (США)
RCP2.6*	490 ppmv	2100 г.	IMAGE (Нидерланды)

Примечание.

* Максимум РВ, равный $3,0 \text{ Вт/м}^2$, достигается во второй половине XXI века, затем значение РВ снижается к 2100 г. до $2,6 \text{ Вт/м}^2$.

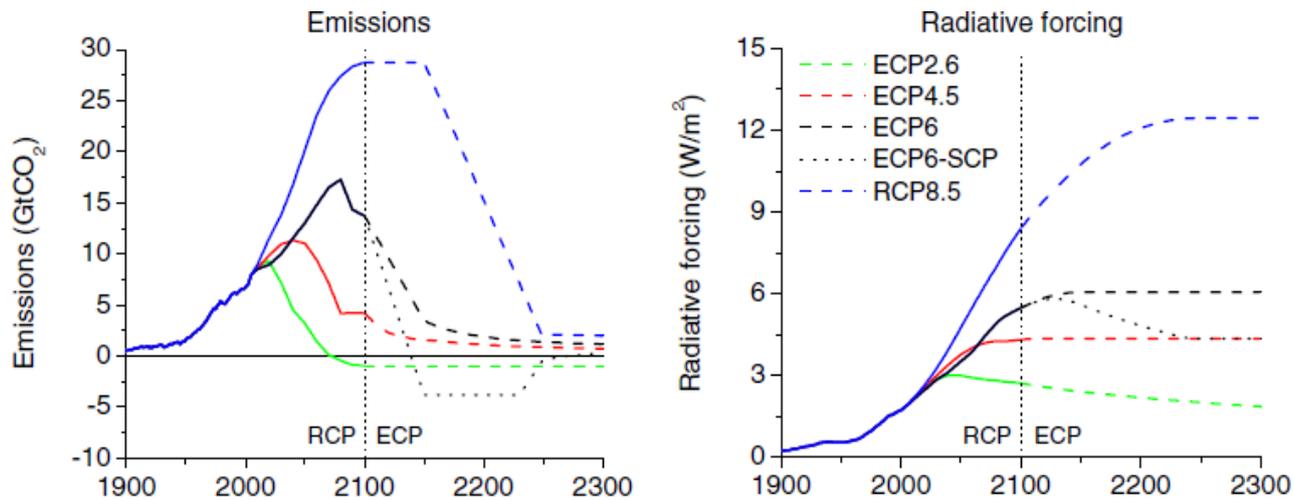


Рис. 1. Экстраполяция эмиссии CO₂ и радиационного воздействия на период после 2100 г. по сценариям RCP. Сценарий RCP6.0 to 4.5 показывает альтернативу эволюции РВ и эмиссии CO₂ (см. текст).

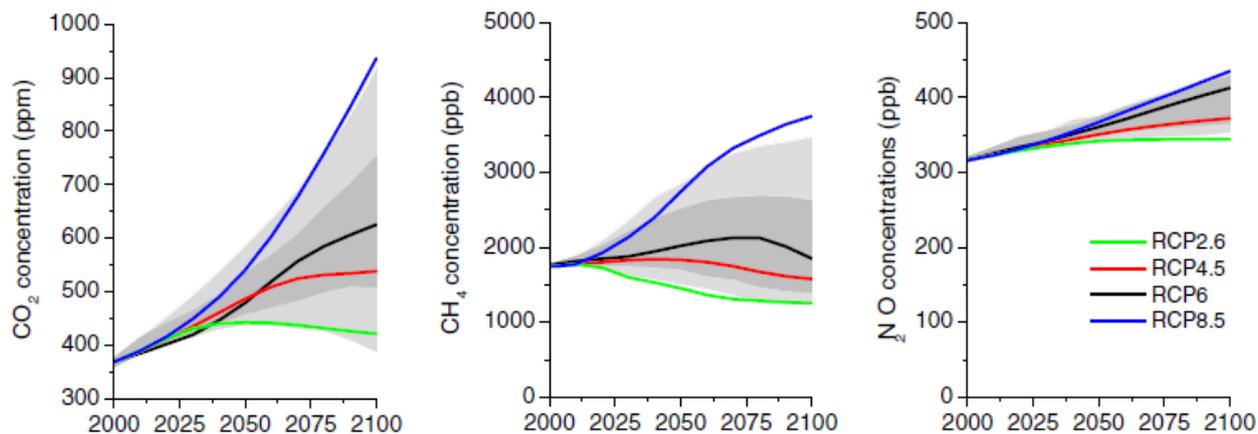


Рис. 2. Графики изменений со временем в системе RCP величины радиационного воздействия (слева); величины эмиссии CO₂ (в центре); оценки вклада разных парниковых газов в РВ в 2100 г. (справа). Темно- и светлосерый фон отражает 98 % и 99 % процентиля на левом графике и на остальных следующих графиках.

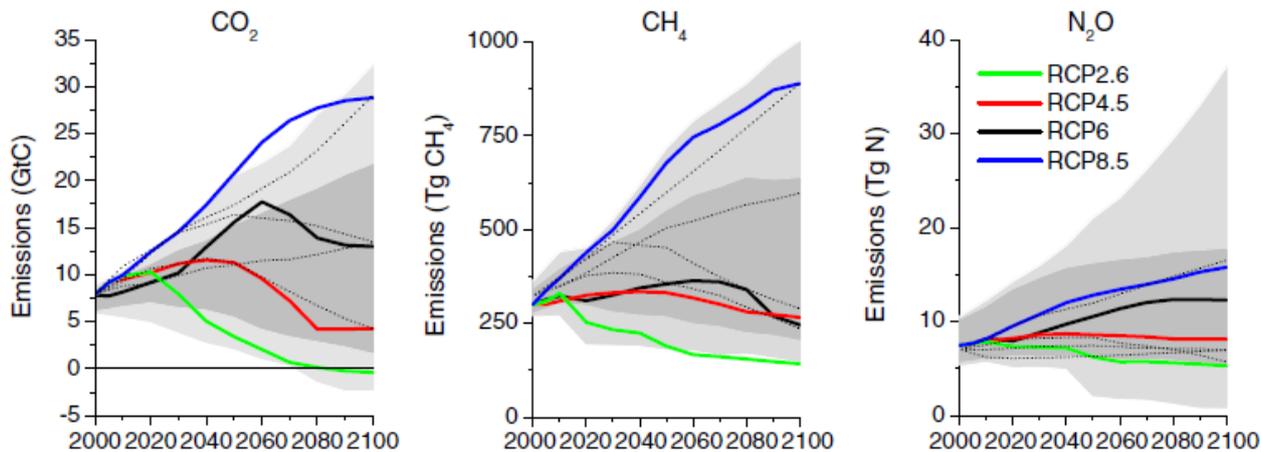


Рис. 3. Графики изменений эмиссии парниковых газов в XXI веке в сценариях RCP.
Точечные линии отражают сценарии эмиссии SRES.

Как указано в (van Vuuren et al., 2011), в сценариях учитывались антропогенные изменения радиационных характеристик подстилающей поверхности, глобальные эмиссии парниковых газов и других рассматриваемых климатообразующих факторов, распределенных по площади поверхности Земли на сетке $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ для нескольких разных регионов на подстилающей поверхности и с учетом сезонных изменений характеристик растительности суши. Эти характеристики приняты нестационарными для разных сценариев. Также раздельно рассмотрены и приняты разными для разных сценариев скорости энергопотребления и расходов ископаемого топлива по годам XXI века. Дополнительно в (van Vuuren et al., 2011) указаны оценки эмиссий SO_2 и NO_x как газов атмосферы, частично антропогенных и участвующих в фотохимических процессах в атмосфере, к тому же влияющих на содержание там озона и метана. Отмечается, что для всех сценариев величины эмиссий этих газов и их продуктов — аэрозолей снижаются в течение XXI века в результате мер по совершенствованию очистки воздуха в выбросах промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Как известно, снижение аэрозольного загрязнения воздуха в промышленно развитых регионах Европы и Северной Америки уже привело к росту прозрачности атмосферы над ними (Wild, 2009). Общие характеристики сценариев RCP просуммированы в таблице 3 (по материалам из (van Vuuren et al., 2011)).

В большинстве модельных исследований изменения глобального и регионального климата в настоящее время используются сценарии RCP. Процессы подготовки и выходные данные новых сценариев документированы более подробно и тщательно, чем в предыдущих группах сценариев (Hibbard et al., 2011). Сценарии группы RCP согласованы с историческими сценариями, использовавшимися в исследованиях с помощью моделей интегрированной оценки.

К недостаткам «линейки» сценариев RCP следует отнести некоторую несогласованность подходов при их разработке, поскольку каждый из сценариев готовился разными группами исследователей при отсутствии удовлетворительной координации между ними (см. табл. 3). Среди существующих сценариев

национальные группы чаще выбирают для работы те из них, которые подготовлены в той же стране. Например, в США отдают предпочтение сценариям RCP3.0 (RCP2.6) и RCP4.5, а не сценарию RCP6.0.

Таблица 3

Качественные характеристики сценариев RCP (van Vuuren et al., 2011)

Сценарий	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Эмиссии парниковых газов	Очень низкие	Низкие выбросы, среднее смягчение	Средние выбросы, значительное смягчение	Интенсивная эмиссия
С/х области (использование)	Среднее для пашен и пастбищ	Низкое для пашен и пастбищ	Среднее для пашен и очень низкое для пастбищ	Среднее для пашен и пастбищ
Загрязнение воздуха	Средне-низкое	Среднее	Среднее	Средне-высокое

2. Ожидаемые в XXI веке глобальные изменения климата

Большинство расчетов по моделям климата в рамках СМIP5 проводилось по описанным в предыдущем разделе заданным уровням концентраций CO₂ до конца 2100 г. — это 421 ppmv¹ (сценарий RCP2.6), 538 ppmv (RCP4.5), 670 ppmv (RCP6.0) и 936 ppmv (RCP8.5). С учетом концентраций метана и закиси азота соответствующие суммарные эквивалентные концентрации CO₂ составляют 475 ppmv, 630 ppmv, 800 ppmv и 1313 ppmv. По моделям СМIP5 были выполнены дополнительные расчеты с уровнями выбросов CO₂, заданными в соответствии с результатами, полученными по моделям интегрированной оценки. Кроме того, по всем сценариям проводились расчеты с использованием новых данных по химическому составу

¹ 1 ppmv = одна молекула углекислого газа на миллион молекул воздуха

атмосферы, моделей СМIP5, включающих химические блоки, а также заданных значений выбросов химически активных газов (метан, оксиды азота, СО, неметановые летучие органические соединения). Эти расчеты позволили оценить неопределенности, обусловленные обратными связями в глобальном углеродном цикле и химическими взаимодействиями в атмосфере.

Прогнозы на ближайшие несколько десятилетий создают глобальную картину изменений климата, аналогичную той, которая ожидается на конец XXI века, но с меньшими абсолютными значениями изменений. Внутренняя изменчивость климата по-прежнему является главным фактором, осложняющим получение статистически значимых изменений климата на региональном уровне в краткосрочной перспективе. Однако с учетом сценариев RCP к середине XXI века значения ожидаемых изменений климата будут зависеть от выбора сценария эмиссии в большей степени, чем когда в прогнозах использовались сценарии семейства SRES. Приведенное ниже описание возможных в будущем изменений в глобальной климатической системе опирается на оценки, представленные в выпущенном Техническом резюме и Резюме для лиц, принимающих решения, Пятого отчета МГЭИК (www.ipcc.ch/report/ar5/wg1). В настоящем разделе основное внимание уделяется изменениям температурного и гидрологического режима суши и изменениям в Мировом океане. Что касается криосферы, то ее большая часть сосредоточена на российской территории и в Арктике; изменения криосферы в указанных регионах в значительной степени характеризуют те изменения, которые могут произойти в глобальной криосфере под влиянием глобального потепления. Поэтому оценки возможных в будущем изменений снежного покрова, характеристик вечной мерзлоты и морского льда рассматриваются в разделе 3, который посвящен анализу изменений климата в регионах России и на прилегающих к ним территориях.

Температурный режим. Оценки изменения климата в XXI веке показывают, что средняя глобальная температура будет возрастать при всех сценариях радиационного воздействия. К концу столетия по отношению к периоду 1986—2005 гг. наиболее вероятным будет

изменение температуры воздуха в три раза большее по сравнению со сценарием RCP2.6, допускающим стабилизацию потепления во второй половине столетия.

Наиболее вероятная оценка роста глобальной температуры в 2085—2100 гг. по отношению к 1986—2005 гг. в диапазоне 5—95 % моделей CMIP5 при различных концентрациях CO₂ будет составлять: 0,2—1,8 °C (RCP2.6), 1,0—2,6 °C (RCP4.5), 1,3—3,2 °C (RCP6.0), 2,6—4,8 °C (RCP8.5).

При сценариях RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 глобальный рост температуры к 2100 году вероятно превысит 2 °C, по отношению к доиндустриальному периоду, и не превысит этот рубеж при сценарии RCP2.6. В Четвертом отчете МГЭИК (IPCC, 2007) отмечалось, что изменение средней глобальной температуры на континентах превышает изменения соответствующей температуры на океанах примерно в 1,5 раза.

Потепление в Арктике происходит сравнительно быстро, но в Антарктике такое потепление не наблюдается вследствие интенсивного перемешивания вод в Южном океане и благодаря существованию мощного ледникового щита. Минимальное потепление ожидается в Северной Атлантике и в Южном океане при всех сценариях воздействия.

С повышением глобальной температуры у поверхности Земли средняя зональная температура тропосферы также повысится, а в стратосфере — понизится. Эти особенности достаточно хорошо проявляются в верхней тропосфере тропической зоны и в высоких широтах Северного полушария.

С высокой степенью достоверности можно утверждать, что во многих регионах в теплое время года будут более жаркие погодные условия и реже будут наблюдаться экстремально низкие температуры воздуха у подстилающей поверхности зимой. Ожидается рост повторяемости, продолжительности и интенсивности экстремальных явлений, связанных с очень высокими температурами воздуха у поверхности суши. Будут отмечаться и экстремально холодные зимы, однако их повторяемость будет неуклонно уменьшаться.

Циркуляционный режим атмосферы. С ростом температуры

следует ожидать падения давления на уровне моря в высоких широтах и его роста в умеренных широтах. При реализации наиболее «агрессивного» сценария RCP8.5 следует ожидать смещения к северу струйного течения умеренных широт в конце XXI века. При том же сценарии ожидается смещение на несколько градусов к полюсу в Северном полушарии траекторий перемещения циклонов. Необходимо отметить, что оценки изменения траекторий циклонов Северного полушария, особенно в Северной Атлантике, сопровождаются значительными неопределенностями.

Атмосферные осадки и речной сток. С высокой степенью достоверности глобальные осадки в следующем столетии вырастут. Скорость их роста по отношению к росту температуры вероятно составит 1—3 % на 1 °C для всех сценариев, кроме RCP2.6. Для последнего сценария диапазон чувствительности составит 0,5—4 % на 1 °C к концу XXI века.

В высоких широтах и в экваториальной зоне Тихого океана к концу века, вероятно, ожидается увеличение среднегодового количества осадков по сценарию RCP8.5. Во многих засушливых регионах умеренных широт и субтропиков вероятно уменьшение среднего количества осадков, в то время как во многих влажных районах в средних широтах среднее количество осадков к концу века возрастет по сценарию RCP8.5. Одновременно с вероятным ослаблением муссонов интенсивность муссонных осадков, вероятно, увеличится вследствие повышения влагозапаса атмосферы. Маловероятно, что сроки начала муссонов сдвинутся на более ранние сроки, однако, в целом, вероятен сдвиг завершения муссонного сезона к концу года, что приведет к удлинению сезона муссонов во многих регионах.

Модельные расчеты указывают на уменьшение облачности в будущем во многих регионах тропиков и умеренных широт вследствие уменьшения количества, в первую очередь, нижней облачности.

Несмотря на большую вероятность роста осадков в некоторых регионах Земли, отсутствуют регионы, для которых существовал бы надежный прогноз роста влагозапаса почвы, однако развитие в

будущем засушливых условий в Средиземноморье, на юго-западе США и на юге Африки согласуется с ожидаемыми изменениями в циркуляции Гадлея и ростом приземной температуры воздуха в целом.

Вероятно, что речной сток в Южной Европе, на Среднем Востоке и на юго-западе США уменьшится. Модели CMIP5 дают увеличение стока в высоких широтах, однако, достоверность модельного прогноза невысокая из-за больших систематических ошибок моделей при расчете снежного покрова в современном климате.

Годовое испарение с поверхности океанов будет возрастать с ростом температуры на большей части акватории. Испарение увеличится на континентах высоких широт в соответствии с ростом осадков и температуры. Области уменьшения испарения охватят юго-запад США и северо-запад Мексики, южную Африку, а также районы Средиземноморья. На континентах, где ожидается увеличение испарения, влажность почвы уменьшится. Несмотря на высокую степень вероятности качественной картины изменений в испарении, существуют большие количественные неопределенности, в первую очередь, из-за большого межмодельного разброса расчетных изменений осадков.

Повторяемость осадков разной интенсивности также будет изменяться. По-видимому, следует ожидать увеличения повторяемости более интенсивных осадков за счет той части их статистического распределения, которая описывает осадки малой интенсивности. Во влажных, некоторых засушливых и полусушливых регионах с большой вероятностью осадки будут более интенсивными, но менее частыми.

Мировой океан. Наиболее заметный рост температуры океана ожидается в поверхностном слое в тропиках и в субтропической зоне Северного полушария. Наиболее правдоподобные оценки повышения температуры верхнего стометрового слоя океана к концу XXI века составляют от 0,6 °C (RCP2.6) до 2,0 °C (RCP8.5), а на глубине около 1000 м — от 0,3 °C (RCP2.6) до 0,6 °C (RCP8.5). С высокой степенью вероятности можно утверждать, что в течение XXI века Атлантическая меридиональная циркуляция будет ослабевать:

ослабление может составить 11 % (диапазон неопределенности от 1 до 24 %) для сценария RCP2.6 и 34 % (диапазон неопределенности от 12 до 54 %) для RCP8.5. Вероятно, что к середине XXI века произойдет некоторое ослабление этой циркуляции на фоне ее большой междекадной изменчивости.

Повышение уровня Мирового океана, начавшееся в XX веке, будет продолжаться в течение всего XXI века. Среднее повышение уровня Мирового океана в 2081—2100 гг. по сравнению с концом XX века, вероятно, будет находиться в диапазонах: 0,26—0,55 м по сценарию RCP2.6, 0,32—0,63 м по сценарию RCP4.5, 0,33—0,63 м по сценарию RCP6.0 и 0,45—0,82 м по сценарию RCP8.5. Также вероятно, что по сценарию RCP8.5 повышение уровня к 2100 г. составит от 0,52 до 0,98 м, а скорость повышения в течение 2081—2100 гг. — от 8 до 16 мм в год. Приведенные оценки повышения уровня Мирового океана учитывают вклад, вносимый таянием ледников и ледовых щитов. Модели прогнозируют глобальное повышение уровня кислотности океана при всех сценариях. Соответствующее снижение к концу XXI века уровня pH^2 в поверхностном слое океана находится в диапазоне от 0,06 до 0,07 (RCP2.6), от 0,14 до 0,15 (RCP4.5), от 0,20 до 0,21 (RCP6.0) и от 0,30 до 0,32 (RCP8.5).

3. Будущие изменения климата России

В оценках региональных особенностей будущих изменений климата России по новым сценариям используется разделение территории страны в зависимости от экономико-административной общности регионов. Представленный в настоящем докладе анализ включает 8 федеральных округов.

Следует отметить, что территория России, в силу ее большой протяженности, охватывает исключительное многообразие природных

² pH является мерой кислотности по логарифмической шкале: снижение pH на 1 единицу соответствует 10-кратному повышению концентрации ионов водорода, или кислотности.

комплексов, от субтропиков до арктических пустынь, расположенных как в высокогорьях, так и на равнинных территориях. Элементы таких комплексов, по-разному реагируя на глобальное радиационное воздействие, включены в систему сложных взаимодействий друг с другом, что затрудняет обобщение оценок изменений климата и их последствий на масштабах страны. Неоднозначные проявления изменений климата в разных российских регионах, отстоящих друг от друга на тысячи километров, свидетельствуют о необходимости «адресного», детализированного изучения происходящих и ожидаемых в будущем региональных изменений климата на всей территории страны. На основании таких исследований в России должна быть создана более разветвленная, по сравнению с другими странами, система оперативных и долгосрочных мероприятий по адаптации к климатическим изменениям. Такие мероприятия уже сейчас должны быть ориентированы на природные, экономические и социальные особенности каждого российского региона.

3.1. Температурный режим

Модели нового поколения улучшили описание термического режима и связанных с ним экстремальных явлений по сравнению с моделями СМIP3 во многих регионах Земли (Sillman et al., 2013).

В целом, согласно сценарию RCP4.5, оценки изменений средней сезонной температуры (рис. 4) во все периоды XXI века хорошо согласуются с оценками, полученными для российских регионов в рамках ОД_РФ-1 (ОД_РФ-1, 2008) и большого числа ранних исследований. Россия и ее арктические регионы по оценкам моделей СМIP5, как и по оценкам моделей предыдущего поколения, остаются регионами Земли, потепление климата в которых существенно превышает среднее глобальное потепление.

Наиболее заметные изменения средней летней температуры ожидаются в Северо-Западном и Уральском округах; там в начале века потепление ожидается в диапазоне 0,5—1,5 °С, но уже в середине века на арктическом побережье оно достигает 3 °С, а в конце XXI века — 3,5—4,5 °С.

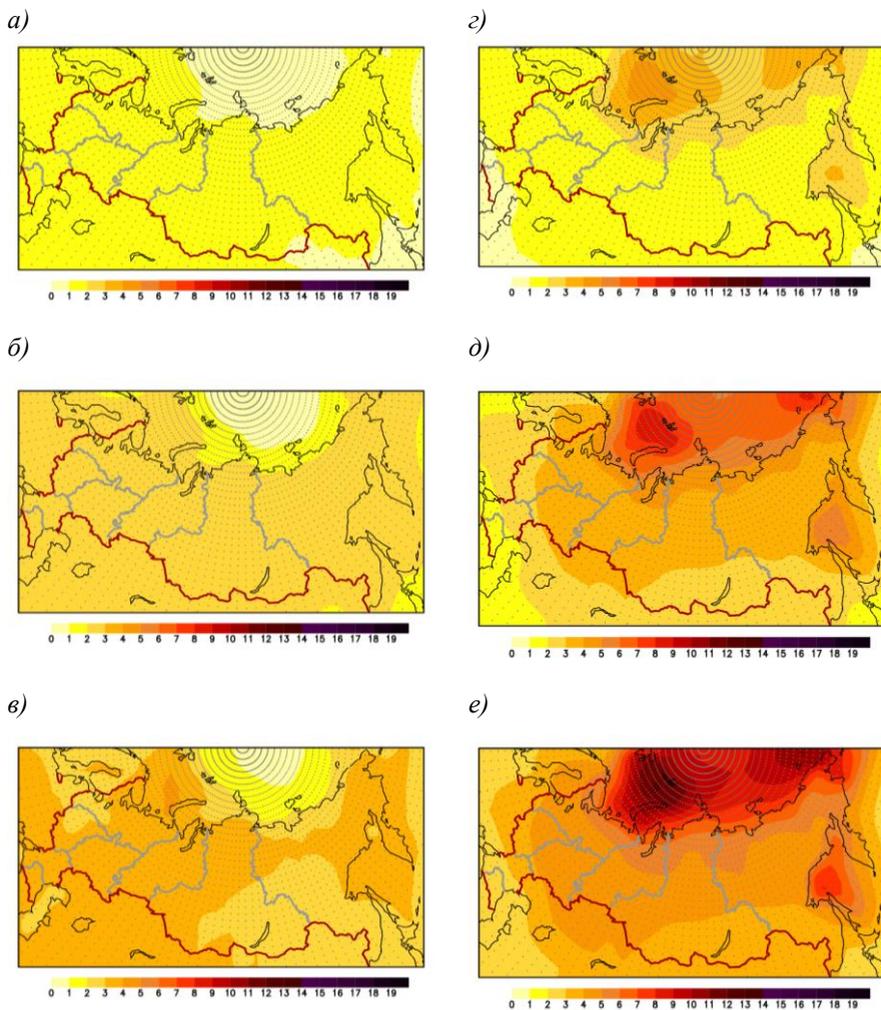


Рис. 4. Изменения средней сезонной температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в период 2011—2030, 2041—2060 и 2080—2099 гг. по отношению к концу XX века летом (*а, б, в*) и зимой (*з, д, е*) по оценкам ансамбля 31 модели CMIP5 по сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5. Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу.

Такой рост температуры обусловлен прямым радиационным воздействием парниковых газов на подстилающую поверхность, с одной стороны, а с другой — влиянием быстро теплеющей акватории арктических морей, примыкающей к берегам указанных территорий (там модели дают наиболее значительное сокращение ледового покрова). Зимой в ближайшей перспективе следует ожидать максимального потепления в тех же регионах, что и летом, но зимнее потепление окажется большим — уже через 10—15 лет средняя зимняя температура там будет на 4—5 °С выше, чем в конце XX века. Однако уже в середине XXI века быстрый рост зимней температуры начнет затрагивать большее число федеральных округов, имеющих выход на арктическое побережье России, вплоть до Чукотки. В Северо-Западном и Уральском федеральных округах потепление может достигнуть 6—7 °С, а на побережьях сибирских округов 4—5 °С. К концу века (2080—2099 гг.) пространственные особенности и отмеченные тенденции роста температуры сохранятся, а на территории российской Арктики зимняя температура воздуха может повыситься на 7—9 °С относительно базового периода (1980—1999 гг.). При более «агрессивном» сценарии RCP8.5 качественные (а в краткосрочной перспективе — и количественные) изменения термического режима будут близкими тем, которые показаны

на рис. 6. Однако, начиная с середины XXI века, скорость изменений температуры по сценарию RCP8.5 как зимой, так и летом, оказывается в 1,2—1,4 раза большей по сравнению с более умеренным сценарием RCP4.5. В целом необходимо отметить высокую степень согласованности рассчитанных по моделям изменений средней сезонной температуры в течение всего XXI века, как для зимнего, так и для летнего сезонов. В таблице 4 приведены изменения средней температуры и межмодельный разброс, полученные по ансамблю 31 модели CMIP5 в федеральных округах России за периоды 2011—2030, 2041—2060 и 2080—2099 гг. по отношению к базовому периоду 1980—1999 гг. с учетом сценариев RCP4.5 (табл. 4а) и RCP8.5 (табл. 4б). Оценки приводятся для зимы, лета и в среднем за год.

Таблица 4а.

Изменения сезонной температуры (°С) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 31 модели CMIP5 в федеральных округах России по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. для сценария RCP4.5

ФО	Период															
	2011—2030				2034—2053 ³				2041—2060				2080—2099			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1.Сев.-Зап.	2,0±1,1	1,6±0,8	1,4±0,6	1,5±0,6	3,4±1,2	2,7±1,1	2,2±0,9	2,6±0,9	3,8±1,3	3,0±1,2	2,5±0,9	2,8±1,0	5,3±1,5	4,1±1,4	3,3±1,2	4,0±1,2
2.Центр.	1,5±1,1	1,4±0,9	1,3±0,6	1,3±0,5	2,7±1,1	2,4±0,9	2,1±1,0	2,1±0,7	3,0±1,1	2,6±1,1	2,4±1,0	2,3±0,6	4,1±1,2	3,4±1,2	3,0±1,1	3,1±0,8
3.Южн.	1,2±0,8	1,0±0,6	1,4±0,6	1,1±0,4	2,0±0,7	1,9±0,6	2,3±0,8	1,9±0,6	2,2±0,8	2,0±0,8	2,5±0,9	2,1±0,6	3,0±1,0	2,7±0,9	3,2±1,0	2,8±0,7
4.Приволж.	1,6±1,1	1,4±0,9	1,3±0,6	1,3±0,4	2,8±1,1	2,6±1,0	2,2±0,9	2,2±0,6	3,2±1,1	2,9±1,2	2,4±1,0	2,4±0,6	4,3±1,3	3,7±1,3	3,1±1,1	3,2±0,8
5.Уральск.	1,9±1,1	1,5±0,8	1,3±0,6	1,6±0,6	3,3±1,2	2,7±1,0	2,3±0,9	2,8±0,9	3,7±1,4	3,1±1,0	2,5±1,0	3,1±0,9	4,9±1,4	4,0±1,5	3,4±1,3	4,2±1,2
6.Сибирск.	1,6±0,9	1,4±0,7	1,2±0,5	1,6±0,5	2,9±1,1	2,3±1,0	2,1±0,9	2,7±0,8	3,3±1,1	2,7±1,0	2,4±1,0	3,1±0,8	4,3±1,2	3,4±1,3	3,1±1,2	4,1±1,1
7.Дальневост	1,9±0,7	1,4±0,7	1,2±0,6	1,7±0,6	3,2±1,0	2,4±1,0	2,0±0,9	2,9±0,8	3,6±1,1	2,7±1,1	2,3±1,0	3,3±0,9	4,9±1,5	3,6±1,6	3,0±1,2	4,4±1,1
8.Сев.Кавказ.	0,9±0,5	0,8±0,5	1,3±0,6	1,0±0,4	1,6±0,5	1,6±0,5	2,2±0,7	1,8±0,6	1,8±0,6	1,8±0,6	2,5±0,8	2,0±0,6	2,4±0,8	2,4±0,7	3,3±1,0	2,7±0,8
Россия	1,7±0,7	1,4±0,7	1,2±0,5	1,6±0,5	3,0±0,9	2,4±0,9	2,1±0,8	2,6±0,7	3,4±1,0	2,7±1,0	2,4±0,9	3,0±0,8	4,6±1,2	3,6±1,4	3,1±1,1	4,0±1,0

³ Период, на середину которого в сценарии RCP4.5 в среднем по ансамблю моделей CMIP5 приходится глобальное потепление на 2 °С по отношению к доиндустриальному периоду.

Таблица 4б

Изменения сезонной температуры (°C) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 31 модели CMIP5 в федеральных округах России по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. для сценария RCP8.5

ФО	Период															
	2011—2030				2028—2047 ⁴				2041—2060				2080—2099			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1.Сев.-Зап.	2,1±1,0	1,8±0,9	1,4±0,6	1,8±0,7	3,5±0,9	2,7±1,1	2,3±0,9	2,8±0,8	4,9±1,0	3,7±1,2	3,1±1,1	3,8±0,9	9,2±1,8	6,8±1,9	6,0±1,8	6,8±1,5
2.Центр.	1,6±0,3	1,5±0,9	1,5±0,7	1,4±0,6	2,6±0,9	2,3±1,0	2,3±0,9	2,2±0,7	3,7±1,1	3,1±1,2	3,1±1,1	3,1±0,7	7,0±1,5	5,4±1,6	5,8±1,7	5,6±1,1
3.Южн.	1,3±0,8	1,2±0,7	1,5±0,6	1,2±0,5	2,1±0,8	1,9±0,7	2,5±0,8	2,1±0,6	2,8±1,0	2,6±0,9	3,3±0,9	2,9±0,6	5,3±1,2	4,6±1,1	6,0±1,4	5,3±1,0
4.Приволж.	1,7±1,0	1,7±0,9	1,4±0,6	1,4±0,5	2,8±0,9	2,5±1,1	2,3±0,8	2,3±0,6	3,9±1,1	3,4±1,3	3,1±1,0	3,2±0,7	7,6±1,5	6,1±1,8	5,8±1,7	5,8±1,1
5.Уральск.	2,1±1,1	1,8±0,8	1,4±0,7	1,9±0,7	3,5±1,1	2,6±1,1	2,3±0,9	3,1±0,9	4,7±1,1	3,6±1,1	3,2±1,1	4,1±1,0	9,4±1,8	7,1±2,1	6,4±1,9	7,5±1,5
6.Сибирск.	1,9±0,9	1,5±0,7	1,3±0,6	1,8±0,6	3,1±1,0	2,2±0,9	2,1±0,8	3,0±0,9	4,2±1,1	3,2±1,1	3,0±1,0	4,0±1,0	8,6±1,7	6,4±1,9	6,0±1,8	7,4±1,4
7.Дальневост	1,9±0,7	1,5±0,7	1,3±0,6	1,9±0,6	3,4±0,9	2,4±0,9	2,1±0,8	3,1±0,9	4,7±1,2	3,4±1,3	2,9±1,1	4,3±1,1	9,7±2,1	6,5±2,2	5,6±1,7	8,0±1,6
8.Сев.-Кавказ.	1,0±0,6	1,0±0,5	1,5±0,6	1,2±0,4	1,6±0,6	1,7±0,5	2,5±0,7	2,0±0,5	2,2±0,8	2,3±0,6	3,3±0,9	2,8±0,6	4,3±1,1	4,4±0,9	6,2±1,4	5,2±1,0
Россия	1,9±0,7	1,6±0,7	1,3±0,5	1,8±0,5	3,2±0,8	2,4±0,9	2,2±0,8	2,9±0,8	4,4±1,0	3,3±1,1	3,0±1,0	3,9±0,9	8,9±1,6	6,5±2,0	5,9±1,7	7,3±1,4

⁴ Период, на середину которого в сценарии RCP8.5 в среднем по ансамблю моделей CMIP5 приходится глобальное потепление на 2 °C по отношению к доиндустриальному периоду.

Блок 1. Как изменятся температура приземного воздуха и осадки на территории России к моменту, когда среднее глобальное потепление преодолеет критическую отметку 2 °С?

При рассмотрении ожидаемых в XXI в. изменений климата определенный интерес представляет выяснение вопроса, как скажется на климате России глобальное потепление на величину 2 °С, часто упоминаемую в качестве некоторого критического для климата Земли повышения средней глобальной температуры по отношению к доиндустриальному периоду (см., например, Randalls, 2010).

Эволюция средней глобальной температуры по ансамблю моделей климата позволяет определить условный «момент» превышения роста глобальной температуры отметки в 2°С (значение глобальной температуры в доиндустриальный период в настоящей работе принято соответствующим концу XIX-го в.). Этот «момент» можно отнести к середине периода (например, двадцатилетия), для которого и можно рассматривать региональные (т.е. для территории России) изменения как температуры, так и других климатических характеристик.

Вышеупомянутые интервалы, полученные для двух сценариев (RCP4.5 и RCP8.5), оказались довольно близкими и даже частично перекрывающимися друг друга — 2034—2053 гг. и 2028—2047 гг., соответственно. Изменения климатических характеристик на территории России для указанных интервалов представлены на рис. 5 и в табл. 4 и 5.

Ко времени среднего глобального потепления на 2 °С средние по ансамблю изменения температуры и осадков в целом для территории России во все сезоны превышают среднеквадратические отклонения, характеризующие неопределенность модельных оценок. Однако если для температуры отношение «сигнал/шум», большее единицы, сохраняется и для отдельных федеральных округов, то в случае осадков такая картина складывается не для всех регионов и не во все сезоны (особенно летом).

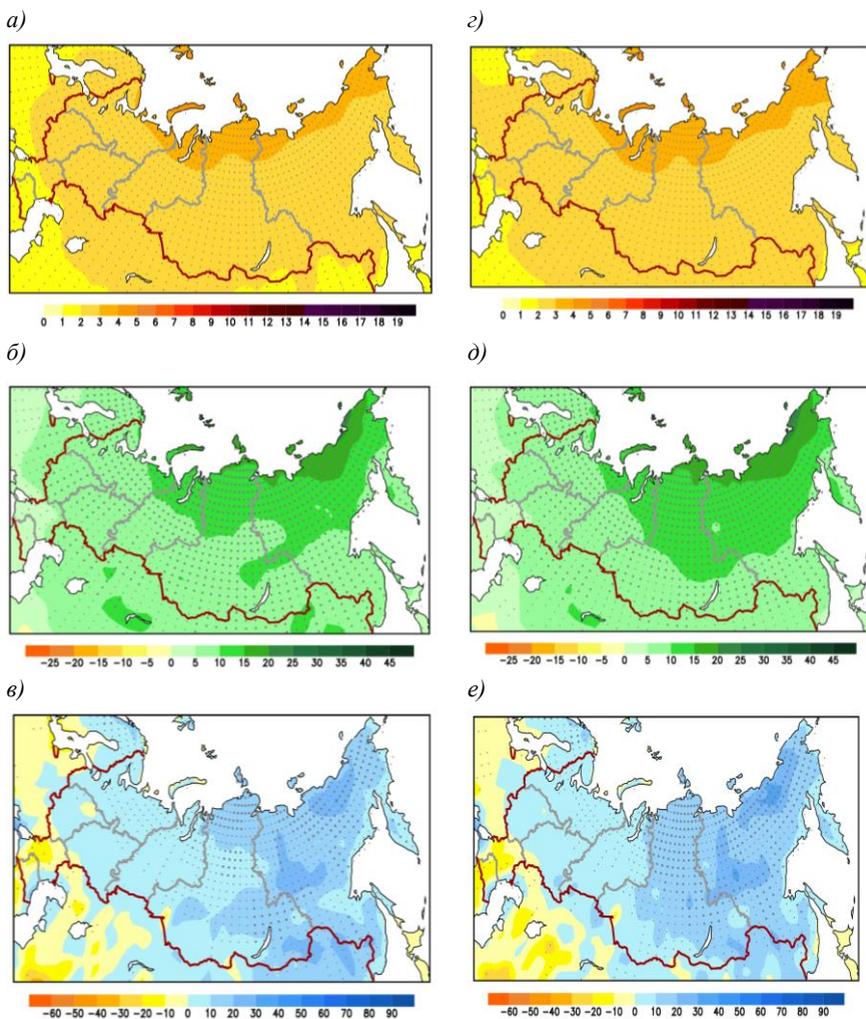


Рис. 5. Изменения среднегодовой температуры приземного воздуха (°C) (а, з), среднегодовых осадков (%) (б, д) и суммарного годового стока (%) в периоды 2034—2053 гг. (а, б, в) и 2028—2047 гг. (з, д, е), соответствующие повышению средней глобальной температуры на 2 °C, по отношению к доиндустриальному периоду, в сценариях RCP4.5 (а, б, в) и RCP8.5 (з, д, е).

Таблица 5а.

Изменения сезонных суммарных осадков(%) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 31 моделей CMIP5 в федеральных округах России по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. для сценария **RCP4.5**.
 Жирным шрифтом выделены изменения, которые превышают по абсолютной величине стандартные отклонения (межмодельный разброс).

ФО	Период															
	2011—2030				2034—2053 ⁵				2041—2060				2080—2099			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1.Сев.-Зап.	7±7	5±6	3±5	6±5	13±8	9±8	5±7	8±6	14±8	10±8	4±8	10±6	19±8	13±9	7±8	13±7
2.Центр.	7±6	6±8	2±9	4±7	11±7	9±8	2±10	7±8	12±7	9±7	1±11	8±7	16±9	13±8	3±12	6±8
3.Южн.	5±7	5±9	2±12	1±8	8±7	7±9	0±12	2±11	8±7	8±10	-1±13	2±9	11±9	11±10	-2±15	0±10
4.Приволж.	7±6	6±7	5±7	5±7	12±7	9±9	4±12	6±7	13±7	10±8	3±12	8±6	18±9	14±9	6±13	8±8
5.Уральск.	9±7	5±5	4±6	7±5	16±7	10±7	5±9	10±6	17±8	11±7	7±6	9±12	23±10	12±8	8±10	16±8
6.Сибирск.	9±7	6±4	4±4	6±3	17±7	11±6	6±5	11±4	18±8	12±7	6±5	12±5	26±11	16±7	9±7	17±5
7.Дальневост.	9±5	5±4	4±3	8±4	16±7	11±6	7±3	13±6	19±7	12±7	8±4	15±6	27±11	17±8	11±5	20±7
8.Сев.-Кавказ.	5±8	5±7	-2±9	2±9	8±8	6±7	-6±11	1±10	9±8	6±8	-6±10	-0±9	11±11	7±8	-10±14	1±10
Россия	8±5	6±5	4±3	7±3	14±5	10±5	6±4	10±4	16±6	11±5	6±4	12±4	22±8	15±7	8±4	16±6

⁵ Период, на середину которого в сценарии RCP4.5 в среднем по ансамблю моделей CMIP5 приходится глобальное потепление на 2 °С по отношению к доиндустриальному периоду.

Таблица 5а.

Изменения сезонных суммарных осадков (%) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 31 моделей CMIP5 в федеральных округах России по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. для сценария **RCP8.5**.
 Жирным шрифтом выделены изменения, которые превышают по абсолютной величине стандартные отклонения (межмодельный разброс).

ФО	Период															
	2011—2030				2028—2047 ⁶				2041—2060				2080—2099			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1.Сев.-Зап.	8±7	6±6	3±6	5±5	12±7	9±7	5±6	10±6	18±8	13±7	7±6	7±13	40±14	25±13	6±12	22±11
2.Центр.	7±7	6±7	2±9	2±5	10±8	9±9	-0±11	6±8	13±8	11±8	-2±13	4±7	29±11	20±10	-7±16	9±10
3.Южн.	6±7	5±9	1±11	2±9	8±7	6±8	-4±13	1±12	8±8	6±11	-6±13	-1±12	14±12	10±13	-14±20	-2±15
4.Приволж.	8±6	6±7	3±8	4±7	12±7	9±8	1±10	7±8	15±9	13±9	1±11	6±7	34±12	24±13	1±16	12±10
5.Уральск.	11±7	6±5	4±6	7±5	16±7	9±7	5±8	11±7	21±10	14±8	7±9	14±7	48±18	27±13	4±15	24±10
6.Сибирск.	11±7	6±5	4±4	7±3	17±9	11±6	6±5	12±5	24±11	15±7	7±6	16±5	53±20	28±13	9±10	30±9
7.Дальневост.	9±5	7±5	4±3	9±4	18±7	11±6	7±3	14±5	24±10	16±8	10±4	19±7	56±17	31±13	18±6	38±11
8.Сев.-Кавказ.	7±8	4±6	-2±8	3±8	8±8	5±6	-8±9	-1±10	10±9	4±8	-11±12	-2±12	15±15	4±13	-23±18	-3±16
Россия	9±4	6±3	4±2	7±3	15±5	10±5	5±3	11±4	20±8	14±6	7±5	15±5	45±13	27±11	11±8	28±8

⁶ Период, на середину которого в сценарии RCP8.5 в среднем по ансамблю моделей CMIP5 приходится глобальное потепление на 2 °С по отношению к доиндустриальному периоду.

Особенностью экстремальных климатических режимов является их малая повторяемость и, как следствие, меньшая, по сравнению со средними сезонными и годовыми характеристиками, статистическая обеспеченность оценок их будущих изменений. Изменения оценок экстремальности оказываются не столь однозначными, как в случае средней сезонной температуры или давления, и предсказываются, преимущественно, с меньшей степенью достоверности (Школьник и др., 2012). Разнообразие экстремальных явлений на территории России очень велико. В континентальных районах значительную угрозу социально-экономической инфраструктуре несут, в первую очередь, такие явления, как высокие температуры воздуха летом и необычно низкие температуры зимой, продолжительность периодов с такими температурами, осадки высокой интенсивности и частота их выпадения. В регионах, имеющих выход к океану, возникают более сложные, по сравнению с другими регионами, механизмы формирования экстремальных явлений. Ключевую роль здесь играет интенсивное взаимодействие различных сред (суша, океан, криосфера) в пределах пограничных зон сравнительно небольшой ширины. Для каждой из указанных сред характерны специфические особенности температурно-влажностного режима и атмосферной циркуляции, по-разному реагирующими на рост глобальной температуры. В таких районах происходит интенсивное тумано- и осадкообразование, обледенение, возникают другие опасные явления, оказывающие негативное влияние, например, на транспортные операции в прибрежной зоне. От эффективности таких операций, в свою очередь, зависит жизнедеятельность и функционирование объектов инфраструктуры во многих удаленных федеральных округах России.

Будущие изменения экстремальности на территории России рассчитаны по ансамблю четырнадцати климатических моделей CMIP5 с использованием данных суточного разрешения. Был определен набор специальных индексов экстремальности, изменения которых обеспечивают показательную оценку будущих изменений в статистике опасных явлений погоды, связанных с резкими

колебаниями термического режима в регионах с учетом отмеченного выше разнообразия климатических условий на территории России.

В число рассматриваемых индексов экстремальности температуры, помимо ее абсолютных годовых максимумов и минимумов, годового диапазона экстремальных температур и числа морозных суток в году, входят продолжительность волн тепла (летний сезон) и волн холода (зимний сезон). Волна тепла характеризуется максимальным количеством последовательных дней (не менее шести дней) с суточным максимумом температуры, превышающим более чем на 5 градусов многолетнюю норму суточного максимума температуры, волна холода — как максимальное количество последовательных дней (не менее 6 дней) с суточным минимумом температуры, меньшим многолетней нормы на 5 и более градусов.

По сравнению с изменениями средней летней температуры (рис. 4), абсолютный годовой максимум температуры (рис. 6) будет наиболее заметно возрастать, в первую очередь, на юге и Крайнем Севере Европейской Территории России, вблизи акваторий морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского. Во все периоды XXI века рост экстремально высоких температур воздуха в указанных районах будет более быстрым по сравнению с ростом средней температуры теплого сезона. К концу века потепление там будет находиться в диапазоне 6—7 °С — это на 3 °С больше, чем изменение средней летней температуры. В то же время, в других регионах Центральной и Восточной Сибири, за исключением побережий Карского и Берингова морей, ожидается незначительный рост экстремально высоких температур в летний сезон в течение всего XXI века (изменение находится в диапазоне 1—2 °С).

Как и в случае средней летней температуры, модели рассчитывают изменения максимума годовой температуры с высокой степенью достоверности, за исключением периода 2011—2030 гг., когда на части территории Центральной Сибири отношение сигнала к шуму в ансамбле моделей оказывается меньшим единицы. На том же рисунке приведены изменения волн тепла.

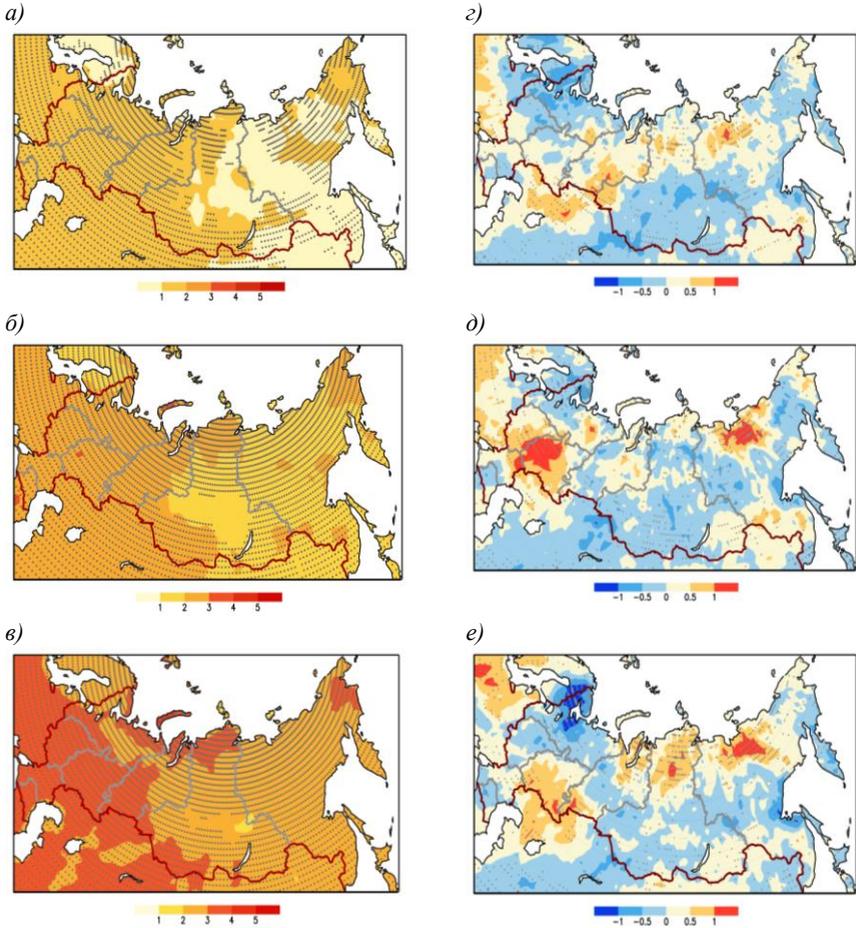


Рис. 6. Изменения среднего за 20 лет абсолютного годового максимума температуры (°C) приземного воздуха в период 2011—2030, 2041—2060 и 2080—2099 гг. (а, б, в) и длительности (дни) волн тепла летом (з, д, е) по оценкам ансамбля 14 моделей СМIP5 согласно сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5.

Для температуры точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1. Для волн тепла мелкими точками показаны регионы, где более 66 % моделей дают одинаковый знак изменений, крупными — регионы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в более, чем 90 % моделей.

Определение волны тепла см. в тексте.

Из рисунка видно, что с наиболее высокой степенью вероятности продолжительность волн тепла будет сокращаться на Кольском полуострове (на 1—2 суток за сезон). Такие изменения, по-видимому, обусловлены ростом временной изменчивости летних суточных максимумов температуры на северо-западе в течение всего XXI века. На севере Сибири к концу XXI века, напротив, ансамбль предсказывает рост средней длительности волн тепла до 3 суток. Следует отметить, в регионе Прикаспийской низменности в период 2041—2060 гг. также ожидаются более затяжные периоды с высокими температурами (до 3 суток). По сравнению с базовым периодом такое увеличение находится в диапазоне 30—40 %, то есть представляется весьма значительным.

Изменения среднего за 20 лет годового минимума температуры (рис. 7), указывают на то, что как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе следует ожидать заметного смягчения температурного режима в холодное время года, в первую очередь, за счет повышения наиболее низких температур воздуха на севере Европейской территории России. На этой территории ожидается рост годовых минимумов температуры воздуха в период 2011—2030 гг. на 2—4 °С, а концу XXI века — до 8 °С. Наименее подверженными воздействию экстремально низких температур окажется восток России, где их рост будет примерно в 2 раза меньшим по сравнению с другими регионами. Среди причин, обуславливающих пространственные особенности изменения годового минимума температуры, следует назвать сокращение длительности залегания снежного покрова или его полное исчезновение в тех регионах, где будет отмечаться наиболее значительный рост минимумов температуры приземного воздуха. Что касается волн холода (их изменения показаны на том же рисунке), критерием экстремальности для которых выбирается порог температур на 5 °С ниже средней минимальной суточной температуры в базовом периоде, то их изменения в ближайшие 10—15 лет будут слабыми на всей территории России. Однако в середине XXI века и, тем более, в его конце, ожидаются существенные (до 3 суток) уменьшения продолжительности волн холода, прежде всего, на побережьях

Баренцева и Белого морей, а также на территориях Камчатки и Дальнего Востока. Для климата конца XX века характерная длительность волн холода в прибрежной полосе находилась в диапазоне 3—5 суток. Таким образом, в ряде прибрежных районов повторяемость экстремальных событий, связанная с очень холодными периодами, может оказаться близкой нулю, начиная уже с середины XXI века. В южных регионах России, особенно в Сибирском федеральном округе, напротив, ожидается некоторое увеличение продолжительности волн холода (до 2 суток) в начале и середине века. Однако затем, до конца XXI века, их длительность там будет сокращаться.

Что касается годового диапазона экстремальных значений температуры, который представляет разность между абсолютным годовым максимумом и минимумом температуры, изменения которых проанализированы выше, то он на территориях практически всех федеральных округов при потеплении климата будет сокращаться (рисунок не приводится). В целом, это свидетельствует о смягчении термического режима на всей территории России, и, в первую очередь, в тех ее регионах, которые граничат с акваторией Мирового океана. Процесс формирования более умеренного климата в указанных районах, начавшийся в последние десятилетия, будет к концу века ускоряться. Необходимо отметить, что общее снижение экстремальности термического режима в XXI веке на территории России, прогнозируемое на годовых масштабах, может проявляться не во все сезоны и не для всех территорий, особенно в первой половине XXI века.

В средней полосе России, а также на юге в районах, примыкающих к Каспийскому и Черному морям, некоторое снижение экстремальности температурного режима устойчиво проявится к концу XXI века. Зимы в этих регионах будут, по-видимому, малоснежными или бесснежными, а радиационный баланс подстилающей поверхности — положительным в течение всего календарного года.

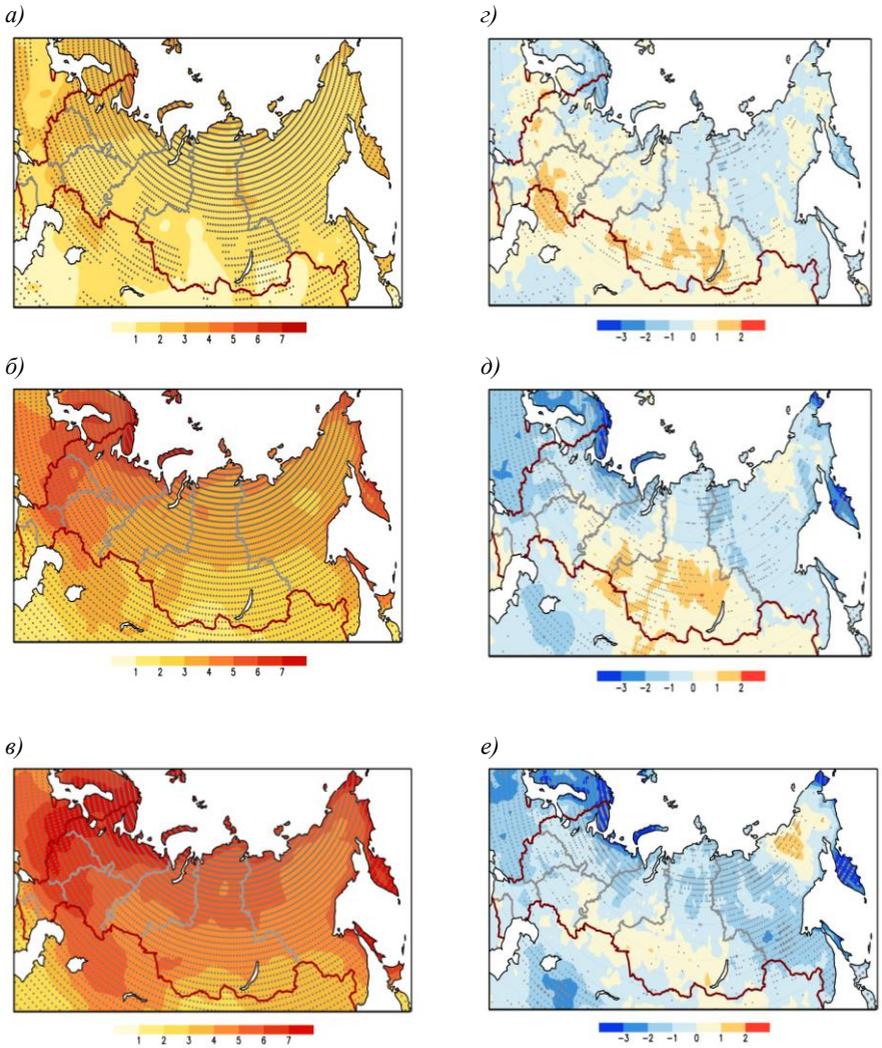


Рис. 7. То же, что на рис. 3.6, но для годового минимума температуры и длительности волн холода зимой.

Число морозных суток (когда минимальная суточная температура опускается ниже 0 °С) наиболее заметно изменится во все периоды на прибрежных территориях тех федеральных округов, которые расположены в Европейской части России — это Северо-западный и Уральский округа (рисунок не приводится). Там в ближайшие 10—15 лет число морозных дней сократится в среднем на 10—20 дней по сравнению с концом XX века, а концу XXI века уменьшение числа таких дней достигнет 40 за год.

3.2. Циркуляционный режим атмосферы

Атмосферная циркуляция оказывает значительное влияние на формирование термического и гидрологического режима на территории России. Изменения атмосферной циркуляции в XXI веке могут существенно отразиться не только на средних сезонных и годовых характеристиках приземного климата, но и на экстремальных явлениях, связанных с температурой приземного воздуха и осадками. Среди таких явлений, участвовавших в последние годы и, возможно, обусловленных изменениями глобальной атмосферной циркуляции, следует отметить небывалую засуху в Центральной России 2010 года и исключительно интенсивный паводок в Амурской области в 2013 году.

В последних отчетах МГЭИК отмечается, что обнаружение отклика атмосферной циркуляции на антропогенное воздействие затруднено по причине ее большой пространственно-временной изменчивости во внетропических широтах. Результат высокого уровня климатического шума — большая, по сравнению с тропиками, неопределенность модельных оценок будущих изменений атмосферной циркуляции, особенно на ближайшие 30—50 лет. Что касается более отдаленной перспективы (например, конца текущего века), то большая часть модельных оценок сходится в одном: под влиянием глобального потепления ожидается постепенное смещение траекторий циклонов к полюсу и ослабление глобальной циклонической активности в целом (см. например, Bengtsson et al., 2009).

К показателям, характеризующим циркуляцию атмосферы, следует отнести, в первую очередь, атмосферное давление у поверхности, ветер, а также специальные детализированные характеристики циклонической активности, например, число циклонов, их глубина, скорость и направление перемещения, размер и другие.

Будущие изменения массы атмосферы на территории России в целом согласуются с ранее выполненными перспективными оценками в рамках ОД_РФ-1 (ОД_РФ-1, 2008), где использовались результаты расчетов изменений климата по моделям предыдущего поколения СМIP3. Картина изменений атмосферного давления для зимнего и летнего сезонов для сценария RCP8.5 свидетельствуют о том, что при потеплении климата на всей территории России в летний сезон в средне- и долгосрочной перспективе будет преобладать тенденция к уменьшению давления на 1—2 гПа относительно базового периода. Зимой тенденция уменьшения давления будет выражена сильнее на большей части территории страны (модели прогнозируют понижение давления до 3 гПа к концу XXI века), за исключением ее южных регионов, где модельный ансамбль указывает на слабый рост давления (в дальней перспективе согласно сценарию RCP8.5 — до 2 гПа). Что касается ближайших 10—20 лет, то зимой и до середины XXI века летом значительных изменений давления не ожидается. Ветер у подстилающей поверхности, согласно сценарию RCP8.5 подвергнется слабым изменениям на всей территории России во все периоды, вплоть до конца XXI века (рисунок не приводится). Изменения ветрового режима, независимо от региона и времени года, находятся в диапазоне ± 1 м/с, причем изменения приземного ветра летом в субарктической зоне России и зимой на территории Западной Сибири преимущественно отрицательные, а на юге Европейской территории летом — положительные. При реализации менее «агрессивных», по сравнению с RCP8.5, сценариев радиационного воздействия, на территории страны следует ожидать, соответственно, более слабых изменений атмосферного давления и ветра.

Региональные особенности изменений средних сезонных и годовых полей давления и ветра у поверхности на территории России

тесно связаны с изменениями бароклининой циркуляции атмосферы над Евразией и Арктикой. Траектории перемещения барических систем, интенсивность циклогенеза/циклолиза, скорость движения, размеры и число циклонов – все это может подвергнуться заметным изменениям под влиянием потепления климата, даже на фоне сравнительно небольших изменений осредненных за сезонные или годовые интервалы давления и ветра (Pinto et al., 2007).

При анализе будущих изменений атмосферной циркуляции значительный интерес представляют изменения таких характеристик циклонической активности, как число дней с циклоном на данной территории и их средний размер зимой (рис. 8). В это время года активность бароклининых волн в атмосфере Северного полушария наибольшая. В другие сезоны изменения характеристик циклонической активности до конца XXI века на большей части территории России незначительные. Из рисунка видно, что в условиях глобального потепления, как в середине, так и в конце века, число дней с циклоном зимой убывает, преимущественно, в субарктическом поясе и в центральной России, но особенно значительно — в районах Северо-Западного федерального округа. Наибольшее сокращение числа дней с циклоном ожидается на Кольском полуострове — до 6 дней за сезон к концу XXI века (число дней с циклоном зимой в базовом периоде составляет 25—30).

Размеры циклонов при потеплении климата обнаруживают тенденцию к росту, в первую очередь, в южных регионах и на западе России (на 40—60 км), но, в особенности, на территории Восточной Сибири (на 60—80 км). На Чукотке циклоны станут в среднем больше в диаметре на 100 км и более. Заметное увеличение диаметра циклонов возможно над акваториями морей у тихоокеанского побережья России – там, как показывают модельные расчеты, будет существенно сокращаться ледовый покров, что в зимний период приведет к ослаблению устойчивости атмосферы и созданию более благоприятных условий для интенсификации циклогенеза. В тех же регионах прогнозируется наиболее значительное в регионе увеличение числа дней с циклоном (см. рис. 8а, б).

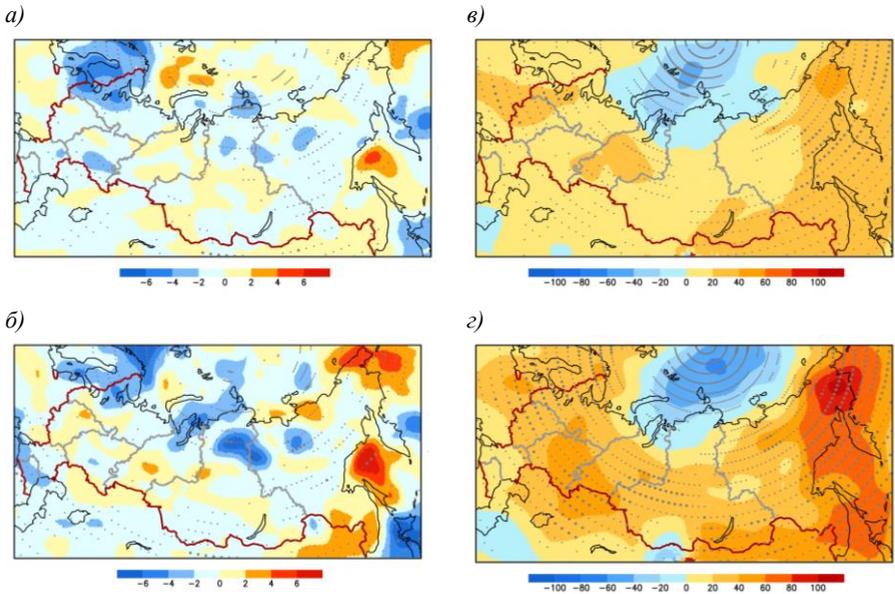


Рис. 8. Изменение среднего числа дней (*а, б*), когда на данной территории присутствуют циклоны, и изменение их среднего размера (*в, г*) в километрах зимой в период 2041—2060 и 2080—2099 гг. по отношению к концу XX века по оценкам ансамбля 14 моделей СМIP5 по сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP8.5.

Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными — районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей.

В западном секторе Арктики, наоборот, ожидается некоторое уменьшение среднего диаметра циклона (до 80 км). Приведенные изменения характеристик циклонической активности указывают на возможное уменьшение вклада мезомасштабных барических систем в общую статистику циклонов на юге и рост числа мезоциклонов над акваторией Северного Ледовитого океана. Среди других возможных причин уменьшения среднего размера циклонов в западном секторе Арктики при потеплении климата — смещение в условиях

глобального потепления к полюсу областей циклогенеза, в пределах которых преобладают сравнительно небольшие барические системы, находящиеся на начальной стадии жизненного цикла.

3.3. Атмосферные осадки и речной сток

Изменения средних сезонных осадков, показанные на рис. 9, свидетельствуют об устойчивой тенденции их роста на всей территории России зимой при потеплении, для всех сценариев и временных рамок прогноза. Анализ модельных расчетов показал, что, согласно наиболее «агрессивному» сценарию RCP8.5, в Сибири возможен полуторакратный рост осадков относительно осадков в базовом периоде. В летний сезон рост средних осадков ожидается на большей части территории России, за исключением южных регионов, где по сценарию RCP8.5 возможно уменьшение осадков до 25 % к концу XXI века относительно базового периода.

Степень согласованности модельных оценок на рисунке выражена в терминах числа моделей, дающих изменения одного знака. Принято, что если 66 % моделей рассчитывают в регионе изменения одного знака, то такие изменения следует рассматривать как ожидаемые с высокой вероятностью, а если одинаковый знак получен по результатам 90 % моделей, то вероятность таких изменений в будущем может рассматриваться как очень высокая.

В таблице 5 приведены изменения летних, зимних и среднегодовых осадков в федеральных округах России и межмодельный разброс, полученные по ансамблю 31 модели CMIP5 в административных регионах России за периоды 2011—2030, 2041—2060 и 2080—2099 гг. по отношению к базовому периоду 1980-1999 гг. с учетом сценариев RCP4.5 и RCP8.5.

Среди характеристик экстремальности гидрологического режима одними из часто используемых в оценках климатических воздействий являются максимальная сумма осадков за пятидневный период и длительность периодов без осадков.

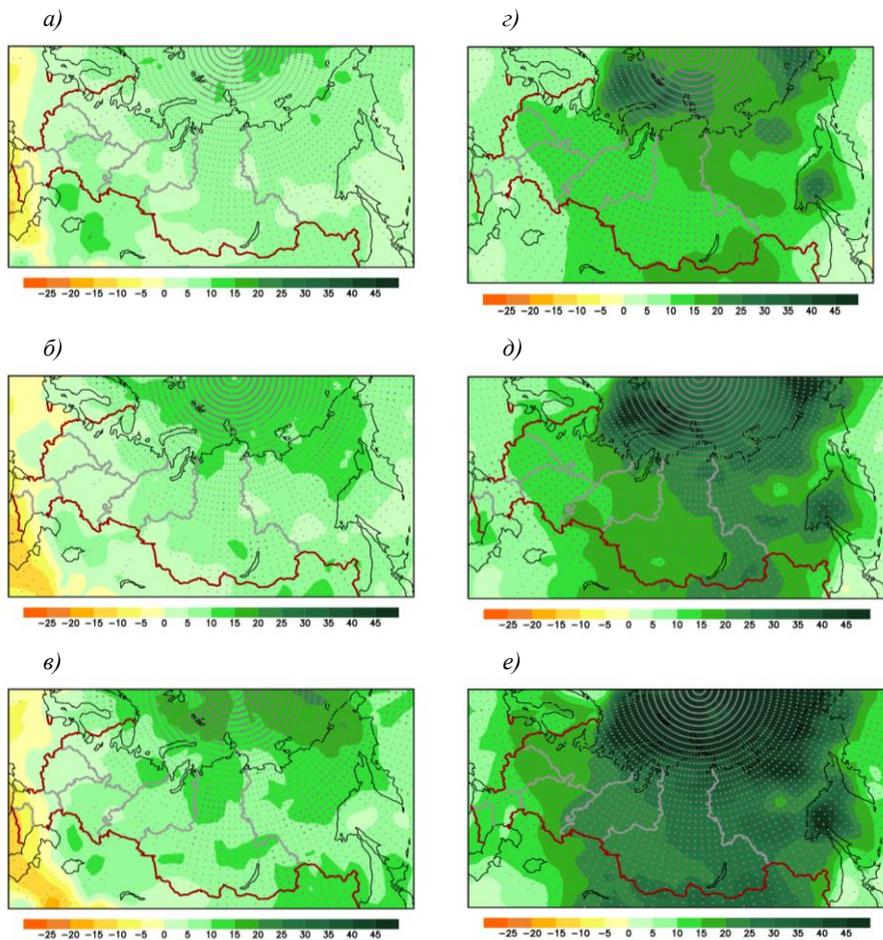
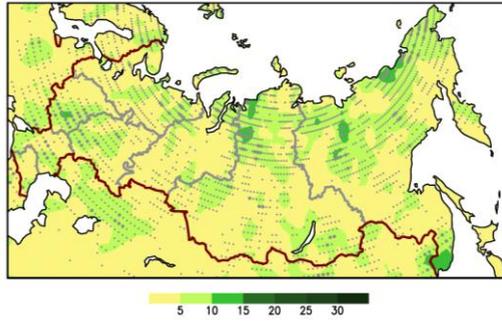


Рис. 9. Изменения средних сезонных осадков в период 2011—2030, 2041—2060 и 2080—2099 гг. по отношению к концу XX века летом (*а*, *б*, *в*) и зимой (*з*, *д*, *е*) по оценкам ансамбля 31 модели CMIP5 и сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5.

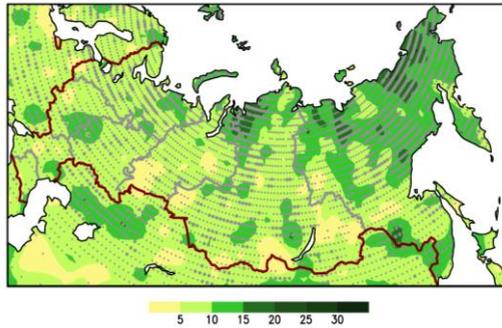
Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными — районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90 % моделей.

Что касается ожидаемых в XXI веке изменений максимальной в году пятидневной суммы осадков (рис. 10), то на всей территории России они будут возрастать и, если в период 2011—2030 гг. их изменение будет находиться преимущественно в диапазоне 5—10 %, то в середине и в конце текущего века рост интенсивных осадков будет превышать 10 % относительно их величин в базовом периоде. Наиболее заметный рост ожидается на Тихоокеанском побережье Восточной Сибири, побережьях Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых — в этих регионах уже в краткосрочной перспективе изменения будут превышать порог 20 % при удовлетворительной согласованности модельных оценок. В целом пространственная картина роста максимальных пятидневных сумм осадков удовлетворительно согласуется с пространственным распределением изменений средних сезонных осадков на рис. 9. Заметим, что в умеренных широтах наибольшая интенсивность осадков приходится на весенне-летний период, так что годовой максимум пятидневных сумм осадков отмечается преимущественно в теплое время года. Как видно из рис. 9, в Южном федеральном округе летом прогнозируется уменьшение осадков, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе (аналогичные оценки были получены и в ОД_РФ-1). В то же время, максимальные пятидневные суммы осадков там могут возрастать во все периоды XXI века, что свидетельствует об усилении опасных явлений, связанных с экстремальными осадками на фоне уменьшения общей влагообеспеченности южных регионов. Что касается длительности периодов без осадков, то, как показал анализ ансамблевых расчетов СМIP5, ее заметных изменений на территории России в течение XXI века не ожидается: изменения длительности будут находиться на территориях большинства федеральных округов преимущественно в диапазоне ± 1 сутки вплоть до конца века. Заметим, что из-за недостаточного разрешения глобальных моделей СМIP5, полученная по ним картина изменений периодов без осадков (как и ряда других показателей экстремальности, обладающих большой пространственной изменчивостью) может не отражать вклад мезомасштабной атмосферной циркуляции в формирование региональных экстремальных явлений.

a)



б)



в)

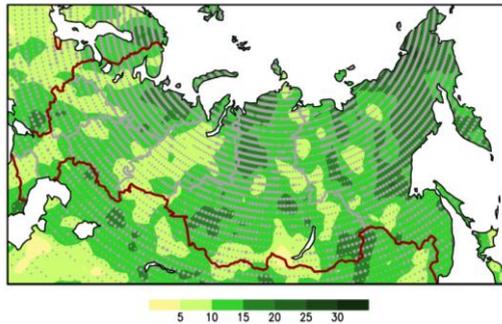


Рис. 10. Изменения средней за 20 лет максимальной в году суммы осадков за 5 суток (%) в период 2011—2030 (а), 2041—2060 (б) и 2080—2099 (в) гг. по оценкам ансамбля 14 моделей СМIP5 согласно сценарию RCP4.5.

Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными — районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90 % моделей.

Для детализации расчетов СМIP5, призванной дать более реалистичное описание амплитуды и пространственной структуры экстремальных явлений, принято использовать региональные климатические модели (РКМ) высокого разрешения, использующие на границах своих областей результаты расчетов глобальных моделей. Так, рассчитанные по ансамблю РКМ ГГО (шаг сетки 25 км) будущие изменения периодов без осадков в ряде регионов (см. рис. 11) могут оказаться уже к середине XXI века в 2—3 раза большими по сравнению с оценками глобальных моделей.

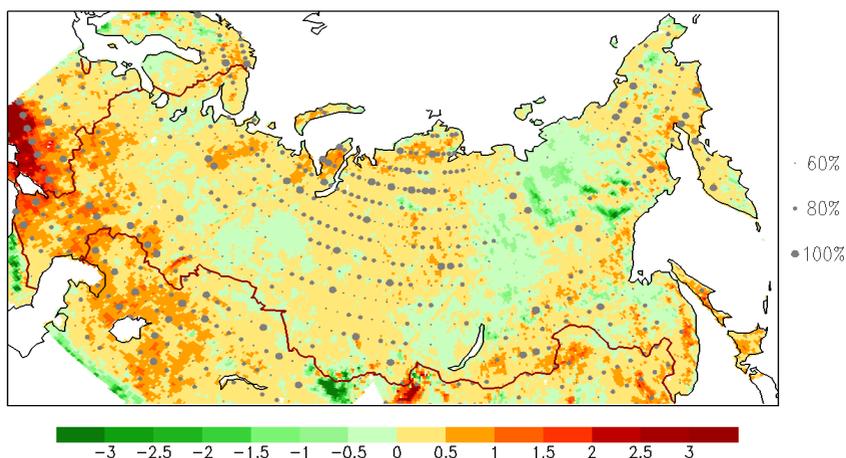


Рис. 11. Изменение непрерывной длительности периодов (сутки) без осадков летом в период 2041—2060 гг. по отношению к концу XX в. по ансамблю из 5 расчетов региональной модели ГГО.

Сценарий SRES A2, близкий RCP4.5.

Точками обозначены регионы, где 60, 80 и 100 % от числа членов ансамбля РКМ (соответственно 3, 4 и 5 членов) дает знак изменений, совпадающий со знаком средних по ансамблю изменений.

В качестве характеристики стока на территории России использованы средние многолетние значения разности осадков и испарения, рассчитанные по ансамблю из 26 моделей СМIP5. В таблице 6 приведены прогнозируемые изменения среднего за 20 лет годового стока на речных водосборах, полностью или частично расположенных на территории России. Наряду с водосборами отдельных крупных рек (Волга, Енисей, Лена, Обь и Амур) рассмотрены водосборы Балтийского моря и укрупненные области стока, включающие водосборы рек севера (Мезень, Сев. Двина, Онега и Печора), юга (Днепр, Дон, Днестр и Кубань) и Чукотки (Индибирка, Яна, Колыма, и Анадырь). Из таблицы видно, что на большинстве водосборов изменения стока не превышают модельный разброс. Однако на трех водосборах — это крупные водосборы Лены и Енисея, а также Чукотка — ожидаемые изменения стока превышают ансамблевый разброс, что свидетельствует о большей степени определенности в оценках роста избыточных водных ресурсов в этих районах при потеплении климата по сравнению с другими водосборами. Основной причиной увеличения стока на водосборах является отмеченное выше увеличение зимних осадков (рис. 9), приводящее, в первую очередь на севере умеренных широт, к большему, по сравнению с базовым периодом, накоплению снега весной.

Полученные оценки изменений стока подтверждают выполненные ранее в рамках ОД_РФ-1 оценки по моделям предыдущего поколения для отмеченных в табл. 6 водосборов. Оценки в ОД_РФ-1 базировались на 13 моделях СМIP3 и сценарии SRES A2. Здесь же используются модельные оценки по новым сценариям RCP. Сравнение модельных прогнозов разного поколения показало, что оценки изменений стока по сценарию A2, одному из наиболее «агрессивных» сценариев семейства SRES, занимают промежуточное положение между оценками двух использованных в настоящем Докладе сценариев (RCP4.5 и RCP8.5). Необходимо добавить, что неопределенность оценок будущих изменений стока на территории России с помощью современных моделей климата несколько возросла по сравнению с оценками СМIP3. Так, если для периода 2080—2099

гг. согласно сценарию SRES A2 практически на всех рассматриваемых водосборах среднее по моделям изменение стока было больше межмодельного разброса, то в ансамбле CMIP5 согласно сценарию более сильного радиационного воздействия (RCP8.5) отношение сигнал/шум превосходит единицу только для трех указанных выше водосборов.

Таблица 6

Средние за год изменения годового стока (%) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 26 модели CMIP5 по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. по сценариям RCP4.5 и RCP8.5.

Жирным шрифтом выделены изменения, которые превышают по абсолютной величине стандартные отклонения (межмодельный разброс).

Водосбор	2011—2030		2041—2060		2080—2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
1.Волга	5±14	4±14	5±14	8±21	10±19	16±36
2.Обь	6±10	6±10	9±14	12±15	13±16	17±36
3.Енисей	6±6	7±6	11±8	16±9	16±9	27±30
4.Лена	6±5	7±4	12±8	17±8	18±9	34±30
5.Амур	6±9	8±10	12±11	11±11	14±17	21±31
6.Сев. реки	3±8	5±9	8±11	13±14	11±14	21±31
7.Юж. реки	0±16	-3±14	-4±15	-4±18	-4±16	-13±26
8.Реки Чукотки	9±6	9±6	15±11	19±12	21±15	42±33
9.Балтика	2±5	0±9	4±7	6±8	7±8	12±27

3.4. Снежный покров суши и многолетняя мерзлота

Расчеты будущих изменений снежного покрова суши (СПС) указывают на сокращение его площади с различной скоростью, в зависимости от рассматриваемого сценария. Скорость сокращения

площади снежного покрова до середины XXI века по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 примерно одинакова, во второй половине XXI века сокращение площади СПС происходит практически в два раза быстрее для сценария RCP8.5. Так, по сценарию RCP4.5 сокращение СПС в Северном полушарии к концу века составит для среднегодовой площади $16 \pm 5\%$ по отношению к среднегодовой площади СПС за период 1980—1999 гг., при реализации сценария RCP8.5 среднегодовая площадь СПС сократится на $30 \pm 7\%$. Изменения площади СПС в марте составят $12 \pm 4\%$ и $24 \pm 5\%$, в апреле — $17 \pm 7\%$ и $31 \pm 8\%$ для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно. Следует отметить значительный межмодельный разброс в изменениях весенней площади СПС (рис. 12). Изменения накопленной за зиму массы снега носят более сложный характер, поскольку являются результатом воздействия двух факторов: температуры воздуха и количества осадков в холодный период. Полученный в расчетах CMIP5 рост зимней температуры и связанное с глобальным потеплением увеличение количества зимних осадков приведут к тому, что зимой в холодных регионах, где осадки выпадают в основном в твердой форме, снегонакопление будет увеличиваться. На рисунке 13 показана двухвековая (в XX в. и для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 в XXI в.) эволюция массы снега, тающего весной (разность интегральной массы снега на водосборе между мартом и маем, Гт), для водосборов рек Лены, Енисея и Оби. Кривыми представлены средние по ансамблю моделей CMIP5 изменения массы снега по отношению к базовому периоду 1910—1959 гг., интервал изменчивости для которого обозначен двумя фиолетовыми линиями. В этот интервал (при сохранении статистической структуры базового климата) теоретически должны попадать 95 % ежегодных значений. Таким образом, если кривая выходит за границы этого интервала, то рассматриваемые изменения в среднем по ансамблю статистически значимы на 5 %-м уровне. Серым цветом на рисунке показан разброс модельных оценок — область, в которую попадает 75 % средних модельных значений (зона между 12,5 и 87,5 процентилями).

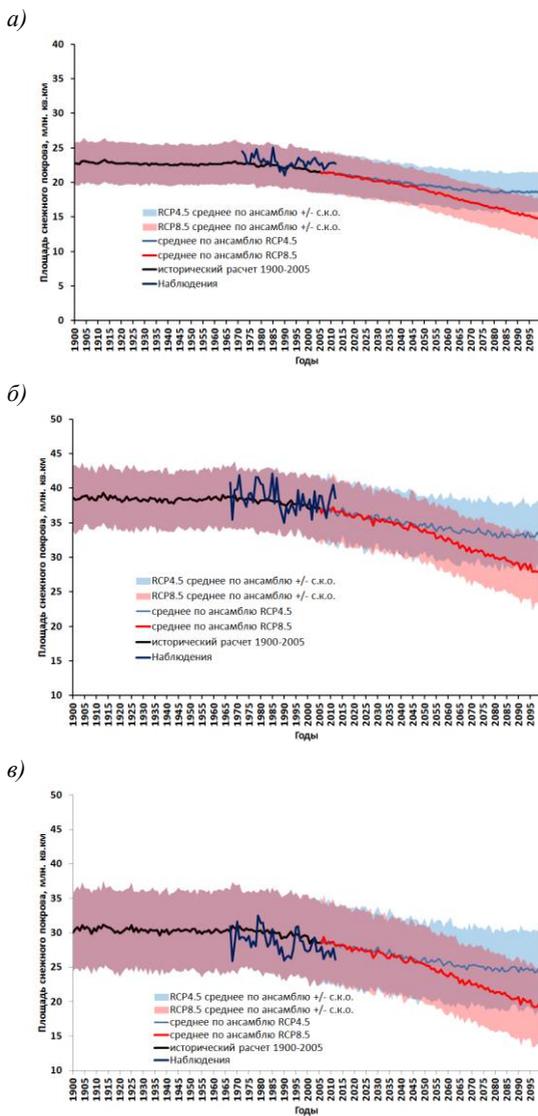


Рис. 12. Эволюция площади снега (млн km^2) в XX—XXI вв. (сценарии RCP4.5 RCP8.5).

а) среднегодовая площадь снега; б) площадь снега в марте;
в) площадь снега в апреле (Павлова и др., 2013).

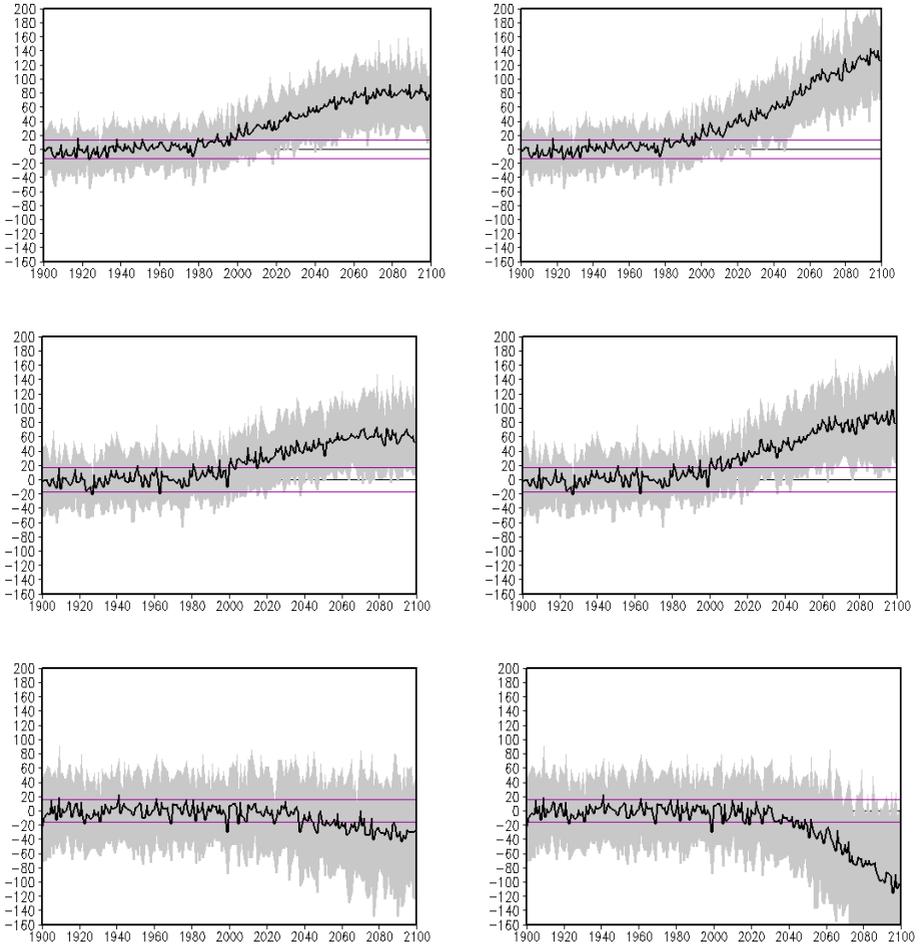


Рис. 13. Изменение риска весенних паводков на водосборах сибирских рек в XX—XXI вв. по ансамблю моделей СМIP5: разность интегральной массы снега на водосборе между мартом и маем, (Гт) для сценариев RCP4.5 (слева) и RCP8.5 (справа) на водосборах рек Лена (вверху), Енисей (в середине), Обь (внизу).

Как видно из модельных расчетов, на водосборе Лены и в меньшей степени на водосборе Енисея с конца XX века значительно

увеличивается масса тающего снега, что способствует возникновению высоких паводков и увеличению риска наводнений. Этого не происходит на водосборе Оби. Подобный результат был получен и в моделях СМIP3 (Kattsov et al., 2008).

Анализ современного состояния и эволюции площади многолетней мерзлоты, полученных непосредственно по модельным данным о температуре почвы, затруднителен в связи с тем, что в климатических моделях для описания процессов на поверхности и в глубине почвы используются сильно различающиеся (как по числу уровней и глубине почвы, так и по физическим процессам) почвенные модели.

Расчеты эволюции площади многолетней мерзлоты и термического состояния грунтов в XXI веке, выполненные с помощью модели теплопереноса в грунтах, разработанной в ГГО (Malevsky-Malevich et al., 2001; Малевский-Малевич и др., 2005), включали в качестве входной информации данные о температуре поверхности и высоте снежного покрова, полученные в расчетах с 28 моделями СМIP5. Расчеты показали, что положение условной границы зоны многолетней мерзлоты (рис. 14) зависит от выбранного сценария радиационного воздействия, преимущественно, для конца XXI века. К концу века, в случае реализации сценария RCP8.5, граница зоны значительно смещается к северу, более того, практически не остается таких ячеек модельной сетки, в которых мерзлота была бы получена во всех моделях. Площадь, занятая приповерхностной многолетней мерзлотой на территории РФ, сократится к середине XXI века по сравнению с базовым периодом на 20 ± 7 % при сценарии RCP4.5 и на 25 ± 8 % при сценарии RCP8.5, в конце XXI века сокращение составит 31 ± 12 % и 56 ± 18 % для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно, в Северном полушарии сокращение к середине XXI века составит 24 ± 7 % и 30 ± 8 %, в конце XXI века — 34 ± 11 % и 60 ± 14 % для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно (Павлова и др., 2013). Относительное уменьшение площади приповерхностной многолетней мерзлоты к концу XXI века, рассчитанное непосредственно по оценкам 18 моделей СМIP5 для сценариев RCP4.5 и RCP8.5, составило 15—87 % и 30—99 % соответственно (Koven et al., 2013)..

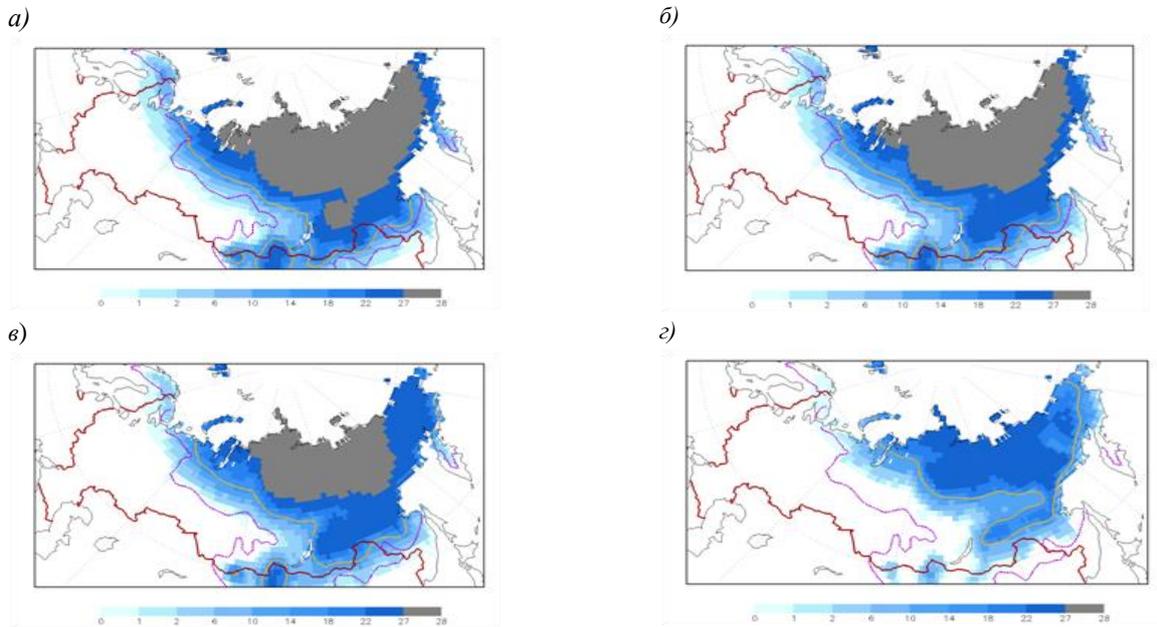


Рис. 14. Площадь, занятая мерзлотой в верхнем (3.3 м) слое почвы для середины и конца XXI века по данным расчетов на базе 28 климатических моделей по двум сценариям RCP4.5 (а, в) и RCP8.5(б, г). В каждой ячейке сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ различными цветами показано количество моделей, в которых для этой ячейки осредненная за период 2041—2060 (а, б) и 2080—2099(в, г) гг. среднегодовая температура грунта на глубине 3,3 м не превышает 0°C . Желтая линия показывает условную расчетную границу зоны многолетней мерзлоты, определяемую по положению среднегодовой изотермы 0°C на глубине 3.3 м, осредненной по ансамблю моделей, фиолетовая линия – современная наблюдаемая граница многолетней мерзлоты (Brown et al., 1997, 1998; Павлова и др., 2013).

Расчеты почвенно-мерзлотного индекса для конца XXI века показывают, что при реализации сценария RCP4.5 сохранение приповерхностной мерзлоты в границах современной зоны прерывистой мерзлоты маловероятно, а при реализации сценария RCP8.5 условия, благоприятные для существования многолетней мерзлоты, сохранятся на территории России только в Арктике и на Восточно-Сибирском нагорье (Slater and Lawrence, 2013). Качественно этот результат согласуется с результатом, полученным в описанных выше расчетах с моделью теплопереноса в грунтах ГГО, поскольку именно в указанных областях большинство расчетов показывают наличие мерзлоты в верхнем слое грунта

3.5 Морской лед в Арктике

Модели CMIP5 так же, как и модели CMIP3, расчеты которых лежали в основе ОД1, однозначно указывают на сокращение площади морского льда в Арктике на протяжении XXI века. По сравнению с CMIP3, в среднем по ансамблю CMIP5 скорость сокращения площади льда в Северном полушарии летом в XXI веке возросла, что позволило ряду исследователей (Stroeve et al., 2012; Wang and Overland, 2012) говорить о возможности исчезновения многолетнего льда в Арктике уже в первой половине этого века, тогда как в ансамбле CMIP3 лишь несколько моделей давали исчезновение морского льда в Арктике в конце XXI в. для одного из «агрессивных» сценариев SRES — A2. Интенсивность сокращения площади льда зависит от сценария радиационного воздействия. Наиболее значительное сокращение площади льда, особенно в теплый период, отмечается для сценария RCP8.5 (рис. 15). Для относительно «мягкого» сценария RCP2.6 площадь морского льда в Арктике практически стабилизируется, хотя и для этого сценария некоторые модели дают превращение ледяного покрова Северного Ледовитого океана в сезонный — начиная с середины XXI века. Используя в качестве ориентировочного критерия освобождения Арктики от многолетнего морского льда в теплый

период величину площади льда 1 млн км², можно в первом приближении оценить перспективу «безледного» океана для трех рассматриваемых сценариев (рис. 16).

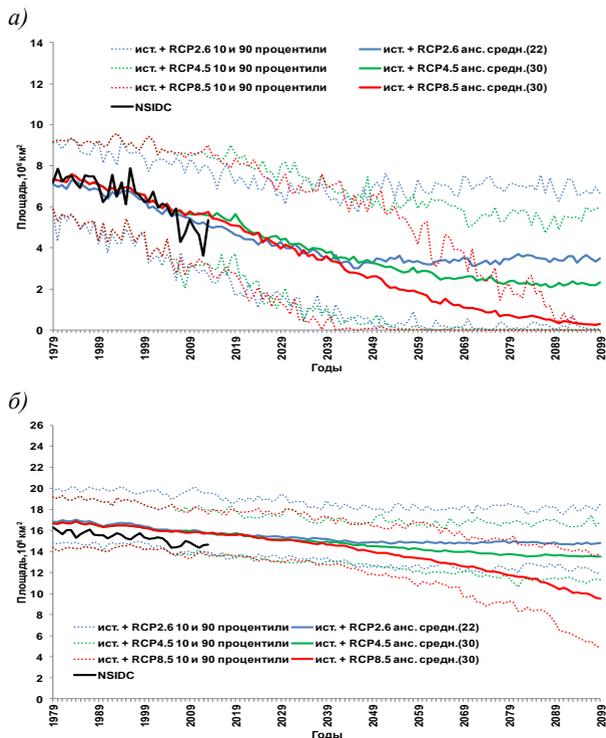


Рис. 15. Эволюция площади морского льда в период 1979—2099 гг. в Северном полушарии в сентябре (а) и феврале (б) по данным моделей СМIP5 для трех сценариев RCP: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 (голубая, зеленая и красная сплошные линии соответственно), а также межмодельный разброс в пределах 10-й и 90-й перцентилей (голубая, зеленая и красная пунктирные линии соответственно).

Для периода 1979—2005 гг. в каждом ансамбле сценарному расчету предшествует ретроспективный (“ист.”) расчет⁷.

⁷ Несовпадение ансамблей в период 1979—2005 гг. как в средних значениях, так и в границах межпроцентильного разброса объясняется различием количества членов ансамблей. Это несовпадение в известной мере характеризует зависимость

К концу XXI века в Арктике площадь льда в годовом минимуме (сентябрь) становится меньше 1 млн км² по оценкам большинства моделей CMIP5 для сценария RCP8.5 и по оценкам менее половины моделей при условии реализации сценария RCP4.5; при сценарии RCP2.6 менее трети моделей дают сентябрьскую площадь льда ниже указанного порогового значения.

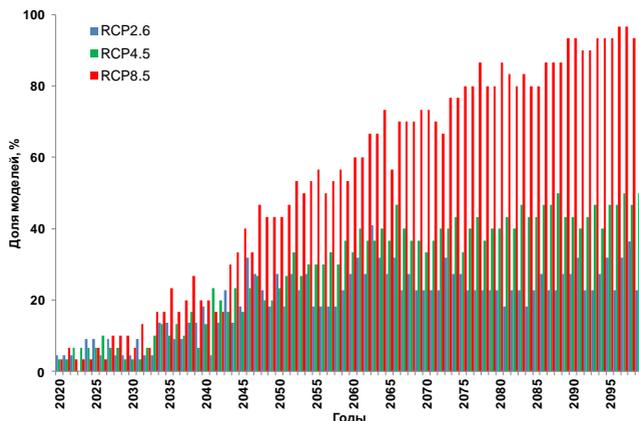


Рис. 16. Доля моделей (в процентах от общего числа моделей в ансамбле) CMIP5, в которых площадь морского льда в Северном полушарии в сентябре в период 2020—2099 гг. сократилась до 1 млн км² и менее, по данным 22 моделей для сценария RCP2.6 (синие столбцы), 30 моделей для сценария RCP4.5 (зеленые столбцы) и 30 моделей RCP8.5 (красные столбцы). (Павлова и Катцов, 2013).

Следует отметить, что речь идет не о полном исчезновении морского льда в Северном Ледовитом океане, а лишь о превращении многолетнего ледяного покрова океана в сезонный. Сокращение зимней площади морского льда в Арктике в XXI веке не столь велико. Межмодельный разброс оценок площади льда в моделях CMIP5 остается, как и по оценкам CMIP3, весьма значительным. Он

полученных в настоящем исследовании результатов от количества членов рассматриваемых ансамблей моделей.

обусловлен как собственной изменчивостью климатической системы, так и систематическими погрешностями отдельно взятых моделей. В научном сообществе предпринимаются попытки уточнить оценки будущих изменений климата и, в частности, изменений ледяного покрова Мирового океана с помощью дискриминации климатических моделей, формирующих ансамбль. Однако консенсус в отношении пригодных для этого подходов и критериев в настоящее время отсутствует.

Выводы

Изменения характеристик климата на территории России, полученные по ансамблю наиболее продвинутых сейчас климатических моделей, качественно согласуются с оценками моделей предыдущего поколения. Небольшие количественные различия между оценками моделей из ансамблей разного поколения обусловлены, преимущественно, расхождениями между сценариями SRES и пришедшими им на смену новыми сценариями RCP. В то же время с новыми моделями климата сделан значительный шаг в направлении оценки неопределенностей будущих изменений климатических характеристик. Это стало возможным благодаря тому, что в проекте CMIP5 представлено большее, чем в CMIP3, число моделей, включающих более детальное описание климатообразующих процессов. Непротиворечивая картина эволюции климата России, полученная в рамках двух последовательных оценочных докладов Росгидромета по двум разным поколениям климатических моделей и разным сценариям, в целом свидетельствует о преемственности подходов к моделированию климата, выработанных за последние 30 лет, и неизменности научных представлений о роли антропогенного вклада в глобальное потепление.

Влияние глобального потепления на климат России будет выражаться, главным образом, в формировании в большинстве федеральных округов более мягкого и влажного климата по сравнению с последними десятилетиями. Смягчение зимнего термического режима и рост осадков в традиционно «холодных»

районах страны (северный Урал, Центральная и Восточная Сибирь) повлекут за собой увеличение весеннего снеговозраста и, как следствие, осложнят паводковую обстановку на крупнейших реках России в период снеготаяния. При сохранении глобальных тенденций, все большее число регионов расположенных на юге умеренных широт начнут подвергаться засухам и будут страдать от экстремально высоких температур в летний период. Если до конца XXI века такие условия могут коснуться лишь сравнительно небольших по площади территорий на юге России, включая северный Кавказ и юг Сибири, то на рубеже текущего и следующего веков засушливость климата может создать целую серию новых угроз развитию многих регионов страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. (2012). Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. — Обнинск: ФБГУ «ВНИГМИ-МЦД». 194 с.

Кароль И. Л. (1988). Введение в динамику климата Земли. — Л.: Гидрометеоздат, 224 с.

Катцов В. М., Говоркова В. А. (2013). Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. Вып. 569. С. 76—98.

Малевский-Малевич С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Павлова Т. В. (2005). Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. Т. IX. № 3. С. 36—44.

ОД_РФ-1 (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. — Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 225 с.

Павлова Т. В., Катцов В. М. (2013). Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 // Труды ГГО. Вып. 568. С. 7—25.

Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П. В., Говоркова В. А. (2013). Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений // Труды ГГО. Вып. 569. С. 38—61.

Школьник И. М., Мелешко В. П., Ефимов С. В., Стафеева Е. Н. (2012). Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине 20 века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология. № 2. С. 5—23.

Bengtsson L., Hodges K. I. and Keenlyside N. (2009). Will extratropical storms intensify in a warmer climate // *Journal of Climate*. 22. P. 2276—2301.

Van Vuuren D., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview *Climatic Change*. 27 p. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.

Hibbard K., van Vuuren D., Edmonds J. (2011). A primer on the Representative Concentration Pathways (RCPs) and the coordination between the climate and integrated assessment modeling communities // *CLIVAR Exchanges*. № 56. V. 16. № 2. P. 12—14.

IPCC. Climate change (2007). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds.). — Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. 996 p.

Kattsov V., Govorkova V., Pavlova T., Sporyshev P. (2008). Arctic river runoff in the context of global warming — Projections with the state-of-the-art global climate models, WCRP/SCAR/IASC // *Climate and Cryosphere Newsletter*. Ice and Climate News. 11.

Koven C. D., Riley W. J., Stern A. (2013). Analysis of Permafrost Thermal Dynamics and Response to Climate Change in the CMIP5 Earth System Models // *J. Climate*. 26. P. 1877—1900. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00228.1>.

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

Meinshausen M., Smith S. J., Calvin K. V., Daniel J. S., Kainuma M. L. T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S. A., Raper C. B., Riahi K., Thomson A. M., Velders G. J. M. and van Vuuren D. (2011). The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their Extension from 1765 to 2300 // *Climatic Change (Special Issue)*. Doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.

Pinto J. G., Ulbrich U., Leckebusch C., Spanghel T., Reyers M., Zacharias S. (2007). Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM // *Clim. Dyn.* 29. P. 195—210. Doi: 10.1007/s00382-007-0230-4.

Randalls S. (2010). History of the 2 degrees C climate target // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 1 (4). P. 598—605. 10.1002/wcc.62.

Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. (2012). Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates // *Nature Climate Change*. V. 2. P. 248—253.

Slater A. G., Lawrence D. M. (2013). Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models // *J. Climate*. 26. P. 5608—5623. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00341.1>.

Stroeve J. C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W. N. (2012). Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // Geophysical Research Letters. V. 39. L16502. Doi: 10.1029/2012GL052676.

Wang M., Overland J. E. (2012). Summer Arctic sea ice will be gone sooner or later — an update from CMIP5 models // Geophysical Research Letters. 39. L18501. Doi: 10.1029/2012GL052868.

Wild M. (2009). Global dimming and brightening: A review // Journal of Geophysical Research. V. 114. D00D16. Doi: 10.1029/2008JD011470.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ НА ПОДВЕТРЕННОМ СКЛОНЕ ГОРНОГО ХРЕБТА (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО СКЛОНА ХРЕБТА АИБГА)

Г. Б. Пигольцина, Н. А. Зиновьева

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

Поступила в редакцию 14.10.2014

Введение

Сведения о режиме ветра в условиях горного рельефа имеют большое значение при решении таких важных практических задач, как распространение загрязнения воздуха в горных долинах, распространение лесных пожаров, а также при освоении территорий под горнолыжные комплексы и их метеорологическом обслуживании. Особенно важен учет скорости ветра при проведении спортивных соревнований на высокогорных трассах. Необходимость в решении этих вопросов возникла в связи с выполнением работ по гидрометеорологическому обеспечению Олимпийских и Паралимпийских зимних игр «Сочи-2014».

Горный кластер проведения Олимпийских игр расположен на южном макросклоне Большого Кавказа в сложных физико-географических условиях и представляет собой горный район со значительной неоднородностью подстилающей поверхности. Несмотря на то, что Кавказ относится к наиболее изученным в климатическом отношении горным районам (Занина, 1961), сложное строение рельефа создает определенные трудности в оценке пространственного распределения климатических характеристик, и особенно ветровых.

В настоящее время достаточно детально изучен режим ветра в условиях холмистого рельефа и получены количественные значения микроклиматической изменчивости скорости ветра для разно ориентированных по отношению к ветровому потоку склонов открытых возвышений с небольшими относительными превышениями (Микроклимат, 1962; Микроклимат, 1967; Романова, 1977; Романова и др., 1983).

Скорость ветра в горах зависит от барьерного эффекта горных хребтов, который наиболее выражен, когда хребты высоки и непрерывны и когда натекают воздушные массы устойчивого направления (Барри, 1984; Varru, 2008). Именно такими условиями характеризуется северный склон хребта Аибга, на котором расположены горнолыжные олимпийские трассы. Однако барьерные эффекты хребтов горных систем до настоящего времени детально не исследованы из-за недостатка данных наблюдений за ветром в горах. Ликвидировать этот пробел отчасти позволили метеорологические наблюдения, проводившиеся на северном склоне хребта Аибга в 2009—2014 гг. при подготовке к Олимпийским играм.

Используемые данные

В качестве исходной информации использовались данные наблюдений снеголавинной станции Аибга, расположенной на вершине хребта Аибга на высоте 2225 м, и полученные авторами статьи результаты климатической обработки метеорологических наблюдений двенадцати автоматических метеостанций, установленных в районе спортивных объектов горного кластера на разных высотах над уровнем моря. Одна из этих станций — Ветровая, расположена, также как и станция Аибга, на гребне хребта на высоте 2320 м, остальные — на склоне.

Для получения закономерностей изменения скорости ветра с высотой на подветренном склоне горного хребта использовались данные наблюдений за период с декабря по март. В теплый период года на барьерный эффект хребта будет оказывать влияние активизирующаяся в это время горно-долинная циркуляция, при

которой ночью преобладают ветры склонов (дующие вниз по склону), днем — долинные (воздушные потоки, восходящие по склону).

Направление ветра на гребне хребта

По данным наблюдений (в среднем за 6 лет) на станциях Аибга и Ветровая преобладающими в течение всего года являются ветры южных (Ю) и юго-западных (ЮЗ) направлений. В целом за год повторяемость Ю и ЮЗ ветров составляет соответственно 56,5 и 16,9 %, т. е. в сумме превышает 73%. Число штилей за год составляет всего 4 %. Преобладающим направлениям ветра соответствуют и наибольшие скорости: при Ю направлении скорость ветра составляет в среднем 4,5 м/с, при ЮЗ — 4,0 м/с.

На рис. 1 представлены средние за указанный период повторяемости (%) направлений ветра (розы ветров) в феврале. За 100 % принимается число случаев направлений ветра без учета штилей. Розы ветров для обеих станций наглядно показывают, что и в зимнее время года на вершине хребта Аибга преобладают ветры южного и юго-западного направлений.

Направление ветровых потоков в отдельные годы в основном соответствует среднему многолетнему распределению. Кроме того, на станциях Аибга и Ветровая, и в дневное, и в ночное время преобладают ветры одних направлений, а штили наблюдаются редко, что связано с расположением станций на гребне хребта, где сохраняются основные потоки.

Анализ режима направления ветра показывает, что северный склон хребта Аибга, который имеет преимущественно северную и северо-восточную ориентацию, является подветренным по отношению к устойчивым преобладающим направлениям воздушных потоков, поэтому скорость ветра на склоне в зимнее время года будет в основном зависеть от барьерного эффекта хребта.

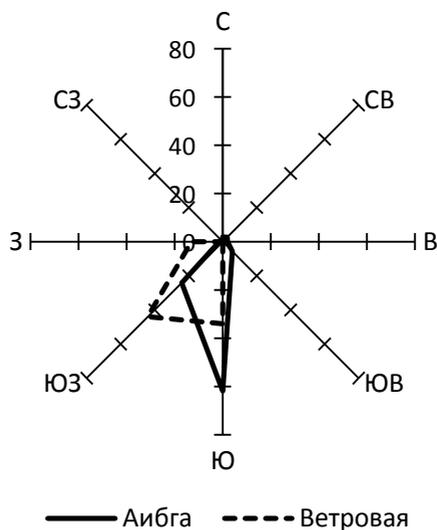


Рис. 1. Средняя многолетняя повторяемость (%) направлений ветра в феврале на станциях Аибга и Ветровая.

Вертикальные профили скорости ветра на подветренном склоне горного хребта

Для выявления закономерностей изменения скорости ветра с высотой на северном склоне хребта Аибга рассматривались два вертикальных профиля, расположенных в районах спортивных комплексов «Роза Хутор» и «Альпика-сервис», с верхними точками на метеостанциях Ветровая и Аибга соответственно.

Под влиянием барьерного эффекта хребта скорость ветра на склоне резко уменьшается от вершины к подножью. В нижней половине склона в районах расположения комплексов «Альпика-сервис» и «Роза Хутор» скорость ветра будет примерно одинакова, поскольку оба комплекса примыкают к узкому участку долины. Однако в верхних частях склона распределение скорости ветра с высотой будет несколько различаться в зависимости от высоты хребта. В районе комплекса «Альпика-сервис» вершина хребта ниже,

чем в районе комплекса «Роза Хутор». Поэтому скорость ветра на станции Аибга, расположенной на высоте 2225 м практически на вершине хребта, будет больше, чем скорость ветра на этой же высоте в районе Роза Хутор, т. к. здесь высота хребта превышает 2300 м и уровень 2225 м располагается уже не на вершине, а в верхней части подветренного склона. На рис. 2 представлены высотные профили средней за февраль 2013 г. скорости ветра для комплексов «Роза Хутор» и «Альпика-сервис». Скорость ветра в зимние месяцы различается незначительно и профили за каждый отдельный месяц практически совпадают.

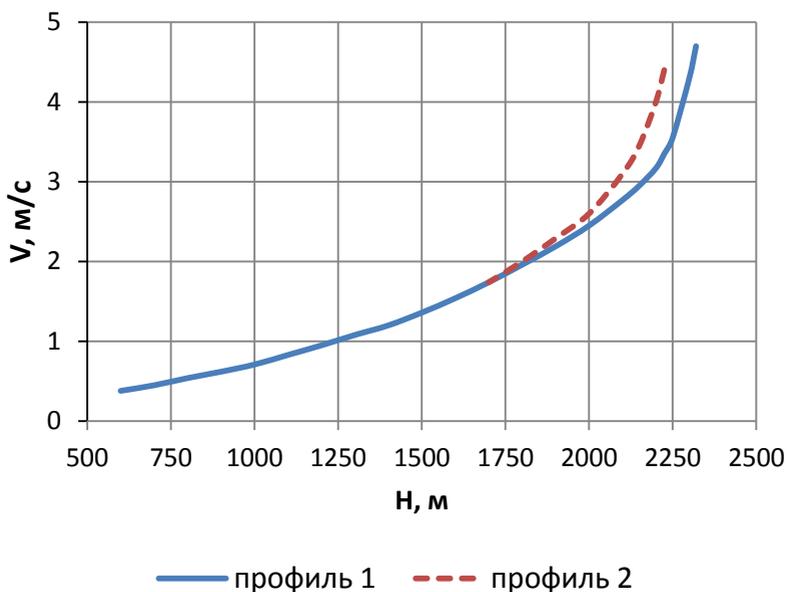


Рис. 2. Изменение скорости ветра (V) с высотой (H) в районе спортивных комплексов «Роза Хутор» (профиль 1) и «Альпика-сервис» (профиль 2).

Абсолютные значения скоростей ветра изменяются по годам, но закономерности их распределения вдоль склона более устойчивы во времени. Это подтверждается высотными профилями скоростей ветра,

полученными по данным наблюдений за отдельные годы, которые практически совпадают.

Привязка скорости ветра на разных высотах к режимным данным наблюдений опорной метеостанции

Устойчивость во времени закономерностей пространственного распределения климатических показателей (относительных различий микроклимата) позволяет конкретизировать режимную метеорологическую информацию для отдельных участков территории (Микроклимат, 1962; Микроклимат, 1967; Пигольцина, 2009; Пигольцина и др., 2010). Поэтому, чтобы для северного склона хребта Аибга определить среднюю месячную скорость ветра на различной высоте над уровнем моря в зимние месяцы в любой другой год, нужно выполнить «привязку» (определить микроклиматические поправки) к режимным данным наблюдений опорной метеостанции. В качестве опорной метеостанции должна быть выбрана станция, расположенная в верхней части хребта, для которой характерны большие скорости ветра. Станции в долине в данном случае не могут быть использованы в качестве опорных, т. к. отличаются малыми скоростями ветра и большим числом штилей, т. е. в долине может быть штиль, а на высотах в это время – ветер со значительными скоростями. Таким образом, в данном случае опорной станцией может служить как станция Аибга, так и станция Ветровая.

Методика определения микроклиматических поправок и привязка их к данным наблюдений опорной станции заключается в следующем. На основе полученных выше зависимостей (рис. 2) определяется скорость ветра на разных высотных уровнях (V_n) для комплексов «Роза Хутор» (профиль 1) и «Альпика-сервис» (профиль 2). Затем рассчитываются микроклиматические поправки (коэффициенты K_v) для перехода от значений скорости ветра на опорной станции, для которой K_v принимается за единицу, к значениям скорости ветра на других высотах данного склона. Для примера в качестве опорной возьмем станцию Аибга (табл. 1).

Таблица 1

Скорость ветра на высотах и переходные коэффициенты K_v для комплексов «Роза Хутор» (профиль 1) и «Альпика-сервис» (профиль 2)

Высота, м	Скорость ветра, м/с		K_v	
	профиль 1	профиль 2	профиль 1	профиль 2
600	0,4	0,4	0,09	0,09
800	0,6	0,6	0,12	0,12
1000	0,8	0,8	0,16	0,16
1200	1,0	1,0	0,21	0,21
1400	1,3	1,3	0,27	0,27
1600	1,7	1,7	0,35	0,35
1800	2,1	2,1	0,44	0,45
2000	2,6	2,8	0,55	0,58
2200	3,5	4,4	0,74	0,92
2225	3,8	4,8	0,79	1,00
2300	4,8		1,01	
2320	5,0		1,06	

В таблице жирным шрифтом выделены высоты и значения показателей для опорной станции Аибга (высота 2225 м) и станции Ветровая (высота 2320 м).

Таким образом, чтобы рассчитать среднюю месячную скорость ветра на разных высотах для конкретного года (V_i), нужно среднюю месячную скорость (наблюденную или прогнозируемую) на станции Аибга (V) умножить на коэффициент K_v , соответствующий данной высоте и району («Роза Хутор» или «Альпика-сервис»):

$$V_i = V \cdot K_v \quad (1)$$

Определив значения V_i для нескольких высот, получают вертикальный профиль скорости ветра для указанных районов.

В качестве опорной метеостанции можно использовать станцию Ветровая. Методика расчета микроклиматических поправок (коэффициентов K_v) та же, что и приведенная выше для станции

Аибга, только в данном случае за единицу принимается K_v для станции Ветровая.

Формализация установленных закономерностей изменения скорости ветра с высотой на подветренном склоне горного хребта

Выше рассматривался вопрос расчета микроклиматических поправок (коэффициентов K_v) и привязки их к данным опорной метеостанции при условии известного вертикального профиля скорости ветра, определенного по данным натурных наблюдений для конкретных участков склона. На других участках данного склона, также как на подветренных склонах других горных хребтов, вертикальный профиль скорости ветра будет отличаться от профилей, приведенных на рис. 2, особенно в верхней части склона из-за изменения высоты хребта. Отсутствие данных наблюдений на этих участках ограничивает возможность использования коэффициентов K_v , приведенных в табл. 1, т. е. коэффициенты будут другие. Однако закономерности изменения скорости ветра от вершины склонов к подножью сохраняются, что дает возможность формализовать установленные закономерности. Процесс формализации предполагает применение расчетных методов для получения количественных значений коэффициентов K_v , позволяющих рассчитывать вертикальные профили скорости ветра на подветренных склонах различных горных хребтов при дефиците метеорологической информации.

Задача решалась следующим образом. На основе полученных выше закономерностей изменения скорости ветра на северном склоне хребта Аибга было установлено, что на разных участках склона с разной высотой хребта, но при одинаковом удалении от вершины хребта вниз по склону, скорость ветра в процентном отношении меняется на одну и ту же величину независимо от ее значения на вершине. Такая закономерность сохраняется во все месяцы зимнего периода рассмотренного ряда лет.

Исходя из этого, были рассчитаны коэффициенты K_{v0} , характеризующие изменение скорости ветра на склоне в зависимости

от различного расстояния конкретных высотных уровней от вершины хребта, т.е. от относительных превышений (ΔH). Расчеты выполнены для рассмотренных выше участков Роза Хутор (профиль 1) и Альпика-сервис (профиль 2). Результаты расчета представлены в табл. 2 и на рис. 3. Рисунок наглядно показывает, что для участков склона, имеющих разную высоту хребта и соответственно различные вертикальные профили, коэффициенты K_{vo} практически совпадают. Наибольшие по абсолютной величине различия (0,02-0,03) относятся к самой верхней части подветренного склона – зоне завихрения воздушных потоков (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты K_{vo} для разных относительных превышений (ΔH) вершины хребта над различными высотными уровнями подветренного склона

ΔH , м	K_{vo}		ΔK_{vo} (разность профилей 1 и 2)
	профиль 1	профиль 2	
50	0,83	0,86	-0,03
100	0,72	0,74	-0,02
200	0,61	0,61	-0,01
300	0,55	0,54	0,01
500	0,44	0,43	0,01
700	0,34	0,33	0,01
900	0,26	0,25	0,01
1100	0,20	0,19	0,01
1300	0,15	0,14	0,01
1500	0,11	0,11	0,01
1700	0,09		

Таким образом, полученные коэффициенты K_{vo} можно использовать для определения средней месячной скорости ветра на разных высотах подветренных склонов различных горных хребтов, если известна скорость ветра на вершине хребта или хотя бы на одной из высот в верхней части хребта, где скорости сравнительно высоки. При отсутствии данных наблюдений, скорость ветра на уровне

вершины хребта можно определить различными косвенными методами, например, по скорости ветра в свободной атмосфере или по данным репрезентативной метеостанции в предгорной зоне, используя общепринятую степенную формулу, и др.

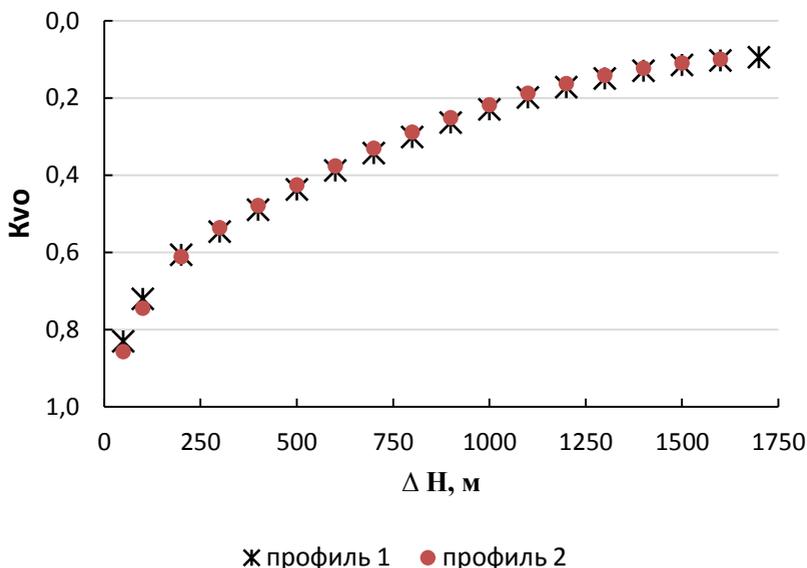


Рис. 3. Изменение коэффициентов K_{vo} в зависимости от относительных превышений (ΔH) вершины хребта над различными высотными уровнями склона для разных вертикальных профилей скорости ветра.

Выполненные исследования также показали, что коэффициенты K_{vo} пригодны для расчетов не только средних месячных скоростей ветра, но и скоростей других временных осреднений. На рис. 4 представлено изменение коэффициентов K_{vo} в зависимости от относительных превышений (ΔH) для скоростей ветра среднего месячного, среднего суточного и срочного разрешения. Пример приведен для участка Роза Хутор (профиль 1). Средние месячные значения K_{vo} соответствуют представленным выше в табл. 2, которые характеризуют среднее многолетнее распределение скорости ветра на

склоне в зимний период. K_{vo} средние суточные и K_{vo} в срок 13 часов рассчитаны по данным наблюдений за 20 февраля 2014 года. Как следует из рис. 4, коэффициенты K_{vo} , рассчитанные для разных временных интервалов (месяц, сутки, срок), довольно близки по величине, что показывает их универсальность.

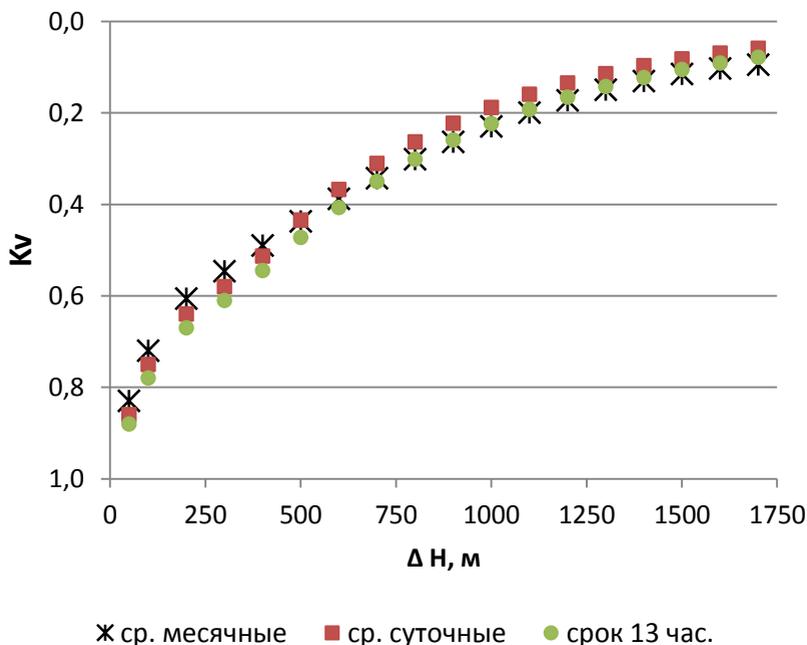


Рис. 4. Изменение коэффициентов K_{vo} в зависимости от относительных превышений (ΔH) вершины хребта над различными высотными уровнями склона для разных временных осреднений скорости ветра.

Заключение

Анализ данных наблюдений, проводившихся в течение нескольких лет на разных высотах над уровнем моря в горном кластере территории проведения Олимпийских игр в Сочи, позволил не только выявить вертикальную структуру скорости ветра на северном склоне хребта Аибга, но и формализовать установленные закономерности

изменения скорости ветра с высотой на подветренном склоне горного хребта. Результаты выполненных исследований позволяют рассчитывать вертикальные профили скорости ветра на подветренных склонах различных горных хребтов при дефиците метеорологической информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барри Р. Г.* (1984). Погода и климат в горах. — Л.: Гидрометеиздат. 311 с.
- Занина А. А.* (1961). Климат СССР / Кавказ. Вып. 2 — Л.: Гидрометеиздат. 289 с.
- Микроклимат СССР (1967) / Под ред. И. А. Гольцберг — Л.: Гидрометеиздат. 286 с.
- Микроклимат холмистого рельефа и его влияние на сельскохозяйственные культуры. (1962). — Л.: Гидрометеиздат. 250 с.
- Пигольцина Г. Б.* (2009). Обоснование необходимости и принципы учета мезо- и микроклимата при комплексных оценках природных ресурсов для различных секторов экономики// Труды ГГО. Вып. 560. С.89—115.
- Пигольцина Г. Б., Зиновьева Н. А.* (2010). Микроклиматическое районирование территории проведения Зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» // Общество. Среда. Развитие. № 1. С. 165—170.
- Романова Е. Н.* (1977). Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. — Л.: Гидрометеиздат. 279 с.
- Романова Е. Н., Мосолова Г. И., Береснева И. А.* (1983). Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. — Л.: Гидрометеиздат. 245 с.
- Barry R. G.* (2008). Mountain Weather and Climate. — Cambridge, UK: Cambridge University Press. 506 p.

**ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ
МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ГРОЗ**

И. И. Кононов, А. В. Снегуров, В. С. Снегуров, И. Е. Юсупов

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

Поступила в редакцию 19.08.2014
Поступила после доработки 15.09.2014

Совершенствование старых и разработка новых оперативных средств обнаружения и локации как отдельных молниевых разрядов, так и грозовых комплексов различного пространственно-временного масштаба (мезомасштабный комплекс, грозовой очаг, отдельная грозовая конвективная ячейка) является объектом многих исследований, проводимых до настоящего времени. Наибольшее практическое применение для локации гроз в последние десятилетия получили многопунктовые системы местоопределения, среди возможных вариантов которых чаще всего используются *пеленгационные системы (ПСМ) и разностно-дальномерные системы (РДСМ)*. В зависимости от области рабочих частот упомянутые системы подразделяются на два больших класса. Техника и технология одного из них ориентируется на использование интервала частот 0,3...300 кГц, в котором сосредоточен абсолютный максимум спектральной плотности импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) большинства типов сильноточных компонент молниевых вспышек, развивающихся как между облаком и землей, так и внутри облаков. Это обстоятельство, а также малое затухание ЭМИ этого диапазона при распространении в волноводном канале Земля-ионосфера, обеспечивающее надежный прием его на расстояниях до нескольких тысяч километров, способствовали широкому

распространению систем этого класса для пассивной локации гроз и послужили основой создания радиотехнических средств наблюдения за грозами как в региональном, так и в глобальном масштабе в большинстве стран мира.

В настоящее время в России развернута многопунктовая разностно-дальномерная система местоопределения гроз, которая по аббревиатуре, используемой в отечественных публикациях известна как ГПС «Алвес 9.07» (Снегуров, 2010; Снегуров и др., 2012а, 2012б, www.lightnings.ru, www.grozy.ru). По типу применяемой аппаратуры и структуре размещения пунктов регистрации гроз ГПС «Алвес 9.07» во многом сходна с уже существующими системами, но отличается некоторыми конструктивными решениями, облегчающими и удешевляющими развертывание, настройку и эксплуатацию как отдельных пунктов, так и системы в целом. Система включает около 70 разнесенных пунктов. Зона ее оперативного обслуживания перекрывает всю Европейскую часть России и Урал. Рассмотрение точностных характеристик этой системы является основным объектом и целью настоящей работы.

В основе функционирования ГПС лежит использование минимально-избыточного четырехпунктового гиперболического алгоритма местоопределения (в последующем маркируемого как А4), обеспечивающего однозначное определение координат разрядов по разностям моментов прихода сигналов в разнесенные пункты системы. Наряду с этим рассматривается возможность использования трехпунктового алгоритма (маркируемого как А3), включение которого в состав решающего блока позволило бы улучшить другой важный параметр рассматриваемой системы — эффективность обнаружения как отдельных молниевых разрядов, так и грозовых очагов.

Точность местоопределения рассматриваемой системы определяется погрешностями временной привязки к сигналам, принимаемым в разнесенных пунктах. Известно довольно много различных способов такой привязки. В большинстве существующих версий РДСМ используется привязка по тем или иным характерным точкам (ХТ) либо непосредственно временных форм атмосфериков,

регистрируемых в разнесенных пунктах, либо их трансформант (в частности, взаимно-корреляционных функций). Основным аргументом в пользу выбора той или иной ХТ, является ее чувствительность к влиянию эффектов распространения, проявляющихся в том, что сигналы, принимаемые в разнесенных пунктах, проходят различные пути от источника излучения, испытывая заметную трансформацию форм при распространении. Это приводит к тому, что моменты их прихода, фиксируемые по той или иной ХТ, определяются с некоторой дополнительной задержкой (по отношению к фронту сигнала, распространяющемуся со скоростью света), зависящей от расстояния и параметров трассы распространения. Соответственно и разности времен прихода сигнала в разнесенные пункты будут измеряться с погрешностью, зависящей от этих факторов. Достаточно детальный анализ погрешностей временной привязки по разным характерным точкам атмосфериков, связанным с эффектами распространения, содержится в работе Кононова с соавторами (2011), в которой показано, что для типичных для большинства трасс Европейской части России значений проводимостей почвы $\sigma = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ См/м, наименьшие изменения испытывают ХТ, формируемые в пределах начальной части атмосферика. Так, абсолютные значения приращений параметра t_{ϕ} , характеризующего временное положение секущей, проходящей через заданные относительные уровни на фронте первой полуволны, на каждые 100 км увеличения дальности для указанного интервала проводимостей составляют соответственно 0,37...0,81 мкс. Соответствующие изменения других ХТ, формируемых в пределах первой полуволны (ее максимума, первого нулевого перехода после него), достигают 1,2...1,5 мкс.

В анализируемой ГПС привязка осуществляется по временному положению максимума первой полуволны сигнала, предварительно отфильтрованного фильтром нижних частот с граничной частотой 3 кГц. Такой фильтр, применяемый для эффективного подавления сетевых гармоник, оказывает «дифференцирующее» влияние на форму атмосферика и как бы подтягивает его первый максимум, используемый в ГПС в качестве ХТ, к его фронту. Поэтому как

характер, так и величина изменений дополнительной задержки этого параметра с расстоянием оказываются близкими к описанным выше изменениям параметра t_{ϕ} (Кононов и др., 2011).

Как следует из анализа форм атмосфериков, рассчитанных с учетом фильтрации в интервале расстояний от 100 до 2500 км, при использовании для местоопределения разрядов трех- или четырехпунктовых комбинаций, базовые расстояния которых не превышают 300...400 км, для обеспечения точности локации 1—2 км в пределах внутренних зон этих подсистем нет необходимости прибегать к введению поправок на распространение. С учетом высказанных соображений выбор конфигурации пунктов анализируемой ГПС и реализованный в ней способ привязки по максимуму первой полуволны представляется вполне оправданным. Однако при необходимости расширения оперативной зоны обслуживания за пределы ее внутренней области приходится включать в процедуру местоопределения пункты, разнесенные на расстояния более 1000 км (для сохранения приемлемого геометрического фактора). При этом коррекция временных отсчетов, формируемых по характерным точкам, становится необходимой.

Приведем некоторые оценки точностных характеристик ГПС, полученные по результатам обработки данных в грозовые сезоны 2013—2014 гг. В качестве независимого инструмента при проведении таких оценок были использованы данные локации грозовых очагов и отдельных разрядов, полученные европейской разностно-дальномерной системой Blitzortung (www.Blitzortung.de), находящейся в эксплуатации уже более 10 лет.

При обработке данных локации гроз за три грозовых дня лета 2013 года: 17 июля, 27 июля и 13 августа, в которые количество зарегистрированных атмосфериков составило соответственно 15153, 27687 и 20989, были выявлены два основных источника наиболее значительных погрешностей локации, присущих алгоритмам A3 и A4. Один из них возникает в случаях, когда пакет, содержащий временные отметки разных пунктов, идентифицируемые как принадлежащие одному разряду, в действительности включает моменты срабатываний от разрядов либо из разных грозовых очагов, либо от разных фаз

развития одной молниевой вспышки. Обычно оценки местоположений разрядов в таких случаях отображаются в виде изолированных точек, рассеянных на большом пространстве. Количество ошибок такого рода возрастает при снижении порога регистрации, к которому нередко прибегают для повышения эффективности обнаружения разрядов, либо в случае нахождения какого-либо пункта в непосредственной близости к зоне локальной грозовой активности (на удалениях менее 30 км от ее центра). За указанные выше грозовые дни количество ошибок этого типа в отдельные временные интервалы достигало 5...10 %.

Другой источник значительных систематических погрешностей местоопределения, выявленный в процессе обработки данных, связан с различным выбором номера полуволны (в пределах верно идентифицированного атмосферика), по которой осуществляется привязка. Ошибка определения разностей времен прихода сигналов в подобных случаях может достигать 20...50 мкс, приводя к погрешностям местоопределения, составляющим 15...20 км даже в зонах наивысшей точности локальных подсистем из пунктов, участвующих в формировании оценки координат. Количество подобных ошибок заметно возрастает для атмосфериков из грозовых очагов, находящихся во внешней части рабочей зоны системы, достигая в отдельные периоды 20...30 % от их общего числа.

Для уменьшения количества ложных тревог, связанных с ошибками идентификации и снижения доли ошибочных решений, обусловленных неверным выбором полуволн, используемых для привязки, был использован ряд простейших параметрических критериев. Как показали результаты обработки данных, применение параметрических критериев оказалось достаточно эффективным, однако привело к значительному (в разы) сокращению исходного массива поступающих на обработку идентификационных пакетов и, тем самым, к снижению другого важного (наряду с точностью) параметра системы — эффективности обнаружения. Но даже в этих случаях количество формируемых АЗ местоположений в полтора—два раза превышало количество оценок, полученных

системным алгоритмом А4, для которого эти критерии не применялись.

В грозовой сезон 2014 в состав ГПС был включён пункт, размещённый в Старом Петергофе, обеспечивающий регистрацию и сохранение форм атмосфериков, фиксируемых ГПС. Детальный анализ форм, регистрируемых аппаратурой в Петергофе и параметров синхронных сигналов, транслируемых в центр обработки из других пунктов системы, показал, что при их регистрации в пределах внутренних зон локальных подсистем из необходимого количества пунктов, участвующих в формировании координат, номера полуволн, как правило, определяются однозначно. Однако нередко эта полуволна по номеру не соответствует первой. Вследствие ее большей изрезанности, зависящей от дальности, величина погрешностей привязки, обусловленных распространением, оказывалась заметно большей, чем это следует из приведенных выше оценок. С целью уменьшения влияния такого рода ошибок был разработан специальный корректирующий алгоритм, основанный на минимизации величины среднеквадратичного отклонения оценок местоположений разряда, формируемых алгоритмом А3 для трехпунктовых комбинаций, которые могут быть образованы из набора пунктов, заявленных в идентификационном пакете. Центр кластера (положение очага) уточняется на каждом шаге минимизации. Минимизация осуществляется путем последовательного введения поправок к временным отсчетам с фиксированным шагом (0,1 мкс).

В качестве иллюстрации совместной работы Blitzortung и ГПС на рис. 1 приведена совмещенная картина пространственного распределения (в широтно-долготном представлении) разрядной активности, сформированная в течение часового интервала регистрации грозовой активности 27.07.2014 г. (00-01 UT). Из приведенной иллюстрации видно в целом неплохое совпадение положений грозовых очагов, сформированных обеими системами. Однако нас интересует прежде всего возможность использования Blitzortung в качестве инструмента для более качественной оценки характеристик анализируемой ГПС путем поимпульсного сопоставления координат синхронно зарегистрированных

атмосфериков. К сожалению, оперативные зоны обслуживания обеих систем перекрываются лишь своими внешними областями, в которых точность местоопределения оказывается в несколько раз ниже декларируемых значений (обычно соответствующих оптимальному расположению источников излучения во внутренних областях системы).

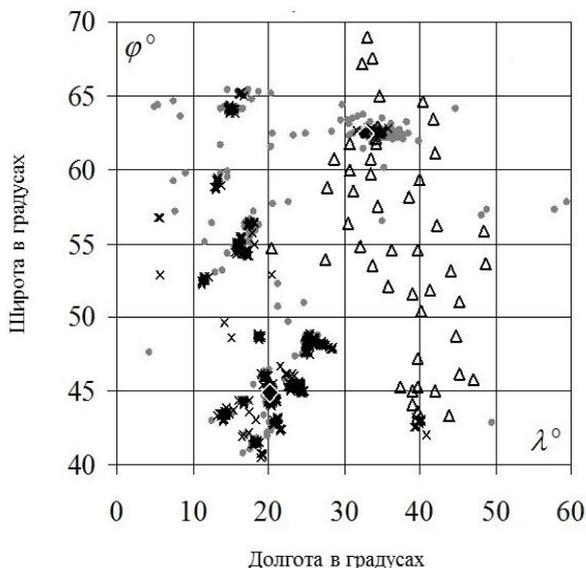


Рис.1. Пространственное распределение грозовых разрядов, зарегистрированных системами Blitzortung (крестики) и ГПС (серые точки) 27 июля 2014 г. часовой интервал 00—01 УТ. Положения пунктов ГПС отмечены треугольниками. Blitzortung зарегистрировано 2856 разрядов, ГПС — 650 разрядов.

Тем не менее, существует возможность косвенной оценки характеристик одной системы с использованием другой в качестве поверочного инструмента. В рассматриваемом случае из общей картины грозовой активности рис. 1 был выделен грозовой комплекс ГК_1, состоящий из нескольких мощных грозовых очагов, в более крупном пространственном масштабе представленный на рис. 2.

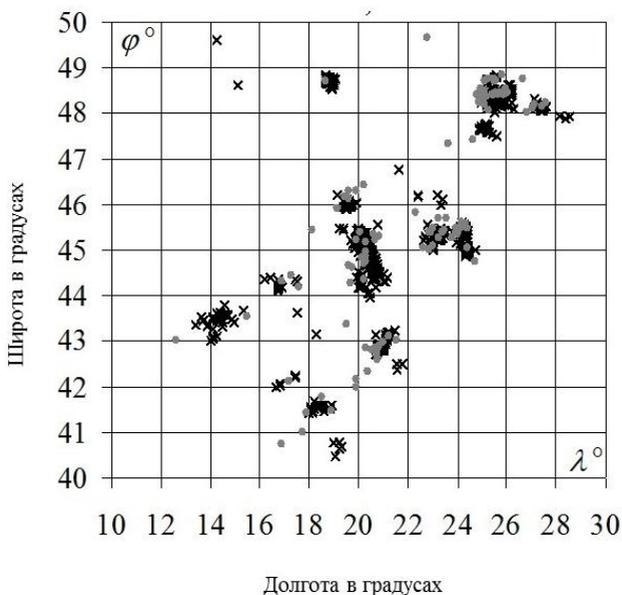


Рис. 2. Пространственное распределение грозовых разрядов, зарегистрированных в грозовом комплексе ГК_1 системами Blitzortung (крестики) и ГПС (серые точки) 27 июля 2014 г. часовой интервал 00—01 UT. Blitzortung зарегистрировано 1844 разрядов, ГПС (A4) — 109 разрядов.

Этот комплекс наряду с высокой грозовой активностью, продолжающейся в течение нескольких часов, интересен в том отношении, что он находится в пределах внутренней зоны Blitzortung, где точность местоопределения отдельных разрядов составляет 1...2 км. По отношению же к ГПС этот комплекс располагается во внешней части ее зоны обслуживания (на удалениях от 500 до 1500 км от границы, описывающей местоположение ее крайних пунктов), в которой точность локации разрядов вследствие влияния геометрического фактора оказывается почти на порядок хуже точности, реализуемой в пределах ее внутренней зоны. В силу этого обстоятельство сопоставление данных локации гроз и отдельных разрядов системами Blitzortung и ГПС в пределах ГК_1 может быть

использовано для косвенной оценки точности анализируемой системы. Эффективность обнаружения Blitzortung в области расположения ГК_1 также приближается максимальному значению, составляющему 90...95 % для разрядов облако-земля, в то время как для ГПС эффективность обнаружения в этой зоне по модельным оценкам не превышает 20 %. Это позволяет по соотношению количества разрядов, зафиксированных обеими системами в области расположения ГК_1, получить достаточно объективную (хотя также косвенную) оценку аналогичного параметра для ГПС. Из рассматриваемого комплекса удалось выделить 21 пару синхронных разрядов (для сопоставляемых систем) и получить оценку отклонения местоположений ГПС от соответствующих отметок Blitzortung, которая составила **22,3±12,6 км**. Будучи пересчитанной к внутренней зоне ГПС, это значение трансформируется в 8...10 раз меньшую величину.

Поимпульсное сопоставление позволило также оценить эффективность работы корректирующего алгоритма. Ее иллюстрирует рис. 3 на примере атмосферика зарегистрированного в момент 00:35:33.997966 в пункте 55 (Старый. Петергоф) и находящегося в пределах внутренней зоны ГПС. Идентификационный пакет, соответствующий этому разряду, содержит срабатывания от десяти различных пунктов. Как показывает анализ формы атмосферика и параметров первой и максимальной полуволн сигналов, зафиксированных в других пунктах и транслированных в центральный пункт обработки, все срабатывания произошли от одной (первой) полуволны. Вследствие погрешностей привязки в разных пунктах, имеет место значительный разброс местоположения разряда (рис. 3а), сформированных для различных трехпунктовых комбинаций алгоритма А3, достигающий почти 100 км. Результатом работы корректирующего алгоритма является компактный кластер, практически сжатый в точку, представленную на рис. 3б. При этом отклонение его центра от местоположения того же разряда, выделенного Blitzortung, составило **0,43 км**. Столь малое значение отклонения для данного атмосферика является, конечно, случайным,

поскольку погрешность Blitzortung в этой зоне более, чем на порядок превышает это значение.

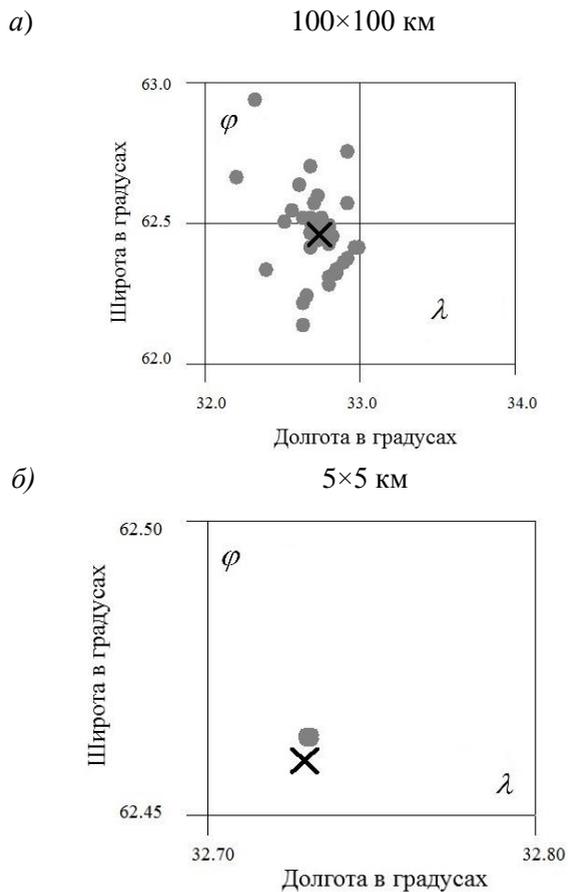


Рис. 3. Пример регистрации атмосферика во внутренней зоне ГПС 27 июля 2014 г. в момент времени 00:35:33.
Данные Blitzortung — крестики, ГПС — серые точки.

Таким образом, приведенное выше значение погрешности местоопределения ГПС можно рассматривать в качестве предварительной оценки ее точностной характеристики. Будучи пересчитанной в соответствии с известным геометрическим фактором во внутреннюю область оперативной зоны обслуживания этой системы, эта погрешность должна составить 2...3 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

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

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

<http://www.blitzortung.de>.

<http://www.lightnings.ru>

<http://www.grozy.ru>

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Л. И. Дивинский¹, Л. А. Майборода²

¹Российский государственный гидрометеорологический
университет

195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

E-mail: divinsky@rshu.ru

²Петровская академия наук и искусств

199198 Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, 34, 112

E-mail: geoobserver@yandex.ru

Поступила в редакцию 2.09.2014

Поступила после доработки 2.10.2014

Особенности радиоизлучения, возникающего при мелкомасштабных атмосферных электрических разрядах (Дивинский и др. 2004; Дивинский и др. 2013), позволяют считать, что оно может использоваться как предиктор для обнаружения зон пространства, потенциально молниепасных для летательных аппаратов. Выявление таких зон связано с определением координат каналов мелкомасштабных атмосферных электрических разрядов.

Изучение методов определения координат атмосферных разрядов и проблем построения грозопеленгационной сети Российской Федерации имеет давнюю историю, детально изложенную в работах В. С. Снегурова (Снегуров, 1997; Снегуров и др., 2004). Структурные особенности грозовых облаков также изучены достаточно подробно (Зашукаев, 1998; Стасенко и др., 2000). Существенный вклад в понимание процессов, происходящих в электрически активных облаках, был внесен коллективом авторов нескольких организаций (Довгалюк и др., 2008), сумевших объединенными усилиями осуще-

ствить математическое моделирование процессов, происходящих в осадкообразующих конвективных облаках. Результаты исследований совместной работы грозопеленгатора и метеорологической радиолокационной станции приведены в статье А. В. Снегурова с соавторами (2006). В серии работ В. Н. Морозова с соавторами результаты анализа многолетних теоретических и экспериментальных работ в области атмосферного электричества и проблем создания системы грозопеленгации, выполненных в ГГО (Морозов, 2000; Морозов и др., 2001; Морозов В. Н. и др., 2009).

Для создания аппаратного комплекса, определяющего местоположение источников мелкомасштабного излучения атмосферных разрядов, необходимо использовать частоты, где отсутствуют работающие радиостанции и мал уровень различных видов помех. Поэтому при проведении экспериментальных исследований были исключены диапазоны длинных, средних и коротких волн. Эти диапазоны заполнены работающими радиостанциями всех назначений (вещательными, связными, диспетчерскими и т. д.). Кроме того, наблюдаются менные окна, когда условия распространения радиоволн становятся благоприятными для приема сигналов дальних мешающих радиостанций.

Для исследований был выбран диапазон частот, в котором не должны наблюдаться сигналы, излучаемые передающими средствами. Такой является область частот 31,4—38 Гц, выделенная для работы усилителей промежуточной частоты телевизионных приемников. Поэтому в экспериментальных исследованиях использовалось радиоприемное устройство, настроенное на частоту 35 МГц и имеющее полосу пропускания около 2,5 МГц. В этой области частот излучений радиопередающих устройств не наблюдались.

Однако на выходе приемника напряжения помех просматривались. Источники помех носили различный характер: наблюдались мешающие излучения, связанные с работой двигателей автомобилей, трамваев, троллейбусов, включающихся лифтов, аппаратов электросварки. Напряжения помех возникали при включении и выключении измерительных приборов (осциллографов, генераторов и т. д.). Возникали помехи при включении и выключении освещения, особенно люминес-

центного. По всей видимости, источником мешающего радиоизлучения было также оборудование близко расположенных предприятий, так как в нерабочие дни уровень помех заметно снижался.

Для изучения характеристик наблюдаемых полезных сигналов и помех, особое внимание уделялось антициклональным ситуациям.

При отсутствии облаков регистрировались напряжения помех, которые с большой степенью уверенности не были связаны с атмосферными процессами. На стадии накопления материалов с апреля 2000 г. до декабря 2001 г. регистрация проводилась круглосуточно, практически без выключения аппаратуры. Затем сбор данных продолжался, но он не был непрерывным.

Если ориентироваться на использование системы многопунктовой пеленгации сигналов, то значительная часть напряжений помех автоматически будет отфильтровываться. Источники помех, как правило, имеют ограниченную дальность распространения. Если расстояние между пунктами приема сигналов составляет 25—30 км, то помехи на разных пунктах приема будут появляться в разные моменты времени. Полезные сигналы, излучаемые облаками, должны появляться на всех приемных пунктах практически одновременно. Временной интервал, разделяющий полезные сигналы атмосферных электрических разрядов, не должен превышать на разных пунктах прием нескольких сотен микросекунд. Аппаратура многопунктовой системы пеленгации, обеспечивающая обнаружение опасных для летательных аппаратов областей пространства, должна отвечать ряду требований.

Известно, что летательные аппараты сравнительно редко поражаются молниями, когда они находятся на большой высоте. Чаще всего они поражаются на этапах взлета или посадки. Поэтому элементы и узлы системы многопунктовой пеленгации мелкомасштабных разрядов должны располагаться в зоне пространства, непосредственно прилегающей к аэропортам. Чтобы определить координаты источника излучения можно использовать разностно-дальномерный метод пеленгации источников излучения. Для определения трех координат источников излучения атмосферных разрядов необходимо использовать четыре пункта приема. Предпочтительно располагать по схеме, которая соответствует приведенной на рис. 1.

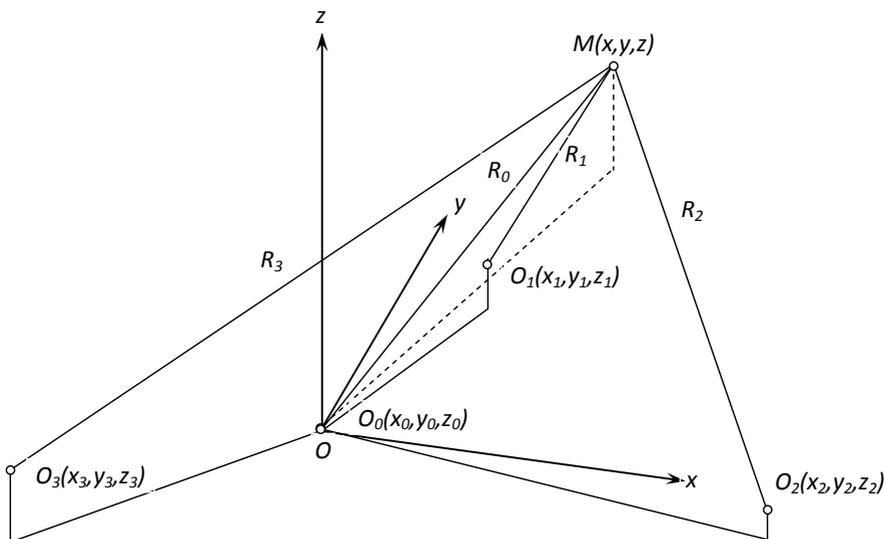


Рис. 1. Размещение пунктов приема сигналов радиоизлучения.

Расчеты выполнялись в декартовой системе координат, центр которой $O_0(x_0, y_0, z_0)$ совпадает с фазовым центром антенны центральной станции. Предполагалось, что ось y направлена на север, ось x — на восток. Декартовы координаты фазовых центров антенных систем периферийных станций, соответственно $O_1(x_1, y_1, z_1)$ для первого периферийного пункта приема, второго и $O_3(x_3, y_3, z_3)$ для третьего пункта должны быть определены с высокой точностью. Ограниченная область работы системы пеленгации позволяет в первом приближении считать землю плоской. Погрешность в оценке высоты при удалении источника излучения на 30 км, не превышает 70 м без учета рефракции, и около 55 метров при учете рефракции. Эта погрешность мала по сравнению с погрешностями, возникающими при вычислении высоты цели по результатам обработки принятых сигналов.

Если знать в единой системе отсчета времени моменты прихода излученных сигналов от одного источника излучения на каждый пункт приема T_0, T_1, T_2, T_3 , то можно определить временные сдвиги

между сигналами, пришедшими на периферийные пункты, относительно сигнала, принятого центральным пунктом:

$$\tau_1 = T_1 - T_0; \quad \tau_2 = T_2 - T_0; \quad \tau_3 = T_3 - T_0. \quad (1)$$

При умножении полученных величин на скорость распространения радиоволн c определяются три разности расстояния, которые при известных координатах фазовых центров антенных систем позволяют определить координаты x , y и z источника излучения:

$$r_1 = c\tau_1, \quad r_2 = c\tau_2, \quad r_3 = c\tau_3, \quad (2)$$

Для этого используются три уравнения с тремя неизвестными координатами источника излучения:

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \\ r_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \\ r_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Вычислительный процесс предполагает реализацию обычных алгебраических преобразований, при которых известными считаются координаты периферийных пунктов приема $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$, и значения разностей расстояний r_1, r_2, r_3 , а неизвестными — координаты источника излучения x, y, z .

Для решения этой задачи обозначим расстояние от центрального пункта до источника излучения R_0 . Центральный пункт приема считается размещенным в начале декартовой системы координат и все координаты фазового центра антенны центрального пункта имеют нулевое значение координат ($x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0$).

Поэтому расстояние от источника излучения, находящегося в точке с координатами x, y и z , до центрального пункта определяется соотношением:

$$R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (4)$$

Из соотношения (3), следует:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 + R_0 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}; \\ r_2 + R_0 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}; \\ r_3 + R_0 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}; \end{array} \right. \quad (5)$$

Поскольку уравнения имеют практически одинаковую структуру и отличаются только индексами, преобразования будут проиллюстрированы на примере одного уравнения. Если в первом из уравнений (5) возвести в квадрат обе его части, то после несложных преобразований получится:

$$r_1^2 + 2r_1R_0 + R_0^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2; \quad (6)$$

С учетом (4) возводим в квадрат выражения в скобках в правой части равенства (6), и, после сокращения одинаковых величин в разных частях равенства, получается

$$2r_1R_0 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2xx_1 + yy_1 + zz_1 - r_1^2; \quad (7)$$

Введем обозначение $R_{11} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$. Это расстояние между фазовыми центрами антенны первого периферийного пункта приема и антенной центрального пункта приема. Тогда соотношение (7) после небольших преобразований можно записать в виде:

$$R_0 = \frac{R_{11}^2}{2r_1} - \frac{1}{r_1} (xx_1 + yy_1 + zz_1) - \frac{r_1}{2}. \quad (8)$$

Осуществляя аналогичные преобразования с двумя другими соотношениями в зависимостях (5), получим еще два схожих уравнения, отличающимися лишь другими индексами:

$$R_0 = \frac{R_{22}^2}{2r_2} - \frac{1}{r_2} xx_2 + yy_2 + zz_2 - \frac{r_2}{2}. \quad (9)$$

$$R_0 = \frac{R_{33}^2}{2r_3} - \frac{1}{r_3} xx_3 + yy_3 + zz_3 - \frac{r_3}{2}, \quad 10$$

где $R_{22} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}$ и $R_{33} = \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}$ соответственно.

Последующие преобразования, направленные на вычисление неизвестных координат источника излучения x, y, z , одновременно преследовали цель использовать достаточно простые и удобные для ввода в ЭВМ зависимости. Для этого применялись промежуточные замены различных фрагментов соотношений, упрощающих используемые зависимости. Характер вводимых замен проиллюстрирован на примере зависимости (8).

Преобразуем соотношение (8) к виду:

$$R_0 = \frac{R_{11}^2}{2r_1} - \frac{r_1}{2} - \frac{x_1}{r_1}x + \frac{y_1}{r_1}y + \frac{z_1}{r_1}z. \quad 11$$

Введем обозначения:

$$A_1 = \frac{R_{11}^2}{2r_1} - \frac{r_1}{2}; \quad B_1 = -\frac{x_1}{r_1}; \quad C_1 = -\frac{y_1}{r_1}; \quad D_1 = -\frac{z_1}{r_1}; \quad (12)$$

Используя эти обозначения уравнение (11) обретет вид:

$$R_0 = A_1 + B_1x + C_1y + D_1z. \quad (13)$$

Вводя аналогичные обозначения для зависимостей (9) и (10), имеем

$$A_2 = \frac{R_{22}^2}{2r_2} - \frac{r_2}{2}; \quad B_2 = -\frac{x_2}{r_2}; \quad C_2 = -\frac{y_2}{r_2}; \quad D_2 = -\frac{z_2}{r_2}; \quad (14)$$

$$A_3 = \frac{R_{33}^2}{2r_3} - \frac{r_3}{2}; \quad B_3 = -\frac{x_3}{r_3}; \quad C_3 = -\frac{y_3}{r_3}; \quad D_3 = -\frac{z_3}{r_3}; \quad (15)$$

Используя приведенные обозначения, получаем:

$$R_0 = A_2 + B_2x + C_2y + D_2z. \quad (16)$$

$$R_0 = A_3 + B_3x + C_3y + D_3z. \quad (17)$$

Уравнения (13), (16) и (17) не являются независимыми. Для их решения потребуется еще одно независимое уравнение, которым является уравнение (4). Из уравнений (13), (16) и (17) можно любые две переменные выразить через параметры пеленгационной системы и разности расстояний между источником излучения и различными пунктами приема.

Из соотношений (13) и (16) находим:

$$A_1 + B_1x + C_1y + D_1z = A_2 + B_2x + C_2y + D_2z. \quad (18)$$

Выполняя преобразования, находим:

$$x = \frac{A_1 - A_2}{B_2 - B_1} + \frac{C_1 - C_2}{B_2 - B_1}y + \frac{D_1 - D_2}{B_2 - B_1}z; \quad (19)$$

Аналогично из уравнений (13) и (17) определяется величина x :

$$x = \frac{A_1 - A_3}{B_3 - B_1} + \frac{C_1 - C_3}{B_3 - B_1}y + \frac{D_1 - D_3}{B_3 - B_1}z; \quad (20)$$

Уравнения (19) и (20) независимые и позволяют определить еще одну координату источника излучения, выразив ее через параметры пеленгационной системы и разности расстояний от источника излучения до пунктов приема.

Для упрощения выражений (19) и (20) обозначим:

$$E_1 = \frac{A_1 - A_2}{B_2 - B_1}; \quad F_1 = \frac{C_1 - C_2}{B_2 - B_1}; \quad H_1 = \frac{D_1 - D_2}{B_2 - B_1}; \quad (21)$$

$$E_2 = \frac{A_1 - A_3}{B_3 - B_1}; \quad F_2 = \frac{C_1 - C_3}{B_3 - B_1}; \quad H_2 = \frac{D_1 - D_3}{B_3 - B_1}; \quad 22$$

Тогда, уравнения (21) и (22) можно записать в виде

$$x = E_1 + F_1y + H_1z; \quad 23$$

$$x = E_2 + F_2y + H_2z. \quad (24)$$

Из этих соотношений находим:

$$y = \frac{E_2 - E_1}{F_1 - F_2} + \frac{H_2 - H_1}{F_1 - F_2} z. \quad (25)$$

Обозначим:

$$I = \frac{E_2 - E_1}{F_1 - F_2}; \quad J = \frac{H_2 - H_1}{F_1 - F_2}. \quad (26)$$

Тогда получим

$$y = I + Jz. \quad 27$$

Подстановка в уравнение (13) значений x 24 и y (27) позволяют получить следующие соотношения:

$$R_0 = A_1 + B_1 E_2 + F_2 y + H_2 z + C_1 I + Jz + D_1 z \quad (28)$$

После замены в (28) величины y на зависимость (27) и некоторых преобразований имеем:

$$R_0 = A_1 + B_1 E_2 + B_1 F_2 I + C_1 I + B_1 F_2 J + B_1 H_2 + C_1 J + D_1 z. \quad (29)$$

Обозначим

$$K = A_1 + B_1 E_2 + B_1 F_2 I + C_1 I; \quad (30)$$

$$N = B_1 F_2 J + B_1 H_2 + C_1 J + D_1. \quad (31)$$

Используя (30) и (31), получаем:

$$R_0 = K + Nz. \quad 32$$

С учетом соотношения (4) имеем:

$$x^2 + y^2 + z^2 = K^2 + 2K \cdot N \cdot z + N^2 z^2. \quad (33)$$

Подставляя значения x (24) и y 27 в выражение (33) имеем:

$$x = E_2 + F_2 I + F_2 J + H_2 \cdot z. \quad (34)$$

Обозначим

$$P = E_2 + F_2 I; \quad Q = F_2 J + H_2. \quad (35)$$

Тогда

$$x = P + Qz, \quad (36)$$

а квадрат этой величины равен

$$x^2 = P^2 + 2P \cdot Q \cdot z + Q^2 z^2. \quad (37)$$

Из соотношения (27) следует, что

$$y^2 = I^2 + 2I \cdot J \cdot z + J^2 z^2. \quad (38)$$

Подставляя в (33) величины x^2 (37) и y^2 (38), получаем:

$$\begin{aligned} P^2 + 2P \cdot Q \cdot z + Q^2 z^2 + I^2 + 2I \cdot J \cdot z + J^2 z^2 + z^2 \\ = K^2 + 2K \cdot N \cdot z + N^2 z^2 \end{aligned} \quad 39$$

Перегруппируем это выражение и представим его в канонической форме:

$$Q^2 + J^2 - N^2 + 1 z^2 + 2 PQ + IJ - KN z + P^2 + I^2 - K^2 = 0. \quad (40)$$

Получено уравнение, которое позволяет вычислить высоту источника излучения.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} u = Q^2 + J^2 - N^2 + 1; \quad v = 2 PQ + IJ - KN ; \\ w = P^2 + I^2 - K^2. \end{aligned} \quad (41)$$

Тогда уравнение (40) записывается в виде:

$$uz^2 + vz + w = 0. \quad (42)$$

Для вычисления высоты источника излучения z используется выражение:

$$z = \frac{-v + \sqrt{v^2 - 4vw}}{2u}. \quad (43)$$

Здесь имеется два решения, но второе не соответствует физическому смыслу задачи. При использовании перед знаком радикала зна-

ка \pm второе решение определяет точку пространства, находящуюся под поверхностью Земли.

После того, как вычислена высота источника излучения z , вычислить оставшиеся координаты y и x не представляет сложностей. Для вычисления координаты источника y используется зависимость (27), а для вычисления x используется зависимость (24).

Но следует отметить, что при реальной обработке данных всегда имеются погрешности в оценках значений разностей расстояний r_1 , r_2 и r_3 , а также погрешности в оценках координат x_1 , y_1 , z_1 , x_2 , y_2 , z_2 , x_3 , y_3 , z_3 фазовых центров антенных систем пунктов приема излученных сигналов. Поэтому рассчитанные координаты источника излучения всегда будут определены с погрешностями. В связи с этим на первом этапе был выполнен анализ, направленный на выявление наиболее значимых факторов, влияющих на ошибки при оценке координат источников излучения.

Для определения вклада в погрешность оценки координат источника излучения и выявления самых значимых факторов применялась следующая схема анализа. При расчетах расстояние от центрального пункта приема до источника излучения принимало последовательно одно из трех значений 20 км, 40 км или 80 км. Для каждого расстояния азимутальные координаты источника менялись в интервале от 0 до 360 градусов с шагом в 1 градус. Предполагалось, что основные характеристики пеленгационной системы соответствуют номинальным, то есть центральный пункт приема располагается в начале декартовой системы координат, а периферийные — имеют фазовые центры антенн, расположенные в вершинах равностороннего треугольника, вписанного в окружность радиусом 30 км. Центр окружности совпадает с началом координат. Одна из вершин треугольника располагается на меридиане, проходящем через центр окружности к северу от центрального пункта,

По результатам расчетов устанавливаются разности моментов прихода сигналов к различным пунктам приема, и оно пересчитывается в разности между расстояниями от источника излучения до периферийных пунктов приема и расстоянием от источника излучения до центрального пункта r_1 , r_2 и r_3 (3).

Затем полученные данные r_1 , r_2 и r_3 рассматриваются как исходные и используются для поиска координат источника излучения пеленгационной системой с известными характеристиками. Если сохранить характеристики полностью соответствующими используемой системе $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3, r_1, r_2, r_3$, то должны быть получены координаты источника, соответствующие исходным значениям заданных координат x, y и z . Но, если какой-либо из параметров изменить, даже незначительно, то, как правило, изменятся вычисленные значения координат, и они станут равными x^*, y^*, z^* .

Предположим, что один из параметров, например, x_1 увеличен на малую величину Δx_1 , а все остальные значения параметров остались неизменными. С учетом произведенного изменения одного из параметров пеленгационной системы, при использовании приведенных выше зависимостей (1 – 43) определяются координаты источника излучения. Они, как правило, будут несколько отличаться от начальных координат цели x, y, z и окажутся равными другим величинам — x^*, y^*, z^* .

Если Δx_1 невелико, то величина $\frac{x^* - x}{\Delta x_1}$ будет близкой к частной производной $\frac{\partial x}{\partial x_1}$. Это позволяет при каждом изменении одного из параметров системы получить три частных производных $\frac{\partial x}{\partial x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_1}, \frac{\partial z}{\partial x_1}$. Частные производные позволяют выявить параметры системы пеленгации, наиболее влияющие на погрешности измерений.

Кроме того, в процессе расчетов вычислялся комплексный показатель, показывающий максимальное отклонение вычисленного значения источника излучения от истинного. Для этого вычислялась величина, равная:

$$\Delta r = \sqrt{x^* - x_1^2 + y^* - y_1^2 + z^* - z_1^2} \quad (44)$$

Этот параметр позволял оценить общее отклонение вычисленной координаты цели от истинного ее положения и использовался как обобщенная оценка качества работы пеленгационной системы. Поэтому для оценки степени влияния каждого параметра, характеризую-

ющего работу пеленгатора, также вычислялась $\frac{\partial r}{\partial x_1}, \frac{\partial r}{\partial y_1}, \frac{\partial r}{\partial z_1}$ — частная производная для каждого вычисленного значения $\frac{\partial r}{\partial x_1}$ (44).

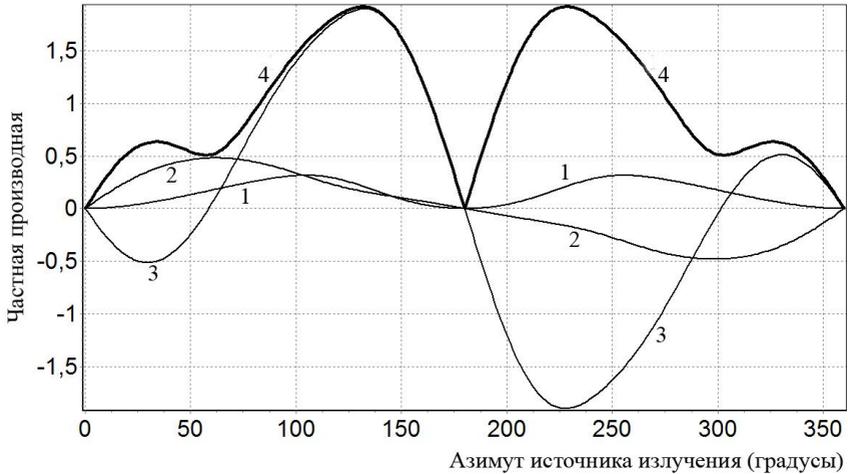


Рис. 2. Частные производные, позволяющие дать оценку влияния на точность определения координат источника излучения различных параметров системы пеленгации.

$$1 - \frac{\partial x}{\partial x_1}; \quad 2 - \frac{\partial y}{\partial x_1}; \quad 3 - \frac{\partial z}{\partial x_1}; \quad 4 - \frac{\partial r}{\partial x_1}.$$

На рис. 2 представлены частные производные по x_1 , вычисленные с использованием приведенных выше соотношений. Расчеты выполнены для случая, когда расстояние до источника излучения было 20 км, а азимутальные координаты источника изменялись от 0 до 360 градусов. Высота источника излучения предполагалась равной 3500 м.

Если проанализировать приведенный график, то можно сделать вывод, что максимальное расхождение между реальным и расчетным положением источника излучения будет наблюдаться, когда источник излучения будет находиться под азимутальными углами 132 и 224 гра-

дуса. В этих случаях частная производная $\frac{\partial r}{\partial x_1}$ будет равна примерно 1,92. Это означает, что, если координата x_1 первого периферийного пункта приема будет иметь значение, отличное от нуля (номинальное значение), то расстояние r , разделяющее расчетное положение источника излучения от истинного, будет равно $1,92 \cdot x_1$. Как видно из приведенных на рис.2 кривых, наибольшая погрешность наблюдается при оценке высоты z источника излучения (линия 3). Эта погрешность, так же как погрешность в оценке координаты y может иметь разные знаки в зависимости от азимута источника излучения. Как видно из приведенных данных погрешности в оценках координат источника излучения незначительны. Это объясняется тем, что источник излучения находился во внутренней зоне, ограниченной описанной окружностью, на которой располагались периферийные пункты приема. С увеличением расстояния до источника излучения погрешности возрастают.

Можно обратить внимание на симметричность зависимостей частных производных относительно точки с координатами (0, 180 градусов) для частных производных $\frac{\partial y}{\partial x_1}$, $\frac{\partial z}{\partial x_1}$ и относительно вертикальной линии, имеющей азимут 180 градусов, для частных производных $\frac{\partial x}{\partial x_1}$, $\frac{\partial r}{\partial x_1}$. Это объясняется симметрией исходного расположения пунктов пеленгации. Координаты центрального и периферийных пунктов, приведенные для рис.2, соответствуют варианту их симметричного распределения в пространстве. Каждый из периферийных пунктов приема удален от центрального на 30 км и располагается в вершине равностороннего треугольника. Центральный пункт расположен в центре треугольника.

На рис. 3 приведены в качестве примера результаты расчетов частных производных при расположении фазовых центров антенн, смещенных относительно симметрично размещенных приемных устройств. Для этого координаты периферийных пунктов изменены относительно варианта их симметричного расположения. Введенные изменения координат приемных пунктов отображены в таблице 1.

Во втором варианте пункты приема смещены относительно симметричного размещения примерно на 5—7 км. По представленным на рис. 3 результатам расчетов для второго варианта симметрии функций не наблюдается. Можно обратить внимание на существенно увеличившееся максимальное значение частной производной $\frac{\partial r}{\partial y_2}$, которое при азимуте 312 градусов, достигает величины 30,54. Это значит, что при изменении y_2 на малую величину, погрешность в оценке r будет изменяться на величину в 30,54 раза большую. Причина такого увеличения связана с тем, что в исходных данных расстояние до источника излучения предполагалось равным 80 км (а не 20 км, как это считалось при построении графиков, представленных на рис. 2).

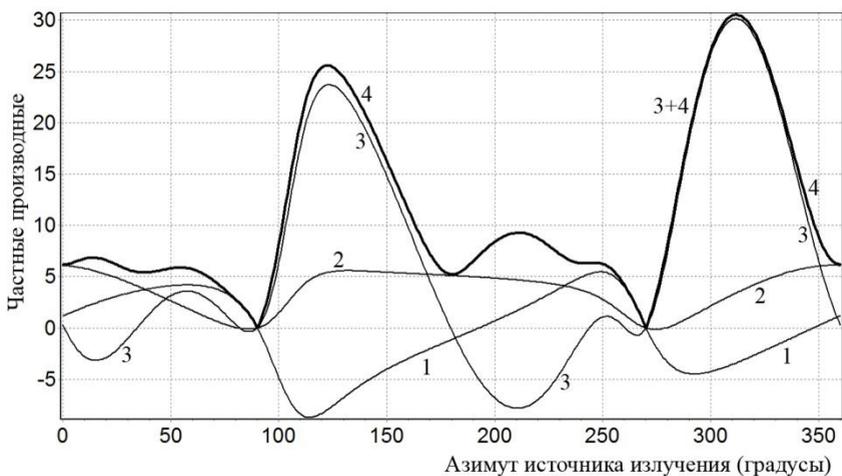


Рис. 3. Частные производные, позволяющие дать оценку влияния на точность определения координат источника излучения различных параметров системы пеленгации.

Несимметричное расположение пунктов приема сигналов. Расстояние до источника излучения 80 км.

$$1 - \frac{\partial x}{\partial y_2}; \quad 2 - \frac{\partial y}{\partial y_2}; \quad 3 - \frac{\partial z}{\partial y_2}; \quad 4 - \frac{\partial r}{\partial y_2}.$$

Таблица 1

Декартовые координаты различных пунктов приема

Пункт приема	Координаты	Вариант построения	
		симметричный	несимметричный
Центральный	x_0	0	0
	y_0	0	0
	z_0	0	0
Периферийный 1	x_1	0	0
	y_1	30000	25000
	z_1	1	1
Периферийный 2	x_2	25980,76	30980,76
	y_2	-15000	-20000
	z_2	1	1
Периферийный 3	x_3	-25980,76	-30980,76
	y_3	-15000	-15000
	z_3	1	1

Рассмотрена модель вычисления координат источника излучения с использованием метода Монте-Карло. В математической модели работы системы многопунктовой пеленгации предполагается, что на вход системы приходит поток импульсов, излученных из одной точки пространства с известными координатами (x, y, z) . Вычисляются разности расстояний r_1, r_2 и r_3 , соответствующие идеальным условиям приема. Однако реально точные значения разностей расстояний не могут быть определены из-за погрешностей в оценках значений, характеризующих систему многопунктовой пеленгации. Поэтому детерминированные значения r_1, r_2 и r_3 , заменяются случайными величинами r_1^*, r_2^* и r_3^* . Величины r_1^*, r_2^* и r_3^* имеют средние зна-

чения равные r_1 , r_2 и r_3 , а среднее квадратическое отклонение равное σ . Взаимное отличие этих величин определим как погрешности оценок:

$$\Delta r_1 = r_1 - r_1^*; \quad \Delta r_2 = r_2 - r_2^*; \quad \Delta r_3 = r_3 - r_3^*. \quad (45)$$

На погрешности оценок величин Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 влияют множество факторов. К их числу можно отнести изменение скоростей распространения радиоволн по разным трассам из-за наличия диэлектрических неоднородностей атмосферы. Погрешности могут возникнуть из-за нестабильности систем отсчета времени на разных пунктах приема, нестабильности пороговых устройств, определяющих моменты начала отсчета, из-за влияния шумовых компонентов напряжений, сопровождающих принимаемые сигналы и т. д. Случайный характер влияния каждого из перечисленных факторов может изменить задаваемые значения r_1 , r_2 и r_3 в любую сторону. Поэтому при анализе предполагалось, что каждая из этих величин имеет свое значение ошибки Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 . Случайные величины ошибок Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 предполагались взаимно независимыми и подчиняющимися нормальному закону распределения с нулевым средним и выбранным значением среднего квадратического отклонения σ .

Формирования такой совокупности переменных реализовано (Абезгауз и др., 1970; Виноградов, 1984) с использованием генератора случайных чисел ЭВМ, который генерирует последовательность случайных чисел, подчиняющихся равномерному закону распределения в интервале $[0..1]$. Для формирования величин, подчиняющихся нормальному закону распределения, программно вызываются две случайных величины Z_1 и Z_2 , вырабатываемых генератором случайных чисел. Затем, чтобы их преобразовать в случайные величины Δr_1 , и Δr_2 , подчиняющиеся нормальному закону распределения с нулевым средним значением и средним квадратическим отклонением, равным σ , вычисляются величины

$$R = \sigma \sqrt{-2 \cdot \text{Ln} Z_1}; \quad (46)$$

$$\Delta r_1 = R \cdot \sin 2\pi Z_2 ; \quad \Delta r_2 = R \cdot \cos 2\pi Z_2 . \quad (47)$$

Аналогичный алгоритм использовался для вычисления еще одной случайной величины Δr_3 . Полученные случайные величины Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 рассматривались как дополнительные случайные составляющие, которые суммировались с детерминированными величинами r_1 , r_2 и r_3 . Случайные числа r_1^* , r_2^* и r_3^* (45) имитировали отсчеты разностей расстояний с погрешностями, наблюдаемыми в процессе измерений.

Поскольку длительность импульса излученного сигнала, осуществляющего основное воздействие на приемный тракт, составляет примерно 20—25 нс, то можно предположить, что погрешность оценки момента прихода импульса не превысит половины длительности сигнала, т. е. составит примерно 10 нс. Это соответствует прохождению радиоволнами около 3 м.

Однако вводимые в программу расчетов случайные погрешности имели большую величину. Выбранные значения погрешностей увеличены для учета других факторов, перечисленных выше. Поэтому при анализе, если расстояние до источника излучения, равнялось 20 или 40 км, то среднее квадратическое отклонение σ , принималось равным 8 метрам. Для расстояния 80 км σ увеличивалось до 16 м.

В результате анализа было выяснено, что используемые для расчета исходные величины r_1^* , r_2^* и r_3^* , отличающиеся от истинных значений разностей расстояний r_1 , r_2 и r_3 на величину погрешностей Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 , в некоторых случаях не позволяют выполнить расчеты. Однако разработанная программа расчетов позволяла не останавливать вычислительный процесс. Если возникала ситуация, при которой сформированные с использованием генератора случайных чисел значений разностей расстояний r_1^* , r_2^* и r_3^* не позволяли определить координаты источника излучения, то ЭВМ генерировала новый набор

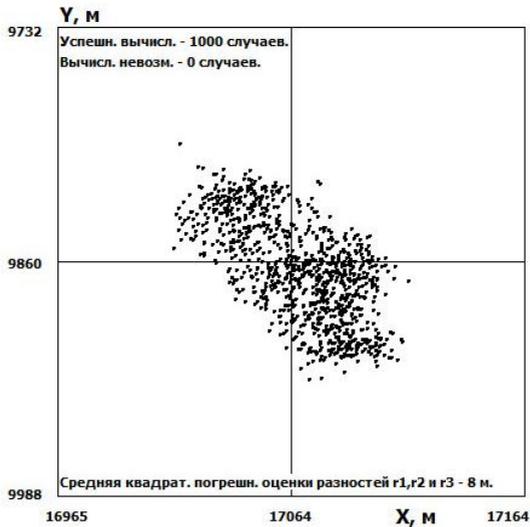
значений R_1^* , R_2^* и R_3^* , а затем, вновь переходила к вычислениям, фиксируя при этом количество неудачных попыток вычисления. Программа определяла сколько «неудачных» ситуаций возникает при выполнении заданного числа удачных вычислений. На рис. 4 представлены результаты работы программы расчета статистических характеристик координат целей. В приведенном на рисунке примере, вычисления осуществлялись до тех пор, пока от генератора данных о расстояниях R_1^* , R_2^* и R_3^* не было принято и обработано 1000 «излученных сигналов». Вычисленные координаты источников излучения x и y , отмечались точками на рисунке и позволяли визуально оценить разброс результатов определения координат x и y .

В данном примере не было отмечено ни одного неудачного варианта расчетов, при котором оказывалось бы невозможным получить данные о координатах источника излучения.

Координаты источника излучения x и y , отмечались точками на рисунке и позволяли визуально оценить разброс результатов определения координат x и y . Наиболее значительная погрешность – оценка высоты источника излучения. Среднее квадратическое отклонение (СКО) оценки z равна 377 м. При этом СКО координаты x равна 21,8 м, а координаты y — 27 м. Предположительно это связано с тем, что не предусматривался разнос антенн пеленгационной системы по высоте.

На рис. 5 представлены результаты расчетов при большем удалении от источника излучения от центрального пункта приема. Оно равнялось 40 км. Остальные параметры — азимут и высота расположения источника излучения оставались прежними.

Можно обратить внимание на изменение параметров разброса оценок координат. Так СКО координаты x возросло до 44 м, а координаты y — до 32 м. Погрешность оценки высоты цели превысила 1 км и достигла 1030 м.



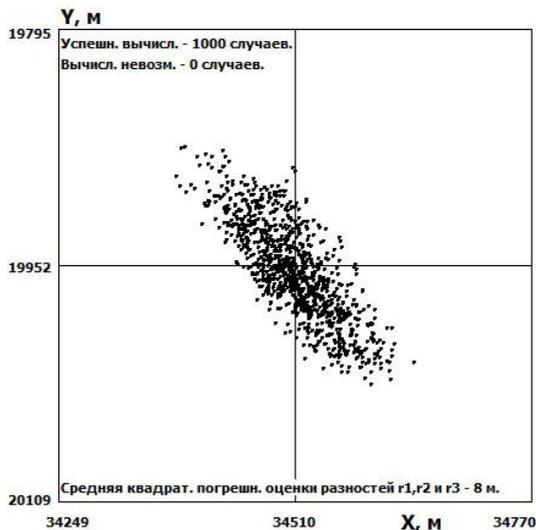
Статистические характеристики:

цилиндрические координаты источника излучения: расстояние — 20000 м, азимут — 60 градусов, высота 3500 м;
 координаты источника излучения — $X=17053,2$ м, $Y=9845,7$ м, $Z=3500$ м;
 средние значения координат источника — $X=170863,3$ м, $Y=9865,4$ м, $Z=3180,5$ м;
 СКО координат источника — СКО- $X = 21,8$ м, СКО- $Y = 27$ м, СКО- $Z = 376,6$ м,
 дисперсия координат источника излучения — $DX = 474,2$ м², $DY = 729,4$ м², $DZ = 141813,4$ м²;
 асимметрия распределения координат источника излучения — $AsX = -0,331$, $AsY = -0,042$, $AsZ = -0,561$;
 эксцесс распределения координат источника излучения — $Экс.X = -0,825$, $Экс.Y = -0,897$, $Экс.Z = -0,517$.

Дополнительные сведения:

Расстояние от центрального пункта приема до периферийных пунктов 30000 м. Периферийные пункты размещены в вершинах равностороннего треугольника. Один из периферийных пунктов размещен севернее центрального на линии север-юг, проходящей через периферийный пункт.

Рис. 4. Распределение оценок координат источника излучения, находящегося на расстоянии 20 км от центрального пункта приема при азимуте 60 градусов и высоте источника 3500 м.



Статистические характеристики:

цилиндрические координаты источника излучения: расстояние — 40000 м, азимут — 60 градусов, высота 3500 м;
 координаты источника излучения — $X=34508,2$ м, $Y=19923,3$ м, $Z=3500$ м;
 средние значения координат источника — $X=34508,9$ м, $Y=19956,3$ м, $Z=4491,2$ м;
 СКО координат источника — СКО- $X = 43,9$ м, СКО- $Y = 31,9$ м, СКО- $Z = 1027,6$ м,
 дисперсия координат источника излучения — $DX = 1928,4\text{ м}^2$, $DY = 1017,3\text{ м}^2$, $DZ = 1055999,5\text{ м}^2$;
 асимметрия распределения координат источника излучения — $AsX = -0,015$, $AsY = -0,102$, $AsZ = 0,186$;
 эксцесс распределения координат источника излучения — $\text{Экс.}X = -0,192$, $\text{Экс.}Y = -0,594$, $\text{Экс.}Z = -0,865$.

Дополнительные сведения:

Расстояние от центрального пункта приема до периферийных пунктов 30000 м. Периферийные пункты размещены в вершинах равностороннего треугольника. Один из периферийных пунктов размещен севернее центрального на линии север-юг, проходящей через периферийный пункт

Рис. 5. Распределение оценок координат источника излучения, находящегося на расстоянии 40 км от центрального пункта приема при азимуте 60 градусов и высоте источника 3500 м.

Надо, однако, отметить, что получившиеся результаты дали очень хорошие оценки по координатам x и y . Причина связана с предпосылкой, что излучение связано с источником, который излучает 1000 импульсных сигналов, находясь одной и той же точке пространства. Такая ситуация нереальна. Как правило, источники излучения распределены по пространству и, если следует серия излученных сигналов, то они связаны с большим количеством источников расположенных в разных местах облака. Если учитывать эту особенность, то результаты будут существенно хуже.

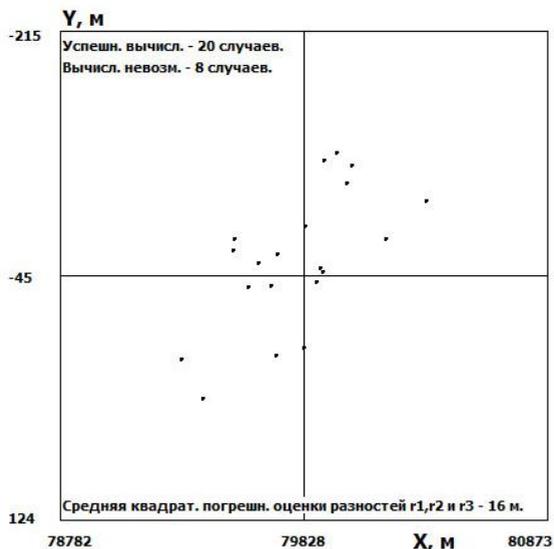
Ниже представлены результаты, которые более близки к реальным.

Разумно предположить, что на начальной стадии проявления электрической активности облака в пакете импульсов излучения общее число импульсов будет относительно невелико.

Можно рассчитывать на излучение примерно 20—30 импульсов различной амплитуды.

Поэтому на рис. 6 приведены данные при очень ограниченном числе импульсов излучения (20 импульсов), возникающих в локальной части облака, в которой происходит серия мелкомасштабных электрических разрядов. Расстояние до каналов разрядов выбрано равным 80 км, а среднее квадратическое отклонение оценок разностей расстояний r_1 , r_2 и r_3 увеличено с 8 м, каким оно было при расчетах и построении рис. 4 и 5, до 16 м. В результате этого появились ситуации, не позволяющие определить координаты мелкомасштабных разрядов. В приведенном рисунке 5 пришлось выполнить 28 измерений, из которых только 20 были результативными. В 8-ми случаях оценки входных параметров r_1 , r_2 и r_3 не позволяли найти координаты источников излучения.

Данные о статистических характеристиках координат источников излучения, полученных по 20 сигналам, излученных в пакете импульсов приведены в таблице 2 для 3-х разных расстояний до источников излучения — 20 км, 40 км и 80 км. В трех случаях источники излучения располагались на высоте 3500 м под азимутальным углом 60 градусов, а в одном — на высоте 3500 м под азимутальным углом 330 градусам.



Статистические характеристики:

цилиндрические координаты источника излучения: расстояние — 80000 м, азимут — 90 градусов, высота 3500 м;
 координаты источника излучения — $X=79923,4$ м, $Y=0$ м, $Z=3500$ м;
 средние значения координат источника — $X=79794,6$ м, $Y=56,4$ м, $Z=2754,9$ м;

СКО координат источника — СКО- $X = 252,5$ м, СКО- $Y = 46,3$ м, СКО- $Z = 783,3$ м,

дисперсия координат источника излучения — $DX = 63758,8\text{ м}^2$, $DY = 2142,7\text{ м}^2$, $DZ = 613529,8\text{ м}^2$;

асимметрия распределения координат источника излучения — $AsX = 0,085$, $AsY = 0,275$, $AsZ = -0,82$;

эксцесс распределения координат источника излучения — $\text{Экс.}X = -0,291$, $\text{Экс.}Y = -0,599$, $\text{Экс.}Z = 0,027$.

Дополнительные сведения:

Расстояние от центрального пункта приема до периферийных пунктов 30000 м.

Периферийные пункты размещены в вершинах равностороннего треугольника.

Один из периферийных пунктов размещен севернее центрального на линии север-юг, проходящей через периферийный пункт

Рис. 6. Распределение оценок координат источника излучения, находящегося на расстоянии 80 км от центрального пункта приема при азимуте 90 градусов и высоте источника 3500 м.

Таблица 2

**Результаты статистического анализа погрешностей в оценке
координат источников радиоизлучения**

Параметры	Координаты		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
<i>R=20 км, азимут 60 град, H=3500 м</i>			
Расстояние (истинное), м	17053,23	9845,68	3500,00
Среднее вычисленное, м	17020	9845	3481
Дисперсия, м ²	237	133	7093
СКО, м	15,4	11,5	84,2
Асимметрия	-0,34	0,40	-0,09
Эксцесс	-0,87	-0,83	-1,32
Доверительный интервал среднего, м	± 6,62	± 4,95	± 36,14
Доверительный интервал СКО, м	± 3,43	± 2,61	± 14,57
Доверительная вероятность	0,95	0,95	0,95
Число неудачных случаев расчетов		0	
<i>R=40 км, азимут 60 град, H=3500 м</i>			
Расстояние (истинное), м	34508,15	19923,29	3500,00
Среднее вычисленное, м	34420	19900	3448
Дисперсия, м ²	1076	388,5	57590
СКО, м	32,81	19,71	239,9
Асимметрия	0,73	0,17	-0,14
Эксцесс	0,01	-0,81	-1,29
Доверительный интервал среднего, м	± 14,1	± 8,46	± 103
Доверительный интервал СКО, м	± 9,73	± 4,49	± 42,3
Доверительная вероятность	0,95	0,95	0,95
Число неудачных случаев расчетов		0	

Таблица 2 (продолжение)

Параметры	Координаты		
	x	y	z
<i>R=80 км, азимут 60 град, H=3500 м</i>			
Расстояние (истинное), м	69215,7	39961,7	3500
Среднее вычисленное, м	68400	39600	3620
Дисперсия, м ²	109200	32400	1485000
СКО, м	331	180	1200
Асимметрия	0,52	-0,12	-0,88
Эксцесс	-0,46	-1,19	-0,15
Доверительный интервал среднего, м	± 143	± 77,3	± 523
Доверительный интервал СКО, м	± 85,7	± 33,9	± 346,8
Доверительная вероятность	0,95	0,95	0,95
Число неудачных случаев расчетов		4	
<i>R=80 км, азимут 330 град H=3500 м</i>			
Расстояние (истинное), м	-39962	69216	3500,00
Среднее вычисленное, м	-39400	68600	3900
Дисперсия, м ²	71280	353100	1160000
СКО, м	267	594	1078
Асимметрия	-0,81	1,27	-0,35
Эксцесс	-0,38	0,91	-0,96
Доверительный интервал среднего, м	± 115	± 255	± 463
Доверительный интервал СКО, м	± 71	± 212	± 230
Доверительная вероятность	0,95	0,95	0,95
Число неудачных случаев расчетов		35	

В последней строке для каждого из рассмотренных случаев приведено число неудачных случаев расчета, приходящихся на 20 успешных вариантов.

Сопоставляя данные, приведенные в разделе «Статистические сведения» на рис. 4 и рис. 5, с данными таблицы 2, можно обратить внимание на некоторые отличия, хотя исходное положение источников излучения одинаковое. Эти отличия обусловлены тем, что данные на рис. 4 получены по результатам обработки 1000 «сигналов», а в таблице 2 для источника с координатами $R=80$ км, азимут 60 град, $H=3500$ м их было только 20.

Заключение

1. Произведена оценка погрешностей при определении координат источников излучения в предположении, что источники излучения находятся на расстояниях 20, 40 и 80 км от центрального пункта приема, на высоте 3500 м и под разными азимутальными углами. При расчетах погрешности оценок разностей расстояний Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 формировались как независимые случайные величины, подчиняющиеся нормальному закону распределения с нулевым средним значением и средним квадратическим отклонением σ , равным 8 м, при среднем значении расстояния до источника излучения 20 и 40 км, и 16 м, при расстоянии 80 км. Такая погрешность может быть достигнута, если для определения моментов прихода сигналов аperiodического излучения будут применяться методы оценки, ориентированные на использование систем спутниковой навигации (Соловьев, 2000).

2. Погрешность вычисления высоты z источника излучения существенно превышает погрешность вычисления координат x и y (см. таблицу 2). Предположительно это является следствием того, что высота фазовых центров антенн всех каналов приема сигналов системы многопунктовой пеленгации расположена на нулевой или близкой к нулю высоте.

3. Для области, находящейся внутри окружности с радиусом 30 км, погрешность оценки координат x и y составляет десятки метров, что

приемлемо для практических нужд. За пределами этой области погрешность увеличивается с ростом расстояния до источника излучения. При дальности 40 км в некоторых азимутальных направлениях средние квадратические погрешности могут превысить 500 метров, что можно считать порогом допустимого.

4. При увеличении дальности обнаружения увеличивается погрешность оценки разностей расстояний. Так, для 80-ти километрового удаления погрешность оценок координат x и y в некоторых азимутальных направлениях приближается к 3—4 километрам. Кроме того, с ростом расстояния резко увеличивается число случаев, когда вычисление координат источника излучений оказывается невозможным. При расстоянии до источника, равном 80 км и средней квадратической погрешности σ оценки разностей расстояний $r1$, $r2$ и $r3$, равной 16 м, оценка координат источника излучения становится затруднительной. Число вариантов сочетания входных значений случайных величин $r1^*$, $r2^*$ и $r3^*$, позволяющих определить координаты источника излучения, становится сопоставимым или даже меньшим числа неудачных вариантов.

5. В настоящее время известны многопунктовые пеленгационные системы, в которых разнос пунктов приема сигналов составляет лишь десятков метров. Они обеспечивают определение координат источников излучения гармонических сигналов на достаточно больших удалениях цели. Но, если сигнал носит аперриодический характер, каким является радиоизлучение атмосферных разрядов, то для обеспечения приемлемой точности определения координат объекта между пунктами приема необходимо иметь достаточно большие расстояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абезгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Коровина И. А. (1970). Справочник по вероятностным расчетам. — М.: Военное издательство Минобороны. 468 с.

Математическая энциклопедия. Т. 5. (1984) /под. ред. Виноградова И. М. — М.: Советская Энциклопедия. С. 1248.

Дивинский Л. И., Нгуен Вьет Хан. (2004). Результаты длительных наблюдений радиоизлучения электрически активных облаков в метровом диапазоне радиоволн./

В сб.: Труды XX и XXI Всероссийских симпозиумов "Радиолокационное исследование природных сред". Выпуск 3. — СПб.: изд. ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 196—200.

Дивинский Л. И., Л. А. Майборода Л. А. (2013). Радиоизлучение мелкомасштабных атмосферных электрических разрядов // Труды ГГО. Вып. 569. С. 258—271.

Довгалик Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев 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 // Труды ГГО. Вып. 558. С. 102—142.

Зашукаев Т. З. (1998). Исследование электрической структуры грозовых облаков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 20.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология. Нальчик.: ВГИ. 132 с.

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

Морозов В. Н. (2000). Расчет электрических полей грозовых облаков, необходимых для инициирования электрических разрядов облако — верхние слои атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42, № 2. С. 121—129.

Морозов В. Н., Снегуров В. С., Шварц Я. М. (2001). Исследования атмосферного электричества. / В кн. Современные исследования Главной геофизической обсерватории. Т. 2. С. 203—208.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., Шаповалов А. В., Щукин Г. Г., (2006). Опыт совместных наблюдений за грозами грозопеленгатором-дальномером и метеорологическим радиолокатором // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 7 (555). С. 139—148.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., Щукин Г. Г. (2004) г. К программе построения грозопеленгационной сети Росгидромета // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 7 (555). С. 207—222.

Снегуров В. С. (1997). Концепция сети пеленгации гроз // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 1 (546). С. 92—104.

Соловьев Ю. А. (2000). Системы спутниковой навигации. — М.: ЭКО-ТРЕНДЗ. 267 С.

Стасенко В. Н., Щукин Г. Г. (2000). Методология исследования электричества грозовых облаков и активные воздействия на них // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 2 (548). С. 24—34.

К ВОПРОСУ ОБ ИНДИКАТОРАХ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА

Э. Ю. Безуглая, Т. П. Ивлева, И. В. Смирнова

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

e-mail: labzag@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 26.06.2014

Поступила после доработки 2.07.2014

Введение

Для оценки качества атмосферного воздуха в городах России используются данные наблюдений на станциях государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды. По результатам наблюдений за год рассчитываются средние и определяются максимальные концентрации вредных загрязняющих веществ на каждой станции и по городу в целом, а затем оценивается степень загрязнения воздуха, путем сравнения полученных концентраций примесей с утвержденными в законодательном порядке санитарно-гигиеническими нормативами — предельно допустимыми концентрациями (ПДК).

Нормативы для атмосферного воздуха населенных пунктов были установлены в результате токсиколого-гигиенических и эпидемиологических исследований влияния загрязнения воздуха на здоровье людей в виде максимальных разовых и среднесуточных ПДК (ГН 2.1.6.1338-03, 2003). ПДК определяет концентрацию химических элементов и их соединений в окружающей среде, которая при повседневном влиянии в течение длительного времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний, устанавливаемых современными методами исследований в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений. Величины ПДК

утверждаются Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации.

Подходы к определению показателей качества воздуха в Европе несколько отличаются от принятых в России. В настоящее время в Европе используются критерии качества воздуха, рекомендованные Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и целевые показатели, установленные Директивами ЕС (Seinfeld T., 1997; Air Quality, 2005; Human Exposure, 2000; Environmental Health Indicators, 1999; Directive 2008/50/EC; Directive 2004/107/EC).

Сравнение измеренных концентраций загрязняющих веществ с критериями и стандартами позволяет оценить качество воздуха с точки зрения опасности для здоровья людей, а сравнения с целевыми показателями — оценивать эффективность воздухоохраных мероприятий.

В России ПДК установлены с учетом международного опыта, поэтому имеют близкие значения к критериям ВОЗ и европейским стандартам и показателям.

Использование значений ПДК в практической работе по оценке загрязнения воздуха городов в ряде случаев затруднено. Поэтому целью данной статьи является рассмотрение проблем в оценке качества воздуха и выработка предложений по совершенствованию системы ПДК.

Результаты исследования

Одним из основных недостатков существующей системы санитарно-гигиенических нормативов является отсутствие информации о статистической обеспеченности максимальной разовой ПДК. Значение максимальной концентрации примеси может быть одинаковым для нескольких городов, но повторяемость ее в конкретных городах может значительно различаться.

Другим недостатком является отсутствие годовых значений ПДК. Среднесуточная ПДК (ПДКс.с.) была установлена как средняя за длительный период — год и более и может относиться к средней за сутки, за неделю, за месяц, за год, поскольку она была определена как

осредненный результат длительного воздействия загрязненного воздуха на человека.

Значение ПДК за год (или среднегодовая ПДК) установлена только для взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$.

В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова при оценке качества воздуха по данным наблюдений за год используется ПДКс.с. Однако среднесуточная ПДК всегда выше среднегодового значения ПДК, в результате степень загрязнения атмосферы обычно несколько занижается.

Результаты расчета средних (q_{cp}) и средних из максимальных (q_m) концентраций наиболее часто встречающихся примесей для пяти групп городов с различной численностью населения представлены в таблице 1.

Средние концентрации диоксида серы, взвешенных веществ, диоксида азота, оксида углерода, бенз(а)пирена, аммиака и формальдегида в городах с различной численностью населения отличаются значительно.

Максимальная концентрация примеси в городе определяется выбросами предприятий, их мощностью, высотой выбросов и метеорологическими условиями рассеивания примесей в атмосфере. При этом в зависимости от типа источника и места его размещения максимумы могут существенно различаться. Так, в Восточной Сибири, где велика повторяемость слабых ветров и застоев воздуха, максимумы выше среднего значения всего в 3,5—4,5 раз. На побережье морей, где наблюдаются сильные ветры, максимум может быть выше средней в 6—13 раз. Значения максимальных концентраций примесей тем ниже, чем меньше численность населения в городе.

Коэффициенты корреляции между средней и максимальной концентрацией примесей колеблются в пределах от 0,51 до 0,85, что говорит о надежности полученных показателей. Самый высокий коэффициент корреляции относится к концентрациям бенз(а)пирена. Определяется это тем, что для этой примеси использованы максимальные концентрации за месяц, а не за 20 мин, как для других веществ.

Таблица 1

Отношение максимальных концентраций (q_m) примесей к средней за год (q_{cp}) и коэффициенты корреляции (R) между этими характеристиками для групп городов с различной численностью населения

Примеси	Численность населения (тыс. чел.) в рассматриваемых группах городов	Количество городов в группе	q_m/q_{cp}	R
Диоксид серы	любая	200	15	0,51
Взвешенные вещества	более 500	34	11,8	0,8
	от 250 до 500	39	9,8	0,82
	от 100 до 250	50	9,9	0,68
	от 50 до 100	42	8,0	0,63
Диоксид азота	более 500	34	10,9	0,51
	от 250 до 500	41	9,7	0,68
	от 100 до 250	52	7,3	0,57
	от 50 до 100	44	5,5	0,69
Оксид углерода	более 500	33	9,8	0,69
	от 250 до 500	39	7,6	0,57
	от 100 до 250	42	6,1	0,66
	от 50 до 100	37	5,2	0,75
Бенз(а)пирен	любая	168	2,0	0,85
Аммиак	любая	66	11,0	0,72
Формальдегид	любая	146	12,2	0,65

Отношение максимальных концентраций к средним для таких основных примесей, как диоксид азота, оксид углерода и взвешенные вещества уменьшается с уменьшением численности населения городов. На рисунке 1 представлены данные для групп городов с различным числом жителей. Первая группа включает города с числом жителей более 500 тыс., четвертая — с числом жителей от 50 до 100

тыс. человек, пятая — города с любым количеством жителей. Если рассматривать первую группу городов с населением более 500 тыс., то для нее отношение q_m/q_{cp} имеет наибольшее значение для взвешенных веществ, наименьшее — для оксида углерода.

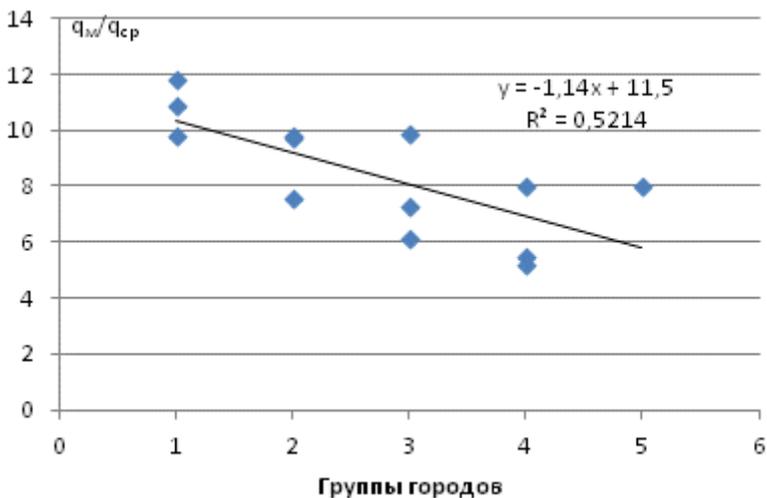


Рис. 1. Отношение (q_m/q_{cp}) максимальных концентраций к средней за год для пяти группах городов с различной численностью населения.

В группах городов с меньшей численностью населения отношение q_m/q_{cp} наименьшее для диоксида азота и оксида углерода. Это и понятно, в малых городах меньше сказывается влияние выбросов автотранспорта.

В таблице 2 приведены максимально разовые (ПДК_{м.р.}), среднесуточные значения ПДК_{с.с.} и их отношения. Для сравнения приведены отношения между максимальными (q_m) и средними (q_{cp}) за год концентрациями для группы городов с населением более 500 тыс. Сопоставление ПДК и реальных концентраций позволяет получить ряд полезных выводов.

Отношение максимально разовых ПДК к среднесуточным для рассматриваемых веществ различается заметно. Возможно это зависит от класса опасности вещества. По этой причине использование ПДК_{с.с.} для оценки значения концентрации, полученной за год, по-разному сказывается на этих оценках.

Таблица 2

Максимально разовые и среднесуточные ПДК, мкг/м³, их отношения и отношение максимальных концентраций (q_м) примесей к средней за год (q_{ср.}) в городах с населением более 500 тыс. чел.

Примесь	ПДК _{м.р.}	ПДК _{с.с.}	ПДК _{м.р.} /ПДК _{с.с.}	q _м /q _{ср}
Диоксид серы	500	50	10	12
Диоксид азота	200	40	5	11
Аммиак	200	40	5	11
Оксид углерода	5000	3000	1,6	10
Формальдегид	35 (50*)	3 (10*)	11,6 (5)	12
Фторид водорода	20	5	4	12
Взвешенные вещества	500	150	3,3	12
PM 10	300	60 (40**)	5	—
PM 2,5	160	35 (25**)	4,6	—
Бенз(а)пирен	—	0,001	—	3

Примечание.

* — ПДК, установленные в 2014 г.;

** — среднегодовые значения ПДК.

Рассмотрим каждое вещество отдельно.

1. Для диоксида серы отношение ПДК_{м.р.}/ПДК_{с.с.} равно 10, а q_м/q_{ср} — 12. Использование ПДК_{с.с.} для оценки среднего за год возможно, но при этом степень опасности данного уровня загрязнения занижается. Обычно уровни загрязнения воздуха диоксидом серы не

превышают ПДК, поэтому возникающее занижение степени загрязнения не имеет значения.

2. Для диоксида азота и аммиака отношение максимальных значений концентраций к средним за год также выше, чем отношение ПДК этих веществ (отношения равны соответственно 11 и 5). Средние за год концентрации диоксида азота в городах часто превышают ПДК. Поэтому с учетом различий в отношениях между концентрациями и их ПДК, необходим отдельный критерий для оценки степени загрязнения за год.

Критерий качества воздуха за год для диоксида азота в Европе совпадает с российским ПДК, т. е. равен 40 мкг/м^3 . Следовало бы принять его в качестве среднегодовой ПДК, при этом увеличив ПДК_{с.с.}.

3. Для оксида углерода ПДК_{м.р.} и ПДК_{с.с.} низкие, особенно по сравнению с Европейскими. Возможно, их следует увеличить.

4. При рассмотрении концентраций взвешенных веществ следует принимать во внимание и ПДК, установленные для мелких взвешенных веществ, которые принято называть РМ, РМ₁₀, для частиц менее 10 микрон и РМ_{2,5} для частиц менее 2,5 микрон. Для взвешенных веществ отношение максимального к среднему ПДК составляет 3,3.

Для РМ установлены ПДК за год и ПДК за сутки. Учитывая их отношения и отношение ПДК_{м.р.}/ПДК_{с.с.} для взвешенных веществ, можно приблизительно определить возможное отношение ПДК максимальной разовой к годовой концентрации для ВВ. Оно составит 8,3, что ближе к значению отношения реальных концентраций ВВ. Поэтому критерий концентраций ВВ за год будет примерно вдвое ниже чем значение его ПДК_{с.с.}.

5. Для бенз(а)пирена установлена только среднесуточная ПДК_{с.с.}. Учитывая, что эта примесь определяется из проб взвешенных веществ, можно воспользоваться полученными выше выводами. В этом случае критерий за год должен быть более чем в 2,5 раз ниже, чем ПДК_{с.с.}.

В настоящее время среднегодовая концентрация бенз(а)пирена сравнивается с имеющимся ПДК_{с.с.}, следовательно, говоря об

опасности загрязнения воздуха бенз(а)пиреном, она занижается примерно на 20%.

6. Для фторида водорода, как и для других веществ, для которых существуют различия между отношениями ПДК и концентраций, также необходим дополнительный критерий для оценки годового значения ПДК. Фториды накапливаются в организме человека и растений. Поэтому ПДК должна быть даже ниже, чем для других веществ, т. е. примерно в 3 раза ниже ПДК_{с.с.}.

7. Для формальдегида до последнего времени существовало соотношение ПДК, такое же, как и для диоксида серы (12), при котором возможно использование ПДК_{с.с.} в качестве критерия среднегодового значения ПДК.

Формальдегид — опасное вещество, обладающее высокой токсичностью. До настоящего времени формальдегид являлся веществом второго класса опасности, оказывающим раздражающее действие на человека. При концентрации формальдегида, превышающей ПДК, он воздействует на центральную нервную систему и на органы зрения. При острых отравлениях характерно раздражение оболочек глаз, верхних дыхательных путей, чувство давления в груди, кашель и удушье. В последнее время признается, что это вещество трудно выводится из организма и ответственно за возникновение раковых новообразований в дыхательных путях. Удивительно, поэтому, что признавая это и изменяя класс опасности этого вещества со второго на первый, совершенно неожиданно в соответствии с Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 апреля 2014 года № 27 увеличены значения максимально разовой и среднесуточной ПДК формальдегида (принятые новые значения ПДК приведены в таблице 2 в скобках). В данном случае нельзя сказать, что это сделано для сближения с нормативами Европы, поскольку в Европе они для атмосферного воздуха населенных мест не установлены.

Нет и достаточно обоснованных пояснений для изменения значений ПДК. Можно только предполагать, что слишком часто при оценке уровня загрязнения воздуха городов говорится о высоких уровнях и опасности формальдегида, выбрасываемого

преимущественно предприятиями строительной промышленности. В действительности, как показывают исследования (Seinfeld, Pandis 1997; Безуглая и Смирнова, 2008; Безуглая и др., 2010), формальдегид появляется в атмосфере не столько в результате промышленных выбросов, сколько под действием химических реакций, происходящих с участием многих других загрязняющих веществ, находящихся в загрязненном воздухе городов. Рост химической активности атмосферы в последние годы показан в исследованиях ГГО (Безуглая и др., 2009).

Поскольку произошло по не совсем понятной причине изменение значений ПДК формальдегида, то необходимо несколько подробнее оценить загрязнение городов этим веществом.

По данным Ежегодника за 2013 год (Ежегодник, 2014) в 137 городах России среднегодовые концентрации формальдегида выше ПДКс.с.

Результаты проведенного исследования влияния автотранспорта на уровень загрязнения атмосферного воздуха в 36 крупнейших городах по данным 67 станций, отнесенных к категории «авто» в период 2009—2013 гг. показывают, что на станциях «авто» средние концентрации оксида углерода выше, чем в целом по всем станциям в этих крупнейших городах на 20%, оксидов азота — на 26—52 %, бенз(а)пирена и формальдегида — на 10 % (Ежегодник, 2014). За пятилетний период в крупнейших городах и на станциях «авто» концентрации большинства веществ снижаются. Концентрации формальдегида на станциях «авто» возросли на 26 %, а диоксида азота — на 17 % при практически постоянном уровне их в крупнейших городах (рис. 2 и 3).

Формальдегид есть продукт химических реакций в атмосфере между рядом загрязняющих веществ. Иначе можно сказать, что выбросы многих загрязняющих веществ ответственны за появление в атмосфере формальдегида (Воздух городов, 2008; Безуглая и др., 2009, 2010).

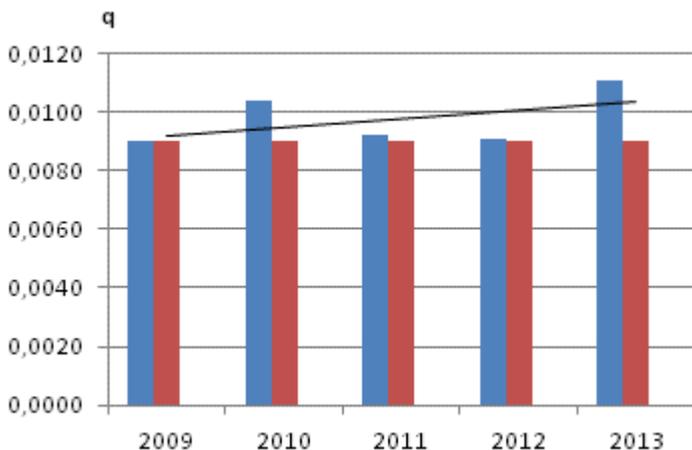


Рис. 2. Изменение концентраций формальдегида (q , мг/м³) на станциях «авто» (синий столбец) и в крупнейших городах (красный столбец) за 5 лет. Черная прямая — линия тренда для станций «авто».

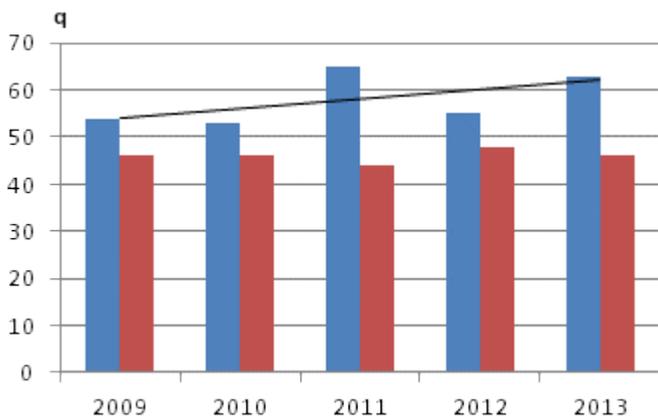


Рис. 3. Изменение концентраций диоксида азота (q , мкг/м³) на станциях «авто» (синий столбец) и в крупнейших городах (красный столбец) за 5 лет. Черная прямая — линия тренда для станций «авто».

Известно, что максимумы концентраций диоксида азота, озона и формальдегида в атмосфере связаны между собой.

$$[\text{O}_3] = [\text{HCHO}] + [\text{NO}_2]. \quad (1)$$

В фундаментальном труде (Seinfeld, 1997) показано существование важной связи между многими загрязняющими атмосферу веществами.

Диоксид азота и озон в процессе химических реакций под воздействием солнечной радиации и повышении температуры воздуха способствуют возникновению формальдегида. Расчетный максимум формальдегида, полученный по данным наблюдений за концентрациями NO_2 и O_3 , соответствуют реальным максимумам формальдегида, т. е. подтверждается связь, описанная соотношением (1) (Безуглая и др., 2010).

Дополнительным подтверждением того, что не только строительные, мебельные предприятия и автотранспорт виновны в повсеместном загрязнении воздуха формальдегидом, может служить список городов, в которых его средние концентрации максимальны. Города, в которых фиксируются высокие концентрации формальдегида, расположены в местах добычи углеводородного сырья Западной Сибири (Белоярский, Радужный, Ханты-Мансийск), а также в южных широтах (Братск, Ачинск, Новороссийск, Красноярск).

Повышение значений ПДК формальдегида ведет к замалчиванию его важной роли и не только искажает реальную картину загрязнения воздуха в городах России, но и приводит к сдерживанию мероприятий по общему снижению выбросов. При использовании для оценки качества воздуха вновь установленных ПДК формальдегида, снизится число городов, где среднегодовые концентрации его выше ПДК. Вместо 137 их будет всего 45. Но проблема от этого не исчезнет, она лишь окажется скрытой от человеческого глаза за счет «удачных» ПДК. Не снизится и заболеваемость населения, связанная с присутствием в воздухе формальдегида.

Изменение ПДК формальдегида откроет широкие возможности для расширения производства в строительной промышленности, ранее сдерживаемой строгой величиной ПДК, приведет к существенному

увеличению в среднем в 3 раза нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) и соответственно к заметному ухудшению санитарно-гигиенической обстановки в стране. Тем самым изменение ПДК будет способствовать повышению загрязнения воздуха в городах, создаваемого как выбросами промышленного производства, так и в результате природных химических реакций. Оно лишь временно успокоит население.

Следует помнить, что чистоты воздушного бассейна нельзя достигнуть путем снижения выбросов одного из загрязняющих веществ. В последнее время ведутся разговоры о необходимости полной отмены ПДК для всех веществ, сдерживающих развитие промышленности. Если рост промышленности важнее здоровья людей, населяющих страну, то их можно отменить.

Остается добавить, что в Ежегодниках состояния загрязнения атмосферы в городах России (2014) постоянно отмечается, что уровни загрязнения во многих городах выше ПДК, иногда в несколько раз. Но ситуация не меняется. Это повторяется из года в год. Следовательно, чтобы изменить положение и создать здоровые города, нужны более существенные меры, чем предпринимались до настоящего времени.

Выводы

В работе установлены отношения максимальных концентраций к средним в группах городов с различной численностью населения.

Показаны различия в значениях ПДК, определяющие вариации в степени опасности загрязнения на здоровье населения.

Рассмотрены пути определения значения критериев качества воздуха с учетом средних за год значений концентраций примесей и отношений значений максимально разовых концентраций к средним.

Отмечается необходимость установления специальных критериев качества воздуха для годовых оценок степени загрязнения воздуха в городах, в первую очередь для формальдегида.

Высказана необходимость разработки программы поэтапного снижения уровня загрязнения воздуха, которая учитывала бы эти критерии качества воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Безуглая Э. Ю., Воробьева И. А., Ивлева Т. П. (2009). Химическая активность атмосферы на территории России // Труды ГГО. Вып. 559. С. 121—133.

Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. (2008). Воздух городов и его изменения. — СПб: Астерион. 253 с.

Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2013 г. (2014) — Санкт-Петербург: Д_Арт. 224 с.

ГН 2.1.6.1338-03 (2003). Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы. — М.: Минздрав России.

Seinfeld T. H., Pandis S. N. (1997). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. — Oxford: John Wiley and Sons. P. 1360.

Air Quality Guidelines Global update (2005). Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. WHO Regional Office for Europe, 2005.

Human Exposure Assessment, Environmental Health Criteria. Document 214, Program of Chemical Safety. WHO. 2000.

Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies / Prepared by D. Briggs. — Occupational and Environmental Health. WHO. 1999.

Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe.

Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air.

ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИСКИ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

М. А. Салль

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

Поступила в редакцию 10.09.2014
Поступила после доработки 16.11.2014

Введение

Целью данной работы является некоторая формализация понятия погодно-климатического риска, которое само по себе не имеет смысла вне концепции управления рисками или, иначе, риск-менеджмента. В этом плане данная работа имеет рамочный характер и направлена на наведение некоторого порядка в данной области. В этом смысле автор пытается создать основу для написания всевозможных методик и руководящих документов (РД) по данной тематике. Отметим, что попытки совместить достаточно продвинутую теорию риск-менеджмента в применении к погоде и климату, как к достаточно специфическим субъектам, предпринимались, как и у нас в стране (Акентьева, Кобышева, 2011; Кобышева и др., 2008), так и в других странах (см. например *Climate Change Impacts...*, 2006). Однако эти работы, как и многие другие, мало проясняют ситуацию. Наиболее продвинутым следует признать опыт Великобритании, который, к сожалению, мало применим в России в силу недостаточного уровня развития нашей экономической науки, зачастую определяемым элементарным отсутствием достоверной статистической информации об экономических связях. Главной целью данной работы является выявление той «подложки», за которую отвечает наука о климате, на

базе которой возможны те или иные экономические расчеты, лежащие, собственно, в основе риск-менеджмента.

В данной работе мы выделим погодные риски, как риски связанные с установлением неблагоприятных метеорологических условий на не очень большие сроки (до нескольких суток), т. е. риски определяемые явлениями, которые могут быть предсказаны в рамках краткосрочного прогноза погоды. Ко второй категории погодно-климатических рисков мы будем относить риски, связанные с установлением неблагоприятных метеорологических условий на сроки сопоставимые с длительностью сезона (ориентировочно от десяти и более дней). Отметим, что данное разделение является в существенной степени условным, поскольку все погодные процессы развиваются на фоне климатических, и, вообще говоря, единственным способом реализации климатических тенденций является погода. Единственным оправданием предложенного разделения в рамках развиваемого подхода является различие в способах управления рисками в этих ситуациях, т. е. различие в категориях, не относящихся к науке о климате, а к науке об административно законодательно экономическом управлении.

В рамках существующей в российской науке традиции погодно-климатические риски связываются с установлением погодных условий отвечающих критерию опасного явления (ОЯ). При этом ряд ОЯ относится к погодным рискам (град, ураган и т. д.) а ряд ОЯ (сухостей, сильная жара, заморозки, чрезвычайная пожарная опасность, засуха и т. д.) уже к климатическим. Необходимо отметить, что само понятие «критерия опасного явления» является достаточно условным. Достаточно сравнить ГОСТ 22.0.03-97(1997) и «Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений» (РД 52.88.629, 2002). При этом ряд метеорологических явлений не подпадает ни под какие формальные критерии, оговоренные в этих документах, но, тем не менее, приводит к тому, что те или иные отрасли терпят определенные убытки. В качестве примера можно привести выращивание кукурузы, которая, помимо всего прочего, требует того, чтобы сумма активных температур во время вегетационного периода находилась в строго ограниченных рамках. Другим недостатком подобных документов

является претензия на универсальность. Необходимо понимать, что катастрофическая засуха не является таковой в районе пос. Логань, где она наблюдается ежегодно; сильный ветер не является проблемой на м. Лопатка; ураганный ветер на Алтае не приносит таких убытков, как просто сильный ветер в Томске или ураган в Ленобласти; дожди в бассейне Невы не приводят к наводнениям в Петербурге, в отличие от дождей в бассейне Амура, способных привести к катастрофическим наводнениям. Т. е. понятие ОЯ является *географически детерминированным*. Помимо этого понятие ОЯ является *социально-экономически детерминированным* в силу того, что люди, живущие на той или иной территории, *уже* адаптировались к возможным погодно-климатическим проблемам. В качестве третьего фактора можно привести *природную детерминированность*, определяемую тем, что зачастую ОЯ воздействуют не непосредственно на хозяйственные объекты, а на природу (примером могут служить ураганные ветра, которые, как правило, сносят не столбы линий электропередач, а деревья, которые в свою очередь обрывают провода и повреждают опоры; так вот, в ураганно опасных районах деревья *уже* снесены). В этом смысле далее мы будем брать за основу понятие обобщенного ОЯ, приводящего к потерям в той или иной отрасли экономики, и, возможно, не связанного с официальными перечнями.

Следует также заметить, что в рамках данной тематики понятие погодно-климатического риска может быть дифференцировано в соответствии с инвестиционными задачами. Так, краткосрочные инвестиционные проекты (сроком до нескольких лет) должны опираться на два фактора, а именно: риски, отвечающие климатической норме (т. е. риски вероятность которых описывается 30-летней статистикой), и риски, существующие на сегодняшний момент, т. е. риски, определяемые тенденциями климатических изменений. Долгосрочные же экономические проекты, связанные с оценкой будущих климатических изменений, базируются на совершенно другом материале, а именно, на анализе глобальных (и региональных) климатических моделей. Мы, в данной работе, сосредоточимся на краткосрочной перспективе, отмечая при этом, что сколько-нибудь содержательный долгосрочный анализ возможен

только лишь при учете последовательного анализа уже существующих данных.

Погодные риски

Погодные риски — это единственный вид погодно-климатических рисков, в котором задача риск-менеджмента сводится не только к задаче возможного уменьшению убытков, но и к задаче воздействия на источник рисков (активные воздействия на облака в целях уменьшения количества осадков на защищаемой территории). Однако активные воздействия применяются достаточно редко, поэтому на этом вопросе мы останавливаться не будем.

Основным аппаратом риск-менеджмента в случае погодных рисков являются действия по уменьшению ущерба, которые сводятся к принятию превентивных мер, решение о которых принимается на основе метеорологического прогноза. Возможны три варианта развития событий:

Вариант №	Предсказание ОЯ	Наблюдаемость ОЯ	Потери	Причина потерь	Мат. ожидание числа случаев за год
1	Нет	Да	А	Ущерб	р
2	Да	Да	В	Стоимость превентивных мер + ущерб при условии их принятия.	q
3	Да	Нет	С	Стоимость превентивных мер	г

В данном случае для работы удобнее пользоваться не вероятностями, а математическими ожиданиями. При этом средний годовой ущерб определяется как

$$Ap + Bq + Cr$$

В настоящее время Росгидрометом используется оценка успешности штормовых предупреждений, которая в общих чертах базируется на том, что варианту 2 отвечает 100 % успешность, а вариантам 1 и 3 — успешность в 0 %. В связи с многообразием хозяйственных условий в различных регионах нашей страны такая универсальная оценка представляется оправданной, тем более, что успешность составляет величину порядка 90 %. Однако автору представляется, что заказчику необходимо предоставлять информацию по всем трем вариантам реализации метеорологического прогноза, в силу того, что одной из задач риск-менеджмента является задача планирования, в т. ч. планирование расходов на превентивные меры и резервного фонда на устранение возможного ущерба в случаях, когда ОЯ не предсказывалось. Дело в том, что стоимость превентивных мер зачастую очень высока, так, например, прогноз длительных сильных ветров западных направлений в Петербурге, сопряженный с возникновением нагонной волны в западной части Финского залива, имеет своим следствием закрытие водопропускных сооружений комплекса защиты от наводнений, что является достаточно дорогостоящим мероприятием, помимо этого убытки терпят судовладельцы в связи с закрытием портов. Превентивные мероприятия при прогнозе сильного снегопада в Петербурге подразумевают заблаговременный выход на улицы города порядка 1000 единиц снегоуборочной техники, что тоже не дешево.

Необходимо отметить, что страхование, являющееся одной из функций риск-менеджмента, в связи с погодными рисками выступает достаточно существенным фактором, который ни в коей мере не снижает ущерб, но «размазывает» его между страхователем и страховщиком. В этой связи следует упомянуть:

1) непосредственное страхование рисков от ОЯ, которое недостаточно представлено на рынке страховых услуг;

2) страхование гражданской ответственности владельцев объектов недвижимого и движимого имущества, представляющих определенную опасность;

3) страхование типа АвтоКАСКО (отметим, что, при сильных снегопадах в первую очередь страдают владельцы транспортных средств в связи с резким ростом аварийности).

Тем самым предлагаемая дифференциация возможных ситуаций с прогнозированием ОЯ должна явиться подспорьем для страховых компаний.

Климатические риски. Межгодовая вариативность

Существующие климатические риски — это группа рисков, связанна с достаточно длительными периодами, за которые некоторая климатическая переменная либо превышает критическое значение, либо некоторая интегральная характеристика превышает критическое значение. Сюда относятся как такие ОЯ, как высокая пожароопасность или метеорологическая засуха, так и специализированные риски, не являющиеся ОЯ в строгом смысле, в силу того, что они не являются универсальными, а связаны с конкретными видами жизнедеятельности.

Отметим, что эти риски оказывают большее влияние на экономику, чем рассмотренные погодные риски (наиболее значимое влияние на экономику оказывает засуха). С точки зрения риск-менеджмента эти риски необходимо учитывать в рамках краткосрочных проектов (до нескольких лет), в силу того, что предполагается, что в течение от года до, условно, трех лет климат как таковой практически не изменится. К объектам риск-менеджмента можно отнести сельскохозяйственную деятельность не связанную с резким изменением режима хозяйствования, некапитальное строительство, страхование (типовой договор рассчитан на год), ЖКХ, энергетику, планирование ремонтных работ и т.д.

В этой связи следует выделить в первую очередь риски, связанные с межгодовой вариативностью сезонных значений климатических

переменных. В условиях изменяющегося климата необходимо учитывать не показатели, относящиеся к последним 30 годам (принята ВМО парадигма климатической изменчивости), а их динамику за этот период. В соответствии с общими понятиями теории временных рядов можно выделить два основных источника изменения вероятности возникновения неблагоприятных климатических условий:

- наличие тренда, приводящее к сдвигу функции распределения;
- гетероскедастичность, т. е. неоднородность дисперсий случайной ошибки регрессионной модели.

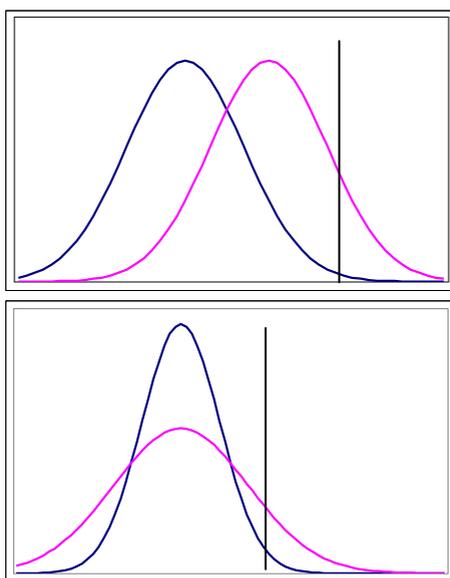


Рис.1.

На рис.1 приведены условные функции распределения вероятности для обоих этих случаев. Синяя кривая – начало периода, красная – конец. Вертикальная черта отделяет критическую зону. Видно, что в обеих ситуациях вероятность попадания в критическую зону растет.

Оба эти эффекта могут действовать одновременно. Помимо этого возможными являются и изменения других параметров функции

распределения (в том случае, если она зависит от двух и более параметров), а также другие механизмы, приводящие к изменению формы функции распределения. Однако надо заметить, что выявление и верификация этих механизмов практически возможна лишь на временных рядах существенной длительности и в рамках принятой ВМО 30-летней парадигмы климатического периода это вряд ли возможно.

С точки зрения риск-менеджмента существующие климатические риски важны для планирования проектов рассчитанных на период от года до нескольких лет. Это в первую очередь — сельскохозяйственная деятельность, страховая деятельность, отчасти добыча полезных ископаемых (к примеру, золота), некапитальное строительство и т. д. Помимо этого понимание существующих климатических рисков является необходимым для исследования долгосрочных климатических рисков (см. ниже).

Риски, связанные с межгодовой вариативностью сезонных значений климатических переменных особое влияние оказывают на агропромышленный комплекс, что определяет рискованность земледелия в России. Это может быть продемонстрировано на данных Федеральной службы государственной статистики (Росстат) (<http://www.gks.ru/>).

За сравнительно короткий период 2000—2010 гг. отношения максимальной средней по стране урожайности к минимальной средней урожайности за тот же период составляют по:

кукурузе	2,7
просу	2,3
рису	2,3
ржи	2,1
гречихе	2,0
ячменю	1,9
пшенице	1,8
овсу	1,6
картофелю	1,5

И это, при том, что в нашей стране велика доля пространственной диверсификации рисков (т. е. низкая урожайность в одном регионе зачастую компенсируется высоким урожаем в другом).

Приведем цитату:

«Погодная и климатическая составляющая вариабельности величины, качества и себестоимости урожая сельскохозяйственных культур во многих регионах России достигает 60—80 %. В зависимости от погоды урожайность важнейших сельскохозяйственных культур варьирует по годам в 2—3 раза в зонах устойчивого увлажнения и в 5—6 раз в засушливых регионах. Вариабельность валовых сборов и урожайности зерновых культур в России значительно выше, чем в ведущих зернопроизводящих странах мира. При одинаковом количестве неблагоприятных лет в последние два десятилетия величина колеблемости урожайности возросла с 11 до 19,4 %, а валовых сборов — с 8,6 до 27,2 %. За период 1991—2008 гг. отклонение от среднего валового сбора зерна в самый засушливый год (1998) составило 28,7 млн т» (Алабушев, 2011).

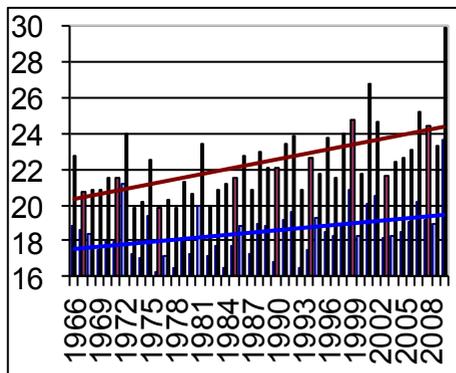
Если взять для примера Волгоградскую область то отношение общего максимального урожая зерновых к минимальному общему урожаю за этот период составило 3,45, а отношение максимального количества осадков к минимальному количеству осадков за вегетационный период — 11,3! При этом среднегодовое количество осадков за 1966—2010 гг. составляет 0,15 мм/сутки со среднеквадратичным отклонением 0,08 мм/сутки. Функция распределения осадков с достаточной степенью точности может быть приближена нормальным законом, при этом относительно большая величина среднеквадратичного отклонения свидетельствует о больших рисках связанных с межгодовой вариативностью сезонных значений. При этом расчет ущерба является достаточно сложной задачей, требующей знания структуры посевных площадей, которая год от года меняется, количества вносимых минеральных и органических удобрений, знания динамики цен на различные зерновые культуры и т. д.

Существующие климатические риски. Внутрисезонная вариативность

Вторым важнейшим фактором, влияющим на экономику, является непосредственный погодный фактор, завязанный на внутрисезонную вариативность. В работе М. А. Салля (2013) проанализирована ситуация с жаркой летней погодой на территории Российской Федерации. Приведем некоторые данные из этой работы, относящиеся к городу Рыльску Курской области. На рис. 2а приведены средняя температура лета (синяя линия) и средняя температура самой теплой десятидневки (коричневая линия) за 1966—2010 гг. Здесь и далее для расчетов использованы данные ВНИИГМИ—МЦД (<http://meteo.ru/>).

Рост средней температуры самой теплой десятидневки обгоняет рост средней температуры лета примерно в 2 раза (коэффициенты наклона 0,091 и 0,045 град/год соответственно).

а)



б)

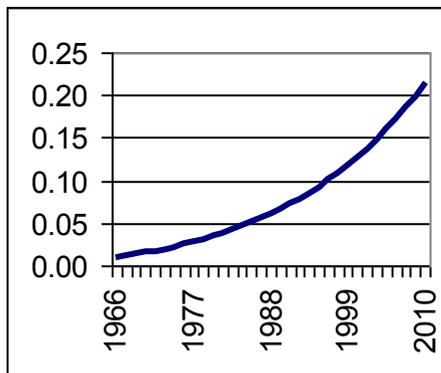


Рис. 2. Средняя температура самой теплой десятидневки — коричневая линия и средняя температура лета — синяя линия (а); вероятность того, что средняя температура самой теплой десятидневки превысит 25,4 °C (б).

Оказывается функция распределения случайной величины, получающейся после вычитания из температуры самой теплой десятидневки трендового значения подчиняется гамма-

распределению, параметры которого могут быть определены (Салль, 2013). Используя этот факт легко рассчитать, что если в середине периода (1988 г.) вероятность того, что средняя температура самой теплой 10-дневки превысит среднюю за период 1966—2010 гг. величину на 3 градуса (что соответствует 25,4 °С) составляла 0,05, то в 2010 году она составляла уже 0,21, т.е. выросла в 4 (!) раза. Отметим, что в 1966 г. эта вероятность составляла 0,01, т.е. отвечала крайне маловероятной ситуации. Тем самым, то, что в начале периода было природной аномалией, проявлявшейся раз в 100 лет, теперь является вполне нормальным явлением с повторяемостью, грубо говоря, раз в 5 лет.

Существующие климатические риски. Гетероскедастичность (временная)

Гетероскедастичностью называется неоднородность дисперсий случайной ошибки регрессионной модели. В простейшем случае (а только он нам и понадобится) мы имеем регрессионную модель вида $y_i = a + bx_i + \varepsilon_i$, где y_i — зависимые значения, x_i — факторные значения, ε_i — остатки регрессии. Тогда модули остатков регрессии могут быть представлены как $|\varepsilon_i| = \alpha + \beta h(x_i) + u_i$, где $h(x_i)$ — некоторая функция факторного значения. Коэффициент $\beta = 0$ отвечает отсутствию гетероскедастичности. Данная вспомогательная регрессия оценивается с помощью стандартного F-теста модели регрессии и, если коэффициенты регрессии признаются значимыми, то гипотеза гетероскедастичности данного вида признается значимой. Данный подход называется статистическим тестом Глейзера.

В следующем примере будет рассмотрен простейший случай, когда $x_i = i$, где i — время в годах, $h(x_i) = i$. Этот случай отвечает линейной зависимости от времени остатков линейной регрессии и отвечает *временной гетероскедастичности*.

Всем памятно обошедшие всю страну по ТВ кадры катастрофического наводнения в Благовещенске в 2013 г. Рассмотрим

эту ситуацию с точки зрения климата, подразумевая, что климатические риски являются составляющей гидрологических рисков. Приведем график (рис. 3) отличия абсолютных величин отклонения количества осадков за самый дождливый месяц теплого времени года от многолетнего среднего (тренд количества осадков за самый дождливый месяц является практически константным).

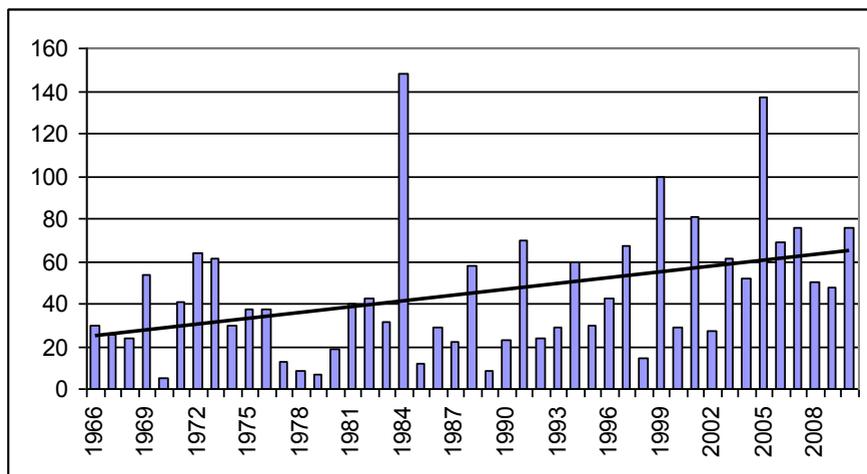


Рис. 3. Отличие абсолютных величин отклонения количества осадков за самый дождливый месяц теплого времени года от многолетнего среднего.

Из рисунка очевидно увеличение зависимости колебаний количества осадков почти в три раза. Значение F-статистики

$F \approx 7,5$ превышает критическое значение 4,3, отвечающее уровню значимости 0,05. Немедленный вывод из этого такой: наводнение, которое было исключительным случаем в 1984 г., с огромной вероятностью может повториться и после 2013 года. Переводя на бытовой язык можно сказать, что в *среднем* в Благовещенске все будет хорошо, только Амур будет либо выходить из берегов, либо пересыхать.

Можно было бы провести и более подробный анализ с вычислением соответствующих вероятностей, но это вряд ли действительно информативно, поскольку на сам факт наводнения влияют осадки выше по течению Амура, причем с определенным запаздыванием, а также осадки в бассейне реки Зея, сток которой регулируется. Соответственно, необходимым является анализ многомесячной предыстории выпадения осадков и регулируемого сброса в бассейне Зеи.

В качестве второго примера рассмотрим пример температуры почвы в первой половине сентября в Алтайском крае и возникновения такого опасного явления (с точки зрения выращивания яровой пшеницы), как заморозки в этот период. Для температуры почвы в первой половине сентября строились линейные тренды (по годам). Значения конечных точек этих линейных трендов соответственно являются также случайными величинами, имеющими линейный тренд. При этом оказывается, что, если на 01.09 тренд имеет восходящий характер с коэффициентом наклона 0,087 град/год, то на 15.09 мы имеем константный тренд, равный 4,2 °С. Может создаться такое впечатление, что заморозки становятся все менее вероятными в силу происходящего потепления. Однако реальная ситуация является прямо противоположной

На рис. 4а представлена динамика модуля отклонений температуры почвы от их трендовых значений. Данный рост имеет существенные последствия. Эти последствия выражаются в том, что рост вариации колебаний температуры относительно трендового значения ведет к увеличению вероятности заморозков.

На рис. 4б представлено математическое ожидание количества заморозков в первой половине сентября, рассчитанное с учетом роста модуля отклонений температуры почвы от их трендовых значений (синий цвет) и фактическое число дней с заморозками (красный цвет). Прямой линией показан общий тренд. Этот результат подтверждает правильность адаптационной стратегии тружеников сельского хозяйства ряда районов Алтайского края, заменивших пшеницу рапсом в рамках существующего там севооборота.

Этот пример ярко демонстрирует, что, несмотря на наличие благоприятных тенденций в изменении климата, возможности для выращивания определенных видов растений могут сокращаться. В ближней перспективе это может быть сопряжено с потерей прибыли, связанной с необходимостью изменения технологий.

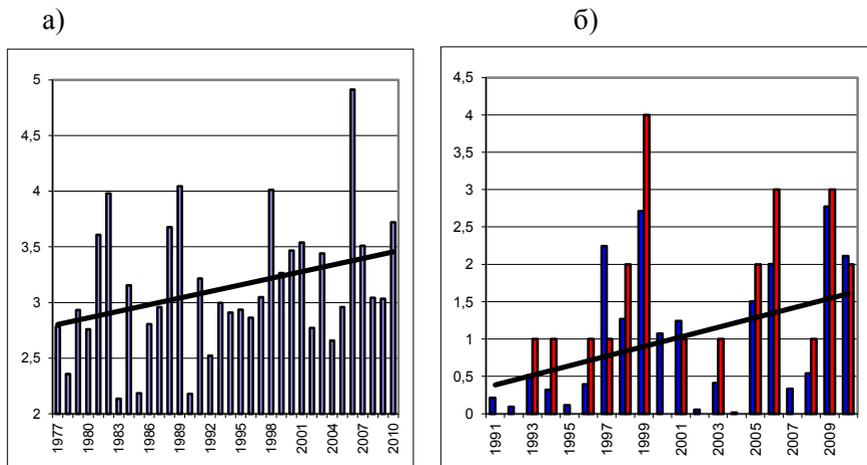
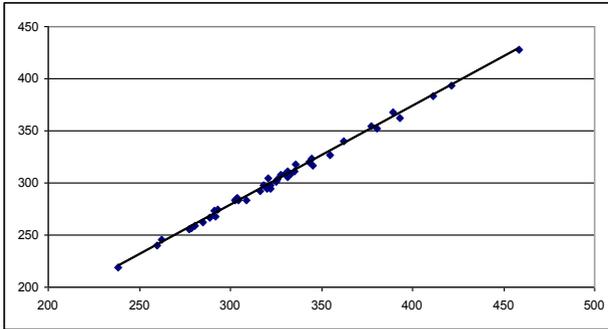


Рис.4. Динамика модуля отклонений температуры почвы от их трендовых значений (а); математическое ожидание (б) количества заморозков в первой половине сентября (синие столбцы) и фактическое число дней с заморозками (красные столбцы), черная линия — линейный тренд.

Существующие климатические риски. Гетероскедастичность (факторная)

В качестве еще одного примера рассмотрим зависимость средней суммы квадратов температур за лето ($\overline{t_i^2}$) от квадрата средней температуры за лето ($\overline{t_i}$) для Москвы за 1966—2010 гг. $\overline{t_i^2} = a + b \cdot \overline{t_i}^2 + \varepsilon_i$. Удивительным образом эта зависимость имеет практически линейный характер (рис. 5а). Особый интерес представляет рис. 5б.

a)



б)

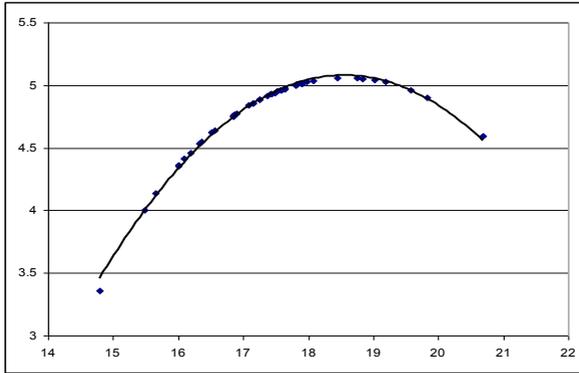


Рис. 5. Зависимость средней суммы квадратов температур за лето от квадрата средней температуры (а) и среднеквадратичного отклонения летних температур от средней температуры за лето (б).
Москва, 1966—2010 гг.

Если учесть, что за рассматриваемый период трендовые температуры менялись от 16,9 °С до 17,9 °С можно сделать вывод о том, что при росте средней температуры лета до 18,5 °С колебания температуры в течение сезона будут возрастать, а потом начнут уменьшаться. Данный вывод основывается на гипотезе о сохранении подобия сезонов. Проверить эту гипотезу можно будет только со временем. Отметим, что эти внутрисезонные колебания температуры

наряду с ростом средней температуры лета и отвечают за так называемые «волны жары».

Долгосрочные риски. Риски трендового типа

Риски этого типа связаны со сложившимися трендовыми характеристиками климатических переменных и связаны с уже случившимся или предполагаемым в течение ближайших лет выходом трендовых значений за допустимые пределы. Эти риски являются, скорее не рисками, а угрозами, которые, могут быть реализованы в ближайшем будущем. В этом смысле их вероятностная природа определяется субъективными факторами (а почему мы выбрали линейный тренд, а не ломаную кривую или не квадратичный тренд?). Вероятностный риск фактически является риском, оцененным лицом, принимающим решения, риском доверия к специалисту. В качестве примера риска трендового типа можно привести пример из нефтегазового сектора экономики, в котором одной из причин аварий является деградация вечной мерзлоты, приводящая к деформации буровых скважин. В таких случаях скважины либо заливают водой, либо ставят дорогостоящие заглушки. Добыча топлива при этом на время (иногда довольно длительное) останавливается. Деградация вечной мерзлоты непосредственно связана с глобальным потеплением климата. А вот дальше начинаются проблемы связанные с массой факторов, которые специалисты будут оценивать по-разному, впрочем, к климату эти оценки будут иметь уже косвенное отношение.

Приведем еще один пример, связанный уже с сельским хозяйством. Рассмотрим сумму активных температур (т. е. среднесуточных температур превышающих 10 °С за май—август) в Краснодаре. На рис. 6 приведена сумма активных температур, ее тренд в виде ломаной кривой, полученной по методу наименьших квадратов, и две суммы активных температур, отвечающие оптимальным условиям вызревания, используемых в настоящее время гибридов (горизонтальные линии).

Экстраполяция данного тренда на ближайшие 10 лет показывает, что, либо надо использовать другие гибриды с другими требованиями к сумме активных температур, либо использовать гибриды с другим вегетационным периодом.

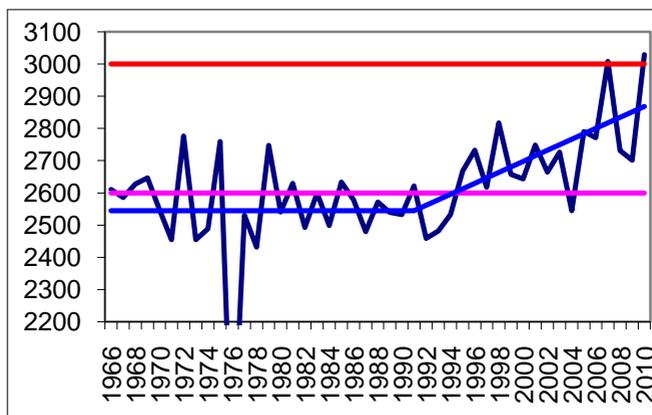


Рис. 6. Изменение суммы активных температур за май—август в Краснодаре.

Отметим, что данная характеристика не является исчерпывающей в плане урожайности кукурузы. На эту урожайность влияет еще масса других более значимых факторов, которые могут быть проанализированы, но достойны отдельного рассмотрения. В рамках концепции рисков трендового типа основным вопросом является вопрос о допустимости линейной экстраполяции данного тренда. Косвенным ответом на него может послужить использование модельных данных.

Долгосрочные риски. Модельные данные

Хотелось бы понять насколько данные получаемые в рамках глобальных климатических моделей полезны с точки зрения изучения рисков, связанных с долгосрочными инвестициями (порядка

нескольких десятков лет, как, например, в строительстве). Самым существенным моментом является существенная неопределенность глобальных климатических моделей, которая отмечалась рядом авторов. Так в работе Knutti and Sedlacek (2013) приведена гипотетическая средняя температура Земли по данным моделей, входящих в CMIP5. В силу всего изложенного в предыдущих пунктах основным требованием, предъявляемым к моделям, является соответствие модельных данных реальным по крайней мере за последние 30 лет по следующим параметрам:

- соответствие трендов;
- соответствие показателей гетероскедастичности;
- соответствие показателей внутрисезонной вариативности.

Только в этом случае модели могут быть использованы для оценки грядущих погодно-климатических рисков.

На рис.7 представлен не претендующий на полноту пример соответствия реальных данных модельным. Приведены трендовые средние температуры лета на конец периода (1980—2010 гг.) и начало (по вертикали), трендовые значения среднеквадратичного отклонения на конец и начало этого же периода (как характеристика гетероскедастичности) для Центрального федерального округа (ЦФО). На рис. 7а кружком помечены реальные данные и модели: Bcc-csm1 (Китай), CSIRO- MK3 (Австралия), Nor-esm (Норвегия). Вне кружка — Can-esm2 (Канада), HADGEM2-ES (Великобритания), Inm-cm4 (Россия), Irs1-cm5a-m (Франция), MIROC5 (Япония).

На рис. 7б — реальные данные и модель Nor-esm (Норвегия). Тот факт, что норвежская модель обладает большой степенью похожести на реальные данные, означает только то, что она хорошо работает *для лета и только в ЦФО*. Если взять аналогичные параметры, относящиеся к другим временам года, то картина будет совершенно иной. Тем самым мы можем отметить, что проблема использования моделей для изучения грядущих погодно-климатических рисков достаточно далека от своего решения.

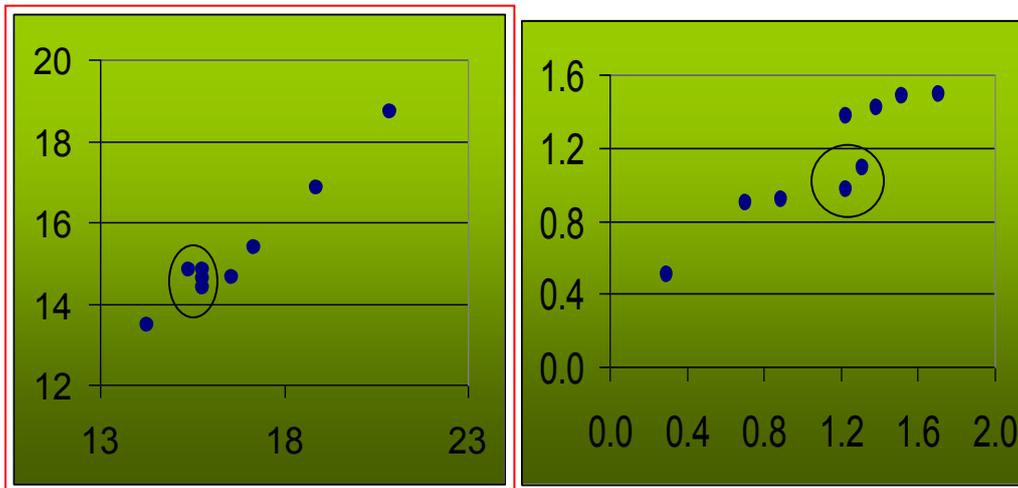


Рис. 7. Трендовые средние температуры лета на конец периода (1980—2010 гг.) и начало (по вертикали) (а); трендовые значения среднеквадратичного отклонения на конец и начало периода (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акентьева Е. М., Кобышева Н. В. (2011) Стратегия адаптации к изменению климата в технической сфере России. // Труды ГГО. Вып. 563. С. 60—76.

Акимов В. А., Богачев В. Я., Владимирский В. К., Новиков В. Д., Лесных В. В., Макеев В. А., Сорокин В. И., Шевченко А. В. (2004). Экономические механизмы управления рисками чрезвычайных ситуаций. / МЧС России — М.: ИПП «Куна». 312 с.

Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н. (2004). Риски в природе, техносфере, обществе и экономике. — М.: Деловой Экспресс. 352 с.

Алабушев А. В. (2011). Сорт как фактор инновационного развития зернового производства. // Зерновое хозяйство России. № 3.

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — мировой центр данных. — Интернет ресурсы: <http://meteo.ru/>

ГОСТ 22.0.03-97/ГОСТ Р 22.0.03-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения.

Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций. (2004). — М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ).

Кобышева Н. В., Галюк Л. П., Панфутова Ю. А. (2008). Методика расчета социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды // Труды ГГО. Вып. 558. С. 62—172.

Лучицкая И. О., Белая Н. И., Арбузов С. А., Босина М. И. (2013). Сценарий адаптации к ураганам. Экономическое обоснование адаптационных мер, принимаемых в условиях рассчитанных рисков, по предотвращению последствий ураганов для электросетевого хозяйства. — Новосибирск: ФГБУ «СибНИГМИ». 53 с.

РД 52.88.629 (2002). Наставление по краткосрочным прогнозам погоды / Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений. Интернет ресурсы: <http://meteoinfo.ru/hazards-definitions>

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики. (2008) / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб.: Росгидромет. 336 с.

Салль М. А. (2013). Статистический анализ температурных изменений на территории Российской Федерации в летний период (за 1966—2010 годы) // Труды ГГО. Вып. 569. С. 113—124.

Федеральная служба государственной статистики (Росстат). — Интернет ресурсы: <http://www.gks.ru/>.

Чепурин Г. В., Вишневецкий Е. П., Салин М. Ю. (2009). Расчет теплофизических характеристик атмосферного воздуха. // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. № 11. С. 62—64.

Climate Change Impacts & Risk Management. A Guide for Business and Government. (2006). — Australian Greenhouse Office. 75 p.

Knutti R. and Sedlacek J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. // Nature Climate Change. Vol. 3. P. 369—373.

Levermore G., Chow D., Jones P. and Lister D. (2004). Accuracy of modeled extremes of temperature and climate change and its implications for the built environment in the UK. // Tundall Centre Technical Report №. 14. April 2004.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АРХИВНОЙ СИСТЕМЕ

С. Г. Долгих, В. М. Шаймарданов

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

Поступила в редакцию 20.08.2014

В настоящее время все данные, накопленные во ВНИИГМИ—МЦД, с МЛ и, частично, с других устаревших технических носителей перезаписаны в автоматизированную архивную систему (ААС), построенную на базе двух роботизированных библиотек (Шаймарданов, 2011). Благодаря современному оборудованию и программным комплексам ААС позволяет надежно и долговременно хранить эти данные.

К сожалению, поставляемые стандартные программные комплексы не позволяют полностью автоматизировать процесс доступа к хранимым данным, а технологически этот процесс еще не реализован. Отсутствие в фонде данных автоматизированного доступа к информации значительно усложняет ведение и обработку запросов пользователей на ее предоставление. Для решения этой актуальной проблемы была проведена работа по автоматизации удаленного доступа к фонду гидрометеорологических данных ААС Росгидромета (Долгих, Шаймарданов, 2013).

Ранее в ходе этой работы было проведено исследование фонда гидрометеорологических данных, которое показало, что фонд неоднороден и содержит различные классы данных: структурированные, неструктурированные, текстовые документы, а также графические образы. Обзор современных стандартов описания геопространственных и архивных данных, показал, что их

использование для фонда, хранимого в ААС, не позволит одновременно упростить и ведение фонда, и обработку запросов пользователей на предоставление данных. В связи с этим разработана новая модель описания данных, которая позволяет систематизировать процесс описания объектов хранения ААС (Шаймарданов, Долгих, 2014). Эта модель легла в основу технологии автоматизированного доступа к фонду гидрометеорологических данных, которая должна обеспечить выполнение следующих функций:

- создание описания для каждого объекта загрузки;
- помещение объекта загрузки в среду хранения;
- долговременное хранение описания объекта и самого объекта;
- выдача списка объектов по поисковому запросу пользователя;
- выдача объекта пользователю;
- составление статистических данных.

Остановимся более подробно на технологии управления данными в ААС. Для реализации этой технологии было принято решение создать web-ориентированную систему с многоуровневой структурой. При таком подходе к созданию системы каждый уровень системы локален и выполняет свою отдельную функцию, что значительно повышает надежность системы и упрощает ее реализацию. Логически система разделена на три уровня: аппаратно-программный уровень, уровень обработки, уровень представления уровня (рис. 1).

Аппаратно-программный уровень — совокупность аппаратной и программной частей системы, обеспечивающих хранение объектов, как уникальных единиц.

Для обеспечения долговременного, надежного хранения данных в аппаратной части (Шаймарданов, Долгих, 2014) используется:

- сервер управления на базе IBM System z9 BC;
- дисковая система корпоративного класса IBM DS8300;
- ленточные библиотеки IBM TS3500;
- сетевые коммутаторы технологий SAN и FICON.

Программная часть представлена в виде программных комплексов IBM Tivoli Storage Manager (TSM) и IBM Content Manager on Demand (CMoD), которые в своей совокупности позволяют управлять системой хранения. Стоит отметить, что именно через интерфейс CMoD аппаратно-программный уровень взаимодействует с уровнем обработки.

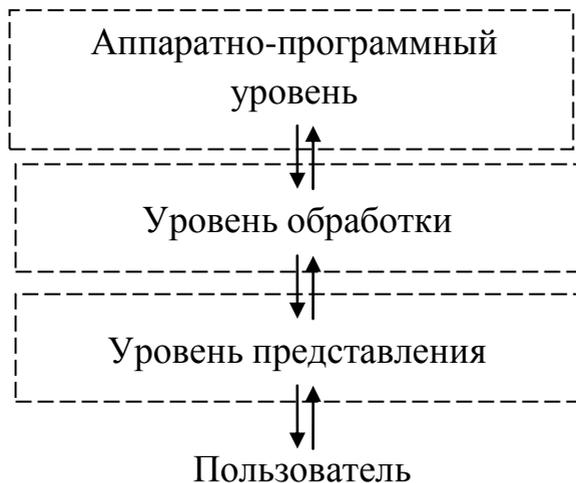


Рис. 1. Уровневая структура системы автоматизированного доступа.

Уровень обработки — совокупность программных решений, позволяющих обрабатывать вновь поступающие данные, является буфером между аппаратно-программным уровнем и уровнем представления. Уровень представлен в виде базы данных (БД) описаний и обработчика запросов. Все объекты хранения, помещенные в систему, должны иметь свои метаданные, занесенные в БД описаний (рис.2).

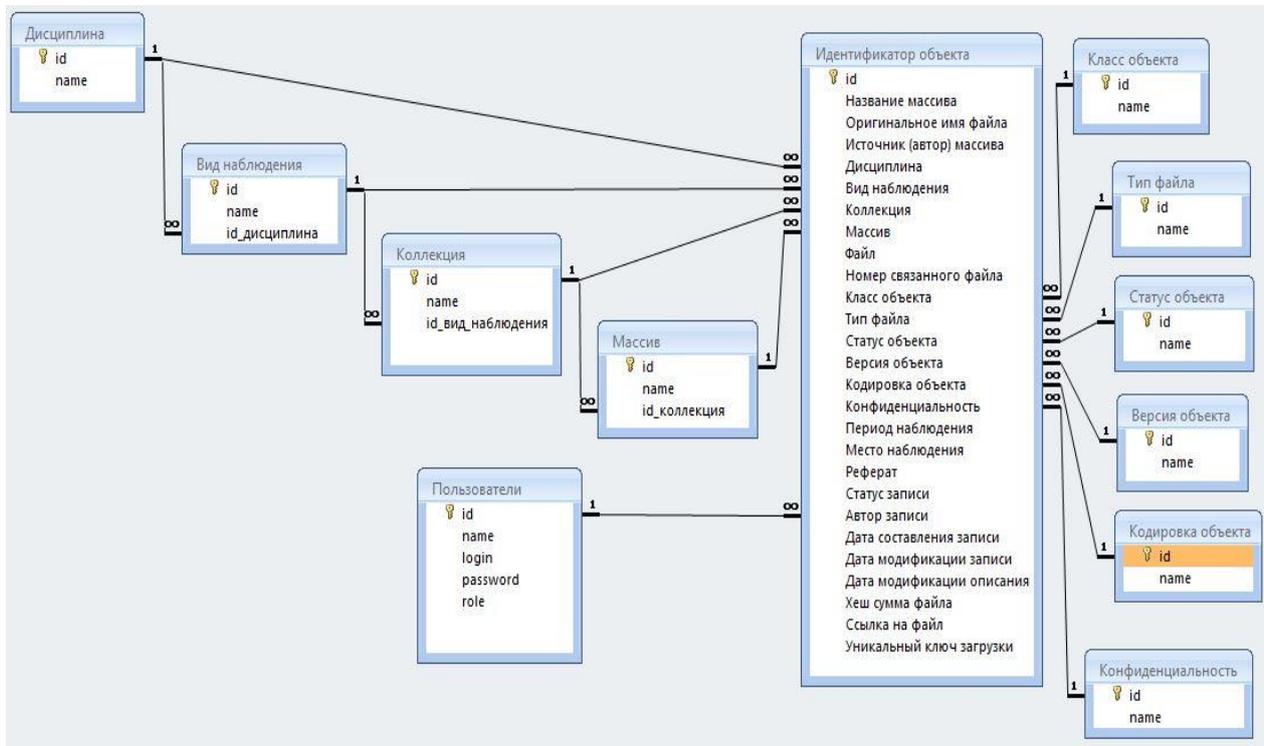


Рис. 2. Схема базы данных описаний объектов хранения.

При интеграции модели описания данных в систему к смысловым полям были добавлены технологические поля, а также были выявлены таблицы, необходимые для использования тематических словарей. Идея внедрения тематических словарей обусловлена желанием минимизировать возможные ошибки при создании описаний объектов хранения.

Обработчик запросов — компонента, обеспечивающая пакетную передачу объектов хранения между уровнем представления и прикладным уровнем. Эта компонента может быть реализована программно или вручную.

Уровень представления — модульная совокупность сервисов графического WEB–интерфейса. Множество независимых сервисов образуют модульный масштабируемый графический WEB–интерфейс (рис. 3).

Сервисы модульного масштабируемого графического интерфейса разработаны с применением среды разработки Eclipse на языке программирования Java. Количество и функциональная ориентированность сервисов выбраны исходя из поставленных задач и требований к функционалу системы. Практический функционал сервисов частично отображен в их названии. Функции системы логически разделены на несколько групп: административные, загрузки данных, ведения и управления данными, поиска данных.

Административные функции — создание учетных записей, распределение прав.

Функции загрузки данных — создание описания, проверка описания, загрузка объектов, просмотр загруженных объектов, создание словарей, редактирование словарей.

Функции ведения и управления данными — создание количественных статистик хранения объектов, создание количественных статистик запросов на выгрузку объектов, создание количественных статистик загрузок объектов, модификация объектов хранения.

Функции поиска данных — создание поискового запроса, выдача списка файлов, выгрузка файла.

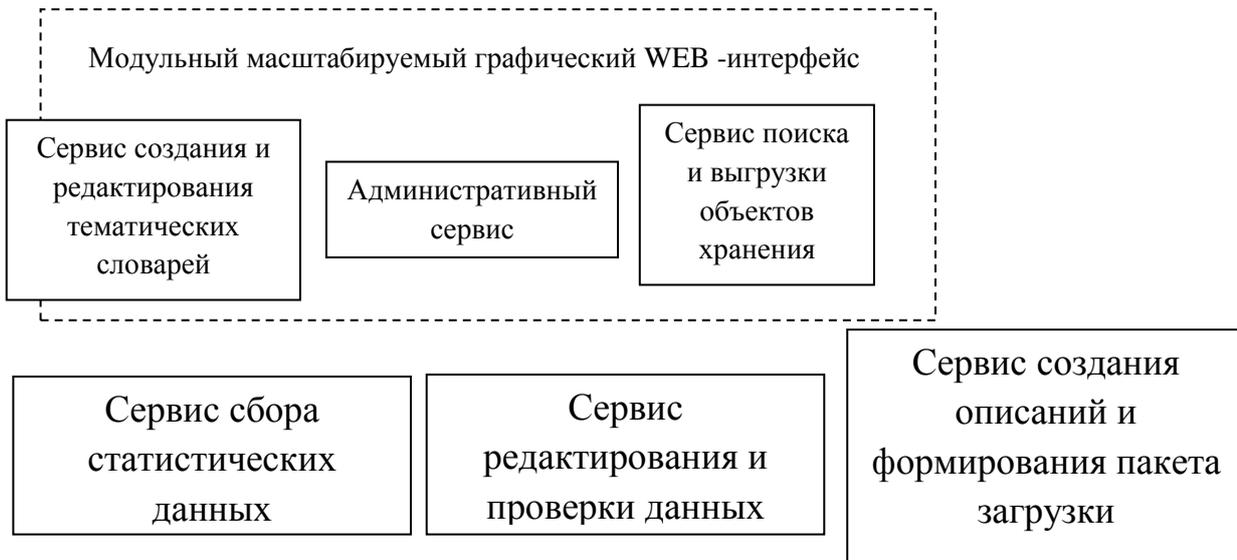


Рис. 3. Сервисы модульного масштабируемого графического интерфейса.

Для ограничения доступа к специальным функциям в системе имеется разделение типов пользователей на четыре группы: администратор, оператор, модератор и обычный пользователь.

Администратор — специалист (или группа специалистов), отвечающий за эксплуатацию технологии и обеспечение ее работоспособности. Администратор отвечает за определение, загрузку, защиту и эффективность работы технологии. В задачи администратора входит: осуществление общего управления технологией, в случае необходимости внесение изменений и корректив в ее работу, слежение за работоспособностью, а также осуществление добавления вновь поступающих данных и описаний, а также, при необходимости, удаление данных, выполнение их корректировки.

Оператор — специалист, осуществляющий и отвечающий за ограниченный круг задач, решаемых технологией. Основной задачей является составление описаний для вновь поступающих данных и формирование пакета данных для загрузки в технологию.

Модератор — специалист (или группа специалистов), отвечающий за проверку созданных описаний и пакета данных. Основной задачей является сопоставление наличия объекта загрузки и его описания, индексирование объекта загрузки.

Обычный пользователь — лицо или коллектив, работающий с технологией. Обычный пользователь, обладающий специальными знаниями в данной области, использует технологию для получения сведений необходимых для расчетов или исследований. Пользователь, не обладающий специальными знаниями, использует технологию для получения дополнительных сведений.

На функциональной схеме WEB-ориентированной системы (рис. 4) показано взаимодействие компонентов системы и ее пользователей

При работе в WEB-ориентированной системе, каждый оператор имеет свое отдельное рабочее пространство, в которое порционно добавляются объекты для описания и формирования пакета данных. Процесс создания описания объекта загрузки выполняется оператором и происходит путем заполнения специальной WEB-формы (рис. 5).

Большинство полей формы предоставляют выбор значения из списков, сформированных из тематических словарей, что значительно снижает вероятность грамматической ошибки. Заполнив поля формы и загрузив объект, оператор формирует пакет данных необходимый для добавления объекта в систему хранения.

Процесс проверки содержания и подготовки пакета данных для загрузки выполняют модераторы системы. Модератор сопоставляет наличия объекта загрузки и его описания, затем происходит индексация объекта загрузки. При обнаружении отсутствия одного из компонентов в пакете данных, в котором была найдена ошибка, к дальнейшей обработке не будет допущен.

Процесс загрузки объекта в среду хранения выполняет администратор системы путем помещения объекта в специализированную среду долговременного хранения данных с помощью программного комплекса СМoD. Для этого процесса необходимы объект загрузки и его индексный файл. Индексный файл содержит уникальный составной код загружаемого объекта. По окончании формирования индексного файла формируется пакет данных состоящих из объектов и индексного файла, которые передаются на этап загрузки в долговременную среду хранения

Процесс поиска данных выполняется всеми видами пользователей с помощью WEB-интерфейса системы. Пользователь заполняет поисковую WEB-форму и тем самым формирует список критериев, по которым будет производиться поиск данных. После формирования критериев, производится запрос к БД с описаниями, где происходит отбор записей, которые соответствуют этим критериям. Пользователь может видеть результат отбора с помощью WEB-интерфейса в виде списка. Если список оказался пуст или пользователь не обнаружил искомый объект, пользователь формирует новый список критериев. В ином случае пользователь выбирает необходимый объект для выгрузки, после чего формирует заявку на выгрузку объекта. Администратор системы, получив заявку, выгружает объект пользователю.

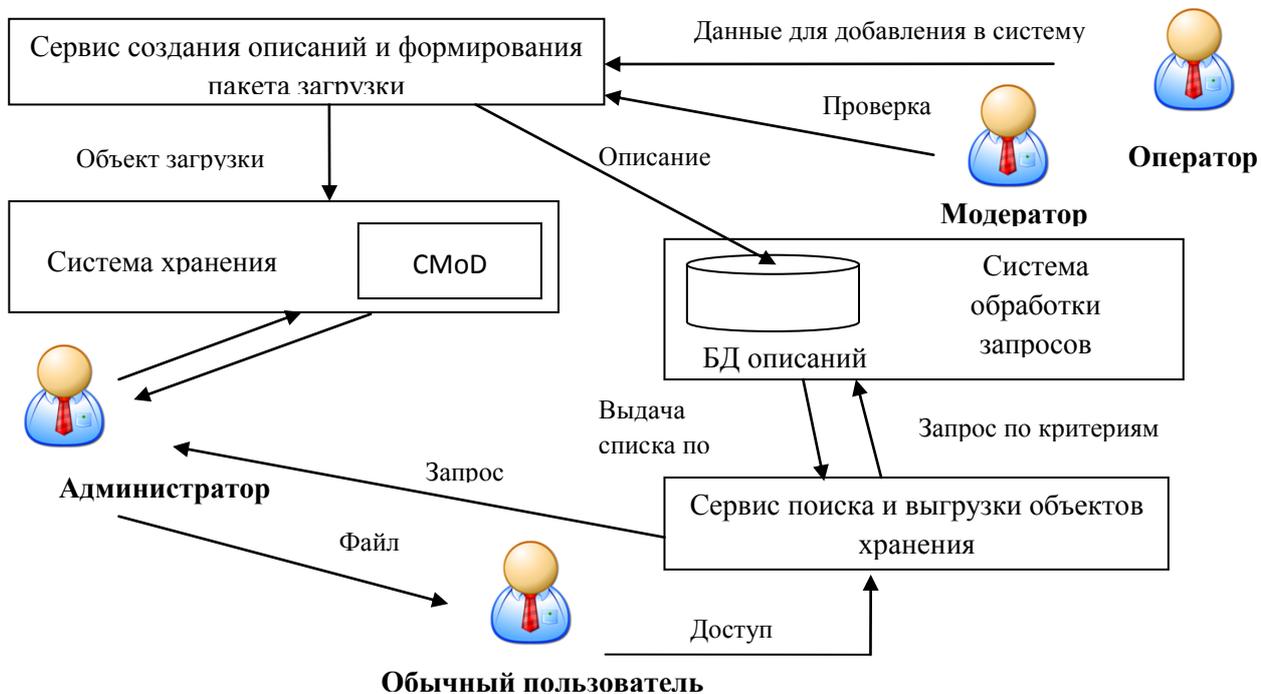


Рис. 4. Функциональная схема WEB-ориентированной системы автоматизированного доступа к данным фонда гидрометеорологической информации.

Описание файла

Выберите файл:	ardm.dat
Оригинальное имя файла:	ardm.dat
Источник (автор) массива:	ВНИИГМИ-МЦД
Дисциплина:	Геофизика
Вид наблюдения:	актинометрия
Коллекция:	Морская актинометрия
Массив:	моракт
Уникальный индекс загрузки:	01001003000100001
Индекс связанного файла:	NULL
Класс объекта:	Структурированные данные не ЯОД
Статус объекта:	Базовый
Версия объекта:	Последняя
Конфиденциальность:	Открытый
Кодировка объекта:	Без кодировки
Расширение файла:	.dat
Место наблюдений:	СССР
Период наблюдения:	01.1970-01.1989
Начало наблюдения Конец наблюдения	
Месяц Год Месяц Год	
01 19 01 89	
Добавить период	
Примечание:	
<div style="border: 1px solid gray; height: 100px;"></div>	
Создать описание Закрыть	

Рис. 5. WEB-форма создания описания объекта загрузки.

В настоящее время технология развернута и функционирует во ВНИИГМИ—МЦД. Реализованные функции позволяют полноценно использовать систему по назначению: добавлять новые объекты в среду хранения и выдавать пользователям данные в случае их запроса. Дальнейшее использование технологии и добавление новых объектов хранения WEB-ориентированную систему позволит существенно упростить ведение фонда данных и обработку запросов пользователей на предоставление данных. Кроме того концепция многоуровневой масштабируемой структуры позволяет в случае необходимости добавить новый необходимый функционал. Дальнейшее развитие технологии позволит решить ряд других проблем, связанных с хранением большого объема специфических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Долгих С. Г., Шаймарданов В. М. (2013). Разработка системы автоматизированного управления фондом гидрометеорологических данных архивной системы Росгидромета / В сб.: Материалы научной конференции ITS. — Минск. С. 28—29.

Шаймарданов В. М. (2011). Развитие архивной системы данных о состоянии окружающей природной среды на базе современных технических средств // Труды ГГО. Вып.563. С. 179—190.

Шаймарданов В. М., Долгих С. Г. (2014). Создание технологии управления данными в автоматизированной архивной системе // Труды ГГО. Вып. 572. С. 162—174.

УДК 551.583

Новое поколение климатических моделей. Павлова Т. В., Катцов В. М., Мелешко В. П., Школьник И. М., Говоркова В. А., Надежина Е. Д. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 5—64.

Выполнена оценка качества глобальных климатических моделей СМIP5. Основное внимание уделено расчетам климата на территории Российской Федерации. Сравнительный анализ моделей СМIP5 проводится не только с имеющимися данными наблюдений и реанализов, но и с данными предшествующей фазы проекта СМIP — СМIP3, создавшего основу для Четвертого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2007) и Первого оценочного доклада Росгидромета (ОД_РФ-1, 2008).

Ключевые слова: климатические модели, оценки качества, данные наблюдений, данные реанализа.

Табл. 3. Ил. 17. Библ. 72.

УДК 551.583

Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. Школьник И. М., Мелешко В. П., Кароль И. Л., Киселев А. А., Надежина Е. Д., Говоркова В. А., Павлова Т. В. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 65—118.

Проанализированы сценарии антропогенных воздействий на глобальную климатическую систему. Получены оценки ожидаемых в XXI веке глобальных изменений климата. Изменения характеристик климата на территории России, полученные по ансамблю наиболее продвинутых сейчас климатических моделей, качественно согласуются с оценками моделей предыдущего поколения. Влияние глобального потепления на климат России будет выражаться, главным образом, в формировании в большинстве федеральных округов более мягкого и влажного климата по сравнению с последними десятилетиями.

Ключевые слова: климатические модели, оценки качества, региональные изменения климата.

Табл. 6. Ил. 16. Библ. 23.

УДК 551.584.31

Закономерности изменения скорости ветра с высотой на подветренном склоне горного хребта (на примере северного склона хребта Аибга). Пигольцина Г. Б., Зиновьева Н. А. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 119—130.

Выполнена количественная оценка изменения скорости ветра с высотой на подветренном склоне горного хребта в зимний сезон по данным наблюдений автоматических метеостанций, установленных на разных высотах над уровнем моря. Предложена методика расчёта вертикального профиля скорости ветра на горных склонах при недостаточном метеорологическом освещении местности.

Ключевые слова: скорость ветра, горный рельеф, изменчивость высотная.

Табл. 2. Ил. 4. Библ. 9.

УДК 551.594

Точностные характеристики разностно-дальномерной системы местоопределения гроз. Кононов И. И., Снегуров А. В., Снегуров В. С., Юсупов И. Е. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 131—141.

Рассматриваются точностные характеристики развёрнутой в настоящее время в Европейской части России и Урале многопунктовой системы местоопределения гроз, в основе которой используется разностно-дальномерный метод местоопределения сильно точных молниевых разрядов. Анализируются основные источники ошибок, обусловленные погрешностями временной привязки к сигналам атмосфериков в разнесенных пунктах системы, приводятся результаты модельных и экспериментальных оценок величин этих погрешностей и обсуждаются возможные пути их уменьшения.

Ключевые слова: точностные характеристики, многопунктовая система местоопределения гроз,

Ил.2. Библ.7.

УДК 551.521.64

Анализ погрешностей определения координат мелкомасштабных атмосферных электрических разрядов. Дивинский Л. И., Майборода Л. А. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 142—169.

Оценены погрешности определения координат широкополосных импульсов радиоизлучения, возникающего при мелкомасштабных атмосферных разрядах. Рассмотрена четырехпунктная разностно-дальномерная система пеленгации, позволяющая определить три координаты источника излучения. Исследован вариант пеленгационной системы, состоящей из центрального пункта приема, который расположенный в центре равностороннего треугольника с радиусом описанной окружности 30 км, и трех периферийных пунктов, расположенных в вершинах треугольника. При расчёте учтены погрешности в оценках координат фазовых центров антенн в пунктах приёма и погрешности измерений моментов прихода сигнала к разным пунктам. Рассчитаны погрешности, возникающие при оценке координат источников радиоизлучения. Установлено, что погрешности в оценке координат существенно меньше, чем погрешности оценки высоты источника радиоизлучения.

Погрешность оценок моментов прихода излученного сигнала к пунктам приёма должна укладываться 20-40 нс. Это может быть достигнуто при использовании сигналов космических систем спутниковой навигации.

Ключевые слова: грозы, радиоизлучение, координаты разрядов, погрешность оценок координат, поражения самолётов молниями.

Табл. 2. Ил. 6. Библ. 14.

УДК 551.510

К вопросу об индикаторах качества воздуха. Безуглая Э. Ю., Ивлева Т. П., Смирнова И. В. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 170—182.

Рассмотрены отношения максимальных к средним значениям реальных концентраций примесей и их предельно допустимых концентраций (ПДК). Показана необходимость дополнительных критериев для правильной оценки степени загрязнения атмосферы за год.

Ключевые слова: предельно допустимые концентрации, критерии оценки, загрязнение атмосферы, индикаторы качества воздуха.

Табл. 2. Рис. 3. Библ. 11.

УДК 551.584.31

Погодно-климатические риски как объект управления. Салль М. А. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 183—203.

Основной целью работы является идентификация той "подложки риск менеджмента", за которую отвечает наука о климате. Обсуждаются различные статистические механизмы, которые описывают климатические явления. Эти статистические механизмы играют роль природной основы риск-менеджмента.

Ключевые слова: погодно-климатические риски, риск-менеджмент, климатические явления.

Табл. 1. Ил. 7. Библ. 17.

УДК 002.5: 551.5: 681.5

Развитие технология управления данными в автоматизированной архивной системе. Долгих С. Г., Шаймарданов В. М. Труды ГГО. 2014. Вып. 575. С. 204—214.

Для ведения файлов гидрометеорологических данных на базе автоматизированной архивной системы Росгидромета, с целью обеспечения поиска, создана система управления данными. Она реализована в виде web-технологии, которая разделена на три уровня: аппаратно-программный уровень, уровень обработки, уровень представления. На каждом из уровней реализован определенный функционал, отвечающий за выполнение соответствующих задач.

Ключевые слова: Технология, управление данными, гидрометеорология.

Ил. 5. Библ. 3.

New generation of climate models. Pavlova T. V., Kattsov V. M., Meleshko V. P., Shkolnik I. M., Govorkova V. A., Nadyozhina E. D. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 5—64.

The quality of global climate models CMIP5 was estimated. Emphasis is placed on the calculations of climate in the Russian Federation. Comparative analysis of models CMIP5 carried out not only with observations and reanalyses, but also with data of the previous phase of the project CMIP - CMIP3, which created the basis for the IPCC Fourth Assessment Report (IPCC, 2007) and the first assessment report of Roshydromet.

Keywords: climate models, estimate of quality, observations, reanalyses.

Tab. 3. Fig. 17. Ref. 72.

Expected climate change on the territory of the Russian Federation in the XXI century. Shkolnik I. M., Meleshko V. P., Karol I. L., Kiselev A. A., Nadyozhina E. D., Govorkova V. A., Pavlova T. V. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 65—118.

Scenarios of anthropogenic impacts on the global climate system were analyzed. Estimates of expected global climate change in the XXI century were obtained. Changes in the characteristics of climate in Russia received over the ensemble of the most advanced climate models are in qualitative agreement with the estimates of the previous generation models. Impact of global warming on the climate in Russia will be mainly expressed in the formation softer and more humid climate in comparison to the last decade in most federal districts.

Keywords: climate models, estimate of quality, regional climate change.

Tab. 6. Fig. 16. Ref. 23.

Regularities of wind speed variation with altitude at the downwind slope of mountain range (the case of northern slope of Aibga range). Pigoltsina G. B., Zinovyeva N. A. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 119—130.

Quantitative estimation of wind speed variation with altitude at the mountain range in winter season according to the data from automatic meteorological stations at the variable heights was fulfilled. Estimating method for wind speed vertical profile at the mountain slope in the absence of meteorological information was provided.

Keywords: wind speed, mountain relief, variation with altitude.

Tab. 2. Fig. 4. Ref. 9.

Accuracy characteristics of difference time of arrival system of lightning location. Kononov I. I., Snegurov A. V., Snegurov V. S., Yusupov I. E. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 131—141.

Accuracy characteristics of the multi-station lightning location system based on the difference time of arrival techniques, installed now in Russia and covered its European area (part) and Ural are considered. The main sources of lightning location mistakes caused by the errors of signal time of arrival determination in the separate sites of location system are analyzed. Results of model and experimental estimates of these errors are given and the possible ways of their reduction are discussed.

Keywords: accuracy characteristics, multi-station lightning location system.

Fig.2. Ref.7.

Error analysis of determining of small-scale atmospheric electrical discharges coordinates. Divinsky L. I., Majboroda L. A. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 142—169.

The error of determining the coordinates of broadband pulses of radio-emission arising in the small-scale atmospheric discharges estimated. Four-point range-difference direction-finding system allowing determining three coordinates of radiation source is considered. Version of the system consisting of central receiving point, which is located in the center of equilateral triangle with the radius of circumscribed circle of 30 km, and three peripheral points located at vertices of the triangle, is studied. At that the errors of estimation of coordinates of antenna phase centers at receiving points and errors of measurements of signal arrival moments to different points taken into account. The errors arising in estimation of radio sources coordinates are calculated. It is found out that the errors of estimation x and y coordinates is substantially less than the errors of estimation of the radio source height. The error of estimations of arrival moments of the emitted signal to the receiving points should not exceed 40 ns. This can be achieved by using signals of space satellite navigation systems.

Keywords: thunderstorms, radio-emission, discharge coordinates, errors of coordinates estimations, defeat of aircrafts by thunderbolt.

Tab. 2. Fig. 6. Ref. 14.

Indicators of ambient air quality. Bezuglaya E. Yu., Ivleva T. P., Smirnova I. V. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 170—182.

The paper considers the relations of maximum to mean values real pollutants concentrations and their maximum permissible concentrations (MPC). It is shown that criteria are necessary for the correct estimation of the degree of air pollution for a year.

Keywords: Maximum permissible concentrations , criteria for the correct, air pollution, indicators of ambient air quality.

Tabl. 2. Fig. 3. Ref. 11.

Risk management of weather and climate phenomena. Sall M. A. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 183—203.

The main objective of this work is the identification of the "substrate of risk management" for which meets the science of climate. Different statistical mechanisms that describe climate phenomena are discussed. These statistical mechanisms perform a role of a natural basis of risk management.

Keywords: weather and climate phenomena, risk management, the science of climate

Tab. 2. Fig. 4. Ref. 17.

The development of technology of data management in an automated archival system. Dolgih S. G., Shaymardanov V. M. Proceedings of MGO. 2014. V. 575. P. 204—213.

A data control system has been created to manage hydrometeorological data files based on the Roshydromet's automated archival system in order to provide for a search. It is built in the form of web-technology divided into the following three levels: hardware/firmware, processing and presentation levels. A certain functional that is responsible for implementing relevant tasks is applied at each level.

Keyword: Technology, data management, hydrometeorology.

Fig. 5. Ref. 3.