

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А.И. Воейкова

Выпуск

574

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

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 обсер-
ватория им. А.И. Воейкова»,
2014

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Н. В. Кобышева.</i> Методика экономического обоснования адаптационных мероприятий, связанных с изменением и изменчивостью климата.....	5
<i>П. В. Спорышев, В. М. Катцов, В. П. Мелешко, Г. В. Алексеев, И. Л. Кароль, В. М. Мирвис.</i> Причины наблюдаемых изменений климата.....	39
<i>Е. И. Хлебникова, Т. А. Дацюк, И. А. Салль.</i> Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс	125
<i>В. В. Стадник, В. В. Елистратов.</i> Возобновляемые энергетические ресурсы.....	179

CONTENTS

<i>N. V. Kobyisheva.</i> Method of economical substantiation of adaptation measures related with changes and variability of climate.....	5
<i>P. V. Sporyshev, V. M. Kattsov, V. P. Meleshko, G. V. Alekseev, I. L. Karol, V. M. Mirvis.</i> Causes of observed climate change.....	39
<i>E. I. Khlebnikova, T. A. Datsyuk, I. A. Sall.</i> Climate change impacts on construction, land transportation, and energy industry.....	125
<i>V. V. Stadnik, V. V. Elistratov.</i> Renewable Energy Sources.....	179

МЕТОДИКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, СВЯЗАННЫХ С ИЗМЕНЕНИЕМ И ИЗМЕНЧИВОСТЬЮ КЛИМАТА

Н. В. Кобышева

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

E-mail: kobyshnv@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 8.09.2014

Поступила после доработки 22.10.2014

Введение

Цель данной публикации — ознакомить читателей с основными принципами и методами разработки адаптационных мероприятий к изменениям и изменчивости климата и их экономического обоснования для объектов технической сферы. Достижение данной цели и результаты ее реализации в системе Росгидромета должны способствовать обеспечению в условиях меняющегося климата приемлемого уровня гидрометеорологической безопасности и устойчивого развития экономики страны.

Адаптация в данной работе рассматривается как система управления гидрометеорологическими рисками, возникающими под влиянием угроз, создаваемых изменениями и изменчивостью климата.

Управление рисками основывается на результатах исследований влияния изменений климата на объекты отраслей экономики и оценке последствий изменения климата. Можно считать, что в настоящее время эти задачи в первом приближении решены: создана система специализированных климатических показателей и оценены последствия возможных изменений климата для различных секторов экономики (Энциклопедия, 2005; Руководство, 2008; Оценка, 2011).

Несмотря на то, что система специализированных климатических показателей безусловно нуждается в дальнейшем совершенствовании и более полной интеграции ее элементов в нормативные документы, в ней нашли отражение особенности функционирования отраслей экономики в условиях меняющегося климата, что является отправным моментом для разработки алгоритма адаптации.

Методология оценки климатических рисков и управления ими находится в стадии становления (Галюк и др., 2008; Кобышева и др., 2008; Акентьева и др., 2011). В настоящей работе значительное внимание уделяется систематизации и структурированию основных положений и методу расчета рисков.

1. Основные понятия и термины

В работе используются следующие понятия и термины:

Опасное метеорологическое явление (ОЯ) — явление, которое по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения представляет угрозу жизни и здоровью граждан, а также может нанести значительный материальный ущерб.

Неблагоприятное условие погоды (НУП) — условие погоды, оказывающее негативное воздействие на хозяйственную деятельность, но по своей интенсивности, продолжительности и охвату не достигшее критериев опасного метеорологического явления, установленного в перечне опасных гидрометеорологических явлений, утвержденных Росгидрометом от 15.10.99 № 104.

Аномальное климатическое условие (АКУ) — климатическое условие, складывающееся в результате процесса изменения климатических факторов и влияющее на экологическую и социально-экономическую обстановку на данной территории.

Метеорологическая опасность (угроза) — создаваемая в результате изменения климата опасность для реципиентов в различных секторах экономики на рассматриваемой территории под воздействием ОЯ или НУП.

Бедствие — реализовавшаяся метеорологическая опасность.

Гидрометеорологическая безопасность — состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от воздействия опасных природных явлений, изменений климата (ФЗ «О гидрометеорологической службе», ст. 1).

Реципиент — объект (система объектов), подверженный климатическому воздействию.

Риск — сочетание вероятности и последствий наступления опасного или неблагоприятного события; риск определяется как произведение вероятности конкретной метеорологической опасности на условную вероятность уязвимости реципиента, который может оказаться подверженным этой опасности; выражается в долях единицы или процентах.

Экономический риск — произведение вероятности метеорологической опасности на величину ущерба; выражается в стоимостных единицах.

Нематериальный риск — вероятность угроз, для оценки масштаба которых невозможно либо недостаточно применять стоимостные показатели (например: социальная напряженность, угрозы национальной безопасности и др.)

Ущерб — материальные или финансовые потери, возникшие в результате ОЯ, НУП или АКУ.

Управление рисками — процесс принятия и выполнения управленческих решений, направленных на уменьшение риска до уровня, который общество считает приемлемым.

Адаптация — приспособление природных, антропогенных или смешанных природно-антропогенных систем в ответ на фактическое или ожидаемое воздействие климата или его последствия, которое позволяет уменьшить вред или использовать благоприятные возможности.

2. Структура системы управления рисками

2.1. Порядок подготовки решения об адаптации

Данная структура в масштабе страны или на конкретной территории включает целый ряд элементов, обеспечивающих оценку риска и меры по его минимизации. На рис. 1. представлена часть структурной схемы, в которой указаны основные факторы риска.

На рис. 2. показан механизм анализа риска, позволяющий принять решения об адаптации.

2.2. Выбор и описание реципиента

В качестве реципиентов рассматриваются объекты экономики в масштабах страны, региона, административной области, поселения (города, поселка, дачного участка, городской застройки и т. д.), а также отдельные конкретные объекты. Во всех случаях, кроме последнего, речь идет об угрозе для некоторой территории.

Определяются следующие параметры реципиента: размер площади, количество жителей на выбранной территории, величина ВВП для территории в целом и доля ВВП, приходящаяся на одного человека. Территории большого размера следует предварительно разделить на районы.

Помимо формального описания реципиента оцениваются его подверженность природным воздействиям (прежде всего к воздействию метеорологических факторов), ОЯ, НУП и АКУ.

Типовые перечни опасных природных явлений и критерии гидрометеорологических явлений, сочетания которых образуют ОЯ, содержатся в РД 52.88.699 (Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновения опасных природных явлений, 2008). Перечень и критерии неблагоприятных условий погоды составляется каждым УГМС в зависимости от особенностей развития экономики в границах УГМС. Влияние ОЯ и НУП на основные отрасли экономики подробно изложены в указанных во введении публикациях и «Памятке» Росгидромета (www.meteorf.ru).

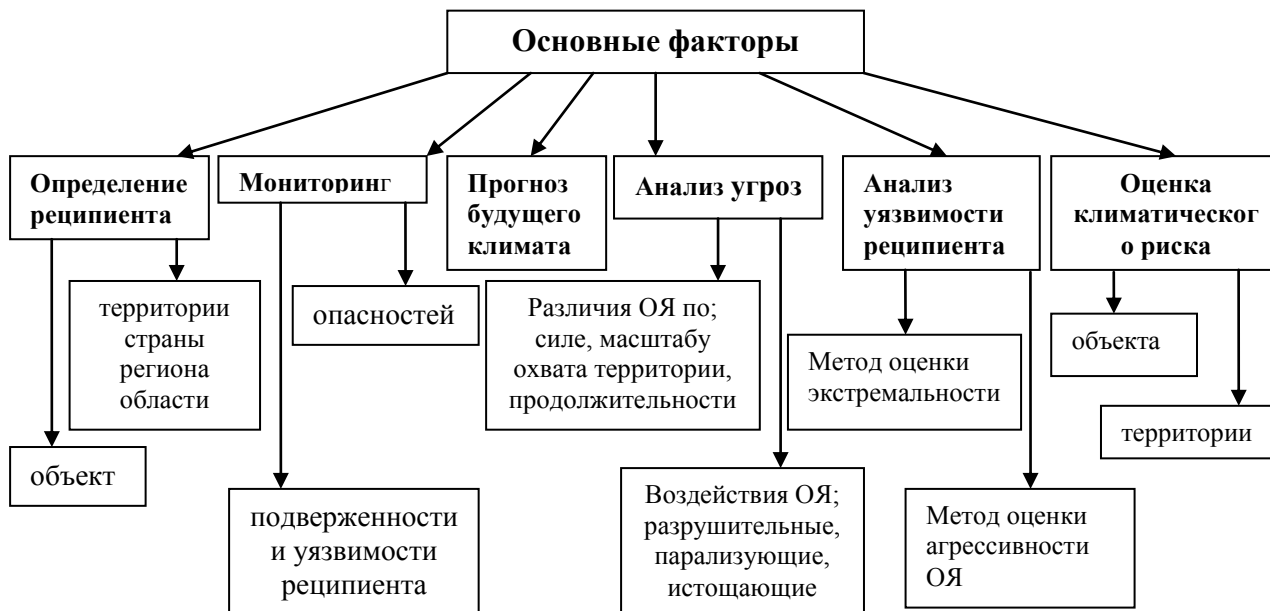


Рис. 1. Схема факторов риска.

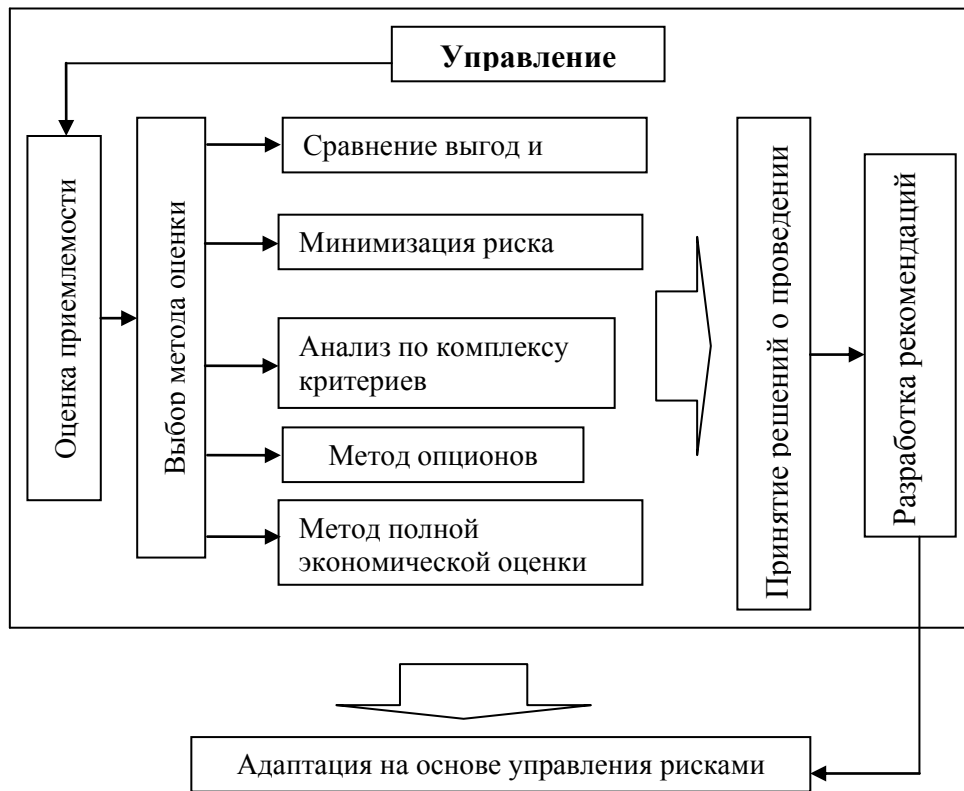


Рис. 2. Схема подготовки решения об адаптации.

Аномальные климатические условия АКУ возникают вследствие нестационарности метеорологических процессов, т. е. процессов, имеющих определенную тенденцию развития во времени. Различают нестационарность по математическому ожиданию, дисперсии, асимметрии (нестационарность в широком смысле) и нестационарность по функции распределения (нестационарность в узком смысле).

Для дальнейшей экономической оценки рисков в данном разделе целесообразно указать долю ВВП, приходящуюся на выбранный реципиент.

2.3. Мониторинг метеорологических условий и подверженности им реципиента

Для оценки рисков выполняются два вида мониторинга: метеорологический (ОЯ, НУП и АКУ) и мониторинг подверженности реципиента воздействию ОЯ, НУП и АКУ.

Метеорологический мониторинг входит в Единую государственную систему экологического мониторинга, осуществляемого Министерством природных ресурсов. Основное внимание уделяется слежению за метеорологическими ситуациями, которые по силе, масштабу распространения и продолжительности оказывают негативное влияние на жизнедеятельность населения, т. е. ОЯ и НУП.

Второй вид мониторинга — технический мониторинг, т. е. слежение за состоянием реципиента (изменением технической системы). Тренды уязвимости объектов инфраструктуры возникают в случае роста количества технических объектов, исчерпавших свой срок эксплуатации или при учащении нарушений технологий строительства и др. Нарушение стационарности состояния реципиента, например, может заключаться в увеличении числа старых зданий, в которых долго не производился капитальный ремонт.

Технический мониторинг осуществляется совместно климатологами и специалистами в областях потребления.

Мониторинг может быть глобальным, региональным, национальным и местным.

При анализе метеорологических условий предпочтение чаще отдают результатам глобального и регионального мониторинга. При оценке подверженности реципиента в первую очередь ориентируются на данные местного и в крайнем случае национального мониторинга.

В результате мониторингования выделяются тренды метеорологических величин и явлений, АКУ экстремумов и тенденции изменения экстремумов метеорологических величин и связанных с ними ОЯ и НУП, а также опасные явления «срыва», обусловленные специфическими режимами функционирования неравновесных, неустойчивых геосистем (лавины, торнадо, ураганы).

2.4. Оценка будущего климата

Риски на будущее (середину и конец XXI столетия) рассчитываются по результатам моделирования будущего климата. Имеется обширная литература по описанию сценариев и моделей будущего климата, а также построены карты значений основных метеорологических величин для территории России и всего мира на середину и конец XXI века. Наряду с результатами глобального моделирования для территории России может использоваться также региональная модель (<http://voeikovmgo.ru/>).

Данная расчетная информация, так же как и климатическая информация о текущем климате, служит основой для вычисления рисков как на ближайшее, так и на отдаленное будущее. Трудности использования результатов моделирования заключаются в меньшей детализации данной информации, например, в отсутствии или большой неопределенности модельных срочных данных, которые позволили бы получать количественные характеристики ОЯ и НУП для будущего климата. В результате приходится прибегать к косвенным методам расчета ряда специализированных показателей климата. По имеющемуся климатическому материалу за прошедшие

годы устанавливаются связи недостающих характеристик с базовыми показателями. Например, с базовыми климатическими показателями связывают повторяемость некоторых ОЯ и т. п. Предполагается, что эти связи сохраняются и в будущем.

Для расчета будущих экономических рисков по модельным данным следует учитывать дополнительно «дисконтную ставку» на прогнозируемую дату. Дисконтная ставка зависит от инфляции.

Естественно, что значение риска на середину и конец ХХI века будет менее точным, чем такое же для текущего и ближайшего климата.

2.5. Анализ природных угроз реципиенту

Наибольшие угрозы реципиенту создают ОЯ, которые различаются по механизмам возникновения, характеру и силе воздействия (агрессивности), продолжительности действия и по охвату территории.

По механизму и характеру воздействия ОЯ и НУП различают:

- экстремальные ОЯ, производящие поражающее (разрушительное) действие. Например: тайфуны, смерчи, ураганы, штормы, град и т. п.

- ОЯ, оказывающие парализующее действие, останавливающие движение транспорта, прекращающее работы на открытом воздухе и т. п. К ним относятся: сильные гололед и гололедица на дорогах, сильные туманы, ветер; сильный ветер при отрицательной температуре воздуха и т. п.

- ОЯ и НУП, истощающие, уменьшающие урожай, запасы лесных ресурсов и др. Например: засуха, сильные морозы и т. п.

Наиболее опасными являются поражающие ОЯ. Они характеризуются кратковременностью, большой силой, малой площадью охвата и относительно редкой повторяемостью.

Данные ОЯ инициируют стихийные бедствия и природно-техногенные чрезвычайные ситуации. Им часто сопутствует гибель людей и поражение всех объектов, находящихся на пути их образования и перемещения. Прогнозируются данные ОЯ плохо.

Большой ущерб экономике приносят также парализующие ОЯ и НУП, хотя и они иногда приводят к гибели людей или санитарным потерям (число раненных). Менее опасны сами по себе истощающие ОЯ и НУП. Но зато они часто создают вторичные поражающие факторы (гибель людей от голода при сильной и длительной засухе и т. п.).

При тренде климатических параметров (АКУ) происходит обычно устойчивое измерение климатических условий. Например: подъем уровня сравнительно хорошо прогнозируется.

Результаты анализа угроз важны не только для расчета рисков, но и в значительной степени определяют выбор адаптационных мероприятий.

2.6. Анализ подверженности реципиента метеорологическим угрозам и его уязвимости

Важно подчеркнуть, что фактические потери (ущербы) климатологам не всегда известны. Публикуемые и содержащиеся в интернете данные часто не полны или искажены, а иногда полностью отсутствуют. Поэтому статистика уязвимости (ущербов) используется обычно лишь для контроля порядка возможных потерь. При оценке уязвимости приходится прибегать к косвенным методам.

В тех случаях, когда в расчетах рисков используется статистика совершившихся бедствий и потери известны, для оценки уязвимости используется шкала бедствий DIMAK, разработанная академиком М. А. Клячко и активно используемая в Японии и США, где природные катастрофы происходят особенно часто (Klyachko, 1996). Основными понятиями DIMAK являются магнитуа (величина) бедствия, индекс относительной социальной уязвимости и показатель устойчивости к бедствию.

За единицы измерения в шкале DIMAK приняты «один фэйт» (fate) и «один лосс» (loss), которые являются мерой любого бедствия, определяя соответственно размеры социальных потерь D_1 и материального ущерба D_2 .

Основные исходные параметры шкалы DIMAK:

количество погибших (безвозвратные потери) — K ,

количество раненых (санитарные потери) — I ;

размер финансовых потерь — S , млн долларов.

При определении размера бедствий не оценивается размер косвенного экономического ущерба. В соответствии с выбранным масштабом в DIMAK мы можем конвертировать (преобразовать) D_1 , измеренный в «фейтах», к D_2 , измеренному в «лоссах». При этом один раненый человек оценен \$ 10 000, а один убитый — \$ 330 000, что соответствует средним страховым оценкам. Тогда размер любого бедствия в денежном выражении (млн долларов) можно представить:

$$L = 0,33K + S. \quad (1)$$

Чтобы было более удобно оперировать с размером социальных потерь, можно, учитывая вышеуказанные стоимости безвозвратных и санитарных потерь, использовать условное приведенное количество жертв:

$$K_1 = K + 0,03 I. \quad (2)$$

В шкале DIMAK используются нижеследующие характеристики бедствия:

а) магнитуда бедствия

Величина (магнитуда) бедствия может изображаться как в векторной форме:

$$\overline{MD} = \overline{\lg K_1} + \overline{\lg 3S}, \quad (3)$$

так и в скалярной форме:

$$M_d = \sqrt{[\lg(K + 0.03I)]^2 + (\lg 3S)^2}. \quad (4)$$

Магнитуда бедствия измеряется длиной луча/вектора ON , где O — нулевая точка (начало ортогональных координат), N — точка бедствия.

Луч ON называется «вектор бедствия». В шкале DIMAK принимается, что социальные ущербы откладываются по оси ординат, а экономические — по оси абсцисс.

б) индекс относительной социальной уязвимости

Индекс относительной социальной уязвимости при бедствии «р» зависит от угла α между «вектором бедствия» и осью абсцисс и определяется по формуле:

$$p = \operatorname{tg} \alpha = \lg K_1 / \lg 3S, \quad (5)$$

если $p = \infty$, бедствие называется «полностью социальным»,

если $p = 0$, бедствие называется «чисто экономическим».

В шкале DIMAK принято считать значения индекса относительной социальной уязвимости p :

$p < 0,25$ — абсолютно приемлемыми для всех стран

$p < 0,5$ — допустимыми значениями для развитых стран

$p < 0,75$ — допустимыми для развивающихся стран

$p > 1$ — абсолютно недопустимыми.

в) показатель устойчивости к бедствию

Показатель устойчивости к бедствию d_m — экономическая характеристика, показывающая возможность той или иной пострадавшей территории (объекта, провинции, штата, страны, региона) противостоять бедствию и ликвидировать его собственными силами.

В шкале DIMAK за показатель устойчивости к бедствию d_m принимается:

$$d_m = L / \text{GNP}, \quad (6)$$

где L — размер бедствия в денежном выражении,

GNP — валовой продукт, производимый на рассматриваемой территории.

Показатель устойчивости к бедствию используется для характеристики «восстанавливаемости» пострадавшей от бедствия территории. Относительный уровень экономического потенциала территории с точки зрения способности ее к восстановлению или адаптации описывается в терминах относительного масштаба

произошедшего бедствия, а именно: объектового, муниципального/городского, территориального, национального, регионального и глобального масштаба. Критерием отнесения бедствия к тому или иному масштабу (относительности его величины) являются выбор/назначение такого масштаба, при котором индекс устойчивости к бедствию d_m будет иметь значение около 10.

Шкала DIMAK позволяет использовать количественные или качественные характеристики бедствия.

Количественные характеристики. Бедствия классифицируются по степеням в нарастающем порядке от 1 до 6.

Качественные характеристики. Бедствия классифицируются качественно путем использования нижеследующих терминов: нет бедствия/no disaster; незначительное бедствие/slight disaster; бедствие/disaster; большое бедствие/large disaster; жестокое бедствие/terrible disaster; катастрофа/catastrophe.

Таблица 1

Классификация величин бедствия

Степень бедствия	Термины для качественной оценки	Количественная оценка, M_d
1	нет бедствия	$< 1,0$
2	незначительное бедствие	1,0 — 2,5
3	бедствие	2,5 — 4,5
4	большое бедствие	4,5 — 6,0
5	жестокое бедствие	6,0 — 7,0
6	катастрофа	$\geq 7,0$

Примечание.

Для уточнения величины бедствия можно использовать следующие дополнительные термины: «достаточно» и «весьма», «крайне».

Показатели бедствия (M_g ; p) легко представляются на «поле» или «плоскости бедствий» (см. рис. 2), которое образуется при построении графика в ортогональных координатах в соответствии с указаниями в конце раздела А.

Каждая точка N на «поле бедствий» соответствует какому-либо бедственному событию, измеряемому вектором ON.

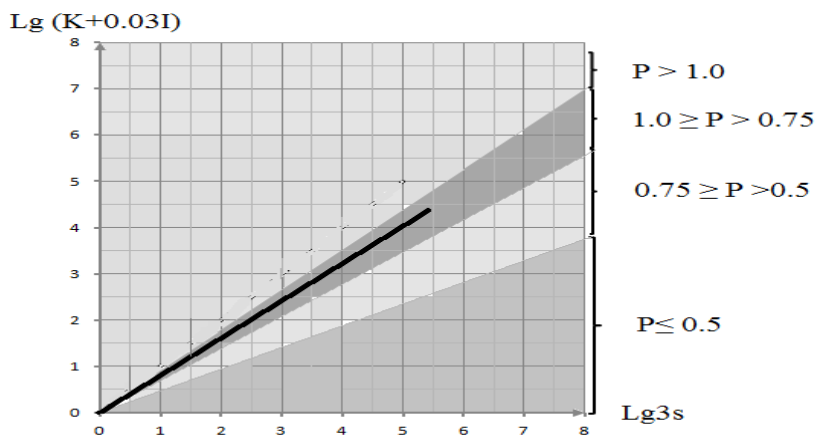


Рис. 3. Показатели бедствия (г. Спитак 07.12.1988).

Если мы располагаем только повторяемостью ОЯ или НУП и потери неизвестны, то используются косвенные методы оценки уязвимости. Группой ученых (Бедрицкий и др., 2007) разработан индекс экстремальности, характеризующий одновременно подверженность и уязвимость реципиента Y .

$$Y = \frac{T_{MAX}}{T_{MAX}} \cdot F_1 + \frac{T_{MIN}}{T_{MIN}} \cdot F_2 + \frac{P_{MAX}}{P_{MAX}} \cdot F_3 + \frac{W_{MAX}}{W_{MAX}} \cdot F_4, \quad (7)$$

где T_{MAX} , T_{MIN} , P_{MAX} , W_{MAX} — значения абсолютных экстремумов;
 $\bar{T}_{MAX}$, $\bar{T}_{MIN}$, $\bar{P}_{MAX}$, $\bar{W}_{MAX}$ — средние значения рассматриваемых экстремумов из части значений распределения этих экстремумов, превышающих 5 % квантили для температуры и осадков и 10 % квантиль для скорости ветра;

F_1 , F_2 , F_3 , F_4 — повторяемость указанных суточных экстремумов, превышающих перечисленные выше квантили.

Данный индекс полезен для выделения наиболее уязвимых районов и периодов времени, но неудобен для оценки подверженности воздействиям отдельных ОЯ, а также для секторальной оценки уязвимости. Для заполнения данного пробела разработан метод ГГО, конкретно ориентированных оценок уязвимости (Кобышева и др., 2008). Уязвимость, в соответствии с данным методом, рассчитывается по формуле:

$$Y = (s/S) \cdot m \cdot t_{cp} \cdot K_a. \quad (8)$$

Y — уязвимость от ОЯ или НГЯ;

s — площадь явления;

S — площадь административного района;

m — численность населения административной области

t_{cp} — время действия ОЯ или НГЯ;

K_a — коэффициент агрессивности явления, для основных ОЯ определяемый по таблице 2.

Таблица 2

Коэффициент агрессивности опасных явлений

ОЯ	Смерч	Крупный град	Сильный гололед	Шквал	Сильный ветер	Сильная метель	Сильный дождь
K_a	6	3	2,5	1,4	1,0	0,8	0,03

Коэффициент агрессивности установлен по силовому воздействию ОЯ на условную поверхность. Воздействие сильного ветра принимается за единицу. Для сильного ветра рассчитывается его давление или ветровой напор:

$$V_H = V_{\max}^2 / 16. \quad (9)$$

При скорости ветра 25 м/с (критерии ОЯ — «сильный ветер»)

$$V_H = 38 \text{ кг/м}^2.$$

Следует иметь в виду, что уязвимость зависит от степени развития территории, подвергшейся бедствию. Чем более развита экономика,

тем больший ущерб возникает при прохождении через нее ОЯ. Уязвимость также зависит от географических особенностей территории.

2.7. Методика оценки климатического риска ОЯ и НУП

Понятие риска до настоящего времени не регламентировано. В публикации ВМО (IPCC, 2012) образование риска изображается в виде схемы, приведенной на рис. 4.

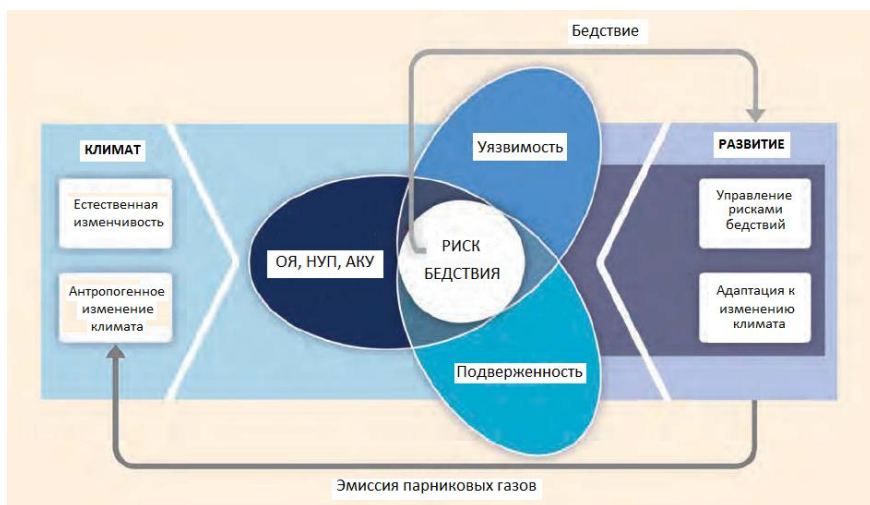


Рис. 4. Иллюстрация к концепции управления рисками для разработки адаптации к изменению климата.

Кроме того, существует ряд определений риска. Из современных определений чаще всего принимается следующее: риск есть функция двух переменных — частоты и последствий нежелательного события (Быков и др., 2004). Климатический риск обычно определяют как вероятность негативных последствий или ожидаемых потерь, вытекающую из взаимодействия между метеорологическими опасностями и уязвимостью реципиента, включающую его

подверженность. Математическая интерпретация риска иллюстрируется схемой на рис. 5.

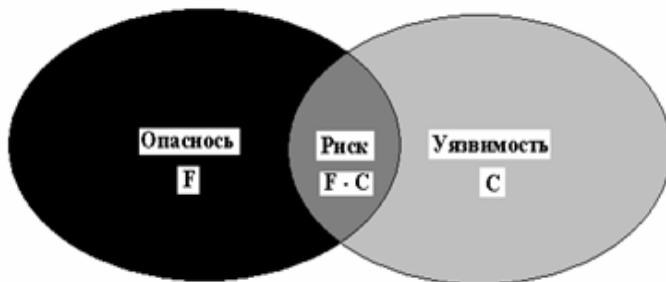


Рис. 5. Модель риска.

F — частота возникновения опасности;

C — вероятность уязвимости реципиента риска от опасности.

В основе косвенного метода расчета экономического риска лежат следующие основные постулаты:

- развитие индустрии и сельского хозяйства тесно связано с плотностью населения;
- экономическим эквивалентом уязвимости или ценой риска является доля валового промышленного продукта (ВВП) и основного фонда, приходящегося на одного жителя России.

Риск определяется по формуле:

$$R = p \cdot U, \quad (10)$$

где: p — вероятность события;

U — уязвимость некоторого объекта, подвергающегося воздействию ОЯ.

Социальный риск $R_{соц.}$ представляет собой соотношение между числом людей, подвергшихся воздействию источника опасности, и вероятностью такого события.

Средняя площадь, занимаемая событием, определяется при рассмотрении отдельных случаев возникновения ОЯ. В тех случаях,

когда такую площадь определить нельзя, в качестве радиуса данной площади принимается радиус корреляции данного явления.

В случае, когда ОЯ наблюдается только 1 раз в году:

$$p = n / N, \quad (11)$$

где: n — число ОЯ на данной территории за весь период наблюдений;
 N — число лет наблюдений.

Когда ОЯ наблюдается несколько раз в году, вероятность лет с ОЯ определяется по формуле:

$$p = N' / N, \quad (12)$$

где N' — число лет с ОЯ.

Риск нанесения социального ущерба рассматриваемой территории определяется по формуле:

$$P_{соц} = p \cdot \frac{S}{S} \cdot t \cdot m \cdot k, \quad (13)$$

где t — средняя продолжительность ОЯ, дни,
 k — коэффициент агрессивности.

Если рассчитывается не вероятность явления, а вероятность лет с явлением, то полученный риск умножается на максимальное число явлений в году.

Общая формула социального риска или вероятности поражения конкретного (точечного) реципиента имеет следующий вид:

$$P_{соц} = p \cdot \frac{S_i}{S} \cdot \frac{S}{S} \cdot t \cdot m \cdot k, \quad (14)$$

где S_i — площадь реципиента, км².

Приведенные выше формулы позволяют оценить уязвимость и риски, создаваемые ОЯ для различных реципиентов, т. е. решать задачи оценки рисков на объектном уровне.

Основой экономического механизма управления риском является определение экономического ущерба, создаваемого опасным

событием. Совокупный ущерб на данной территории может быть назван экономическим риском ($P_{\circ}$):

$$P_{\circ} = A \cdot P_{\text{соц}}, \quad (15)$$

где: A — коэффициент, называемый ценой риска, полагаемый равным доле ВВП и основного фонда России, приходящегося на одного жителя России.

Для перехода к экономическому риску необходимо количественно оценить ущерб, используя ВВП. При этом определяется продолжительность каждого ОЯ и рассчитывается доля ущерба за период равный продолжительности явления.

Таблица 3

**Средняя продолжительность и площадь охвата территории
опасными явлениями**

Вид ОЯ	Продолжительность, ч	Площадь, кв. км
Сильный ветер	4,8	8500
Сильный дождь	9,7	25500
Сильный снег	11,8	36800
Смерч	0,14	1,6
Сильные гололедно-изморозевые отложения	90	1600
Крупный град	0,05	15
Сильный туман	13,5	—
Сильная метель	19,7	13000
Шквал	0,1	2400
Сильный ливень	1	20

2.8. Оценка допустимости риска

Методология управления рисками основана на концепции приемлемого (допустимого) риска. Впервые эта методология разработана в Нидерландах и начала применяться в практической деятельности на государственном уровне с 1989 г. Для России рекомендован вариант оценки риска, представленный на рис. 6 и называемый «светофором» (Быков и др., 2004). Согласно данному подходу, весь «спектр» значений риска разбивают на 3 области:

- недопустимого (чрезмерного) риска;
- приемлемого риска;
- пренебрежимого риска.

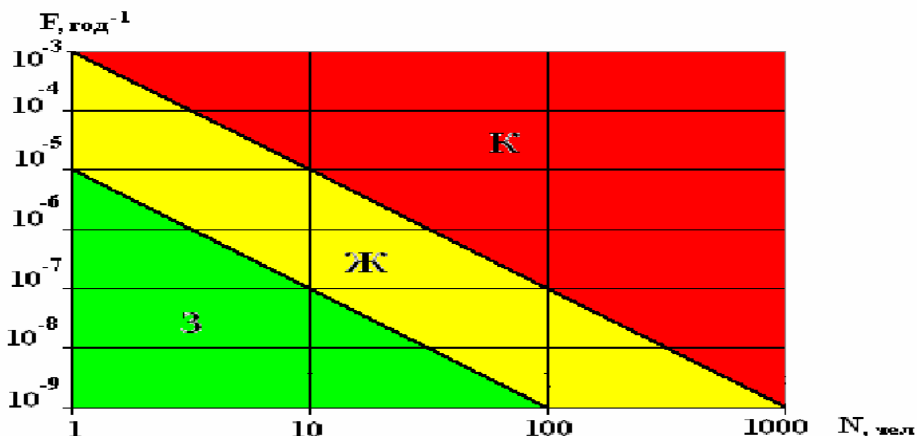


Рис. 6. Оценка допустимости риска.

F — частота бедствий; N — число погибших;

К (красный) — область чрезмерных рисков;

Ж (желтый) — область приемлемых рисков;

З (зеленый) — область пренебрежимых рисков.

При попадании в область недопустимого риска, любая деятельность, характеризующаяся уровнем риска из этой области,

недопустима, если даже она выгодна для общества в целом. Но если речь идет о риске вследствие изменения климата, адаптация необходима при любых затратах.

При уровне риска из области пренебрежимого риска любая деятельность не контролируется регулирующим органом. В этом случае любая деятельность является приемлемой и не требует каких-либо дополнительных усилий, адаптация не используется. В области приемлемого риска любая деятельность является предметом контроля для регулирующего органа в направлении некоторого уменьшения риска. Вопрос об адаптации решается на основе экономических расчетов. При отсутствии сведений о погибших предельно допустимым для России уровнем индивидуального риска считается риск в диапазоне 10^{-5} — 10^{-4} , а пренебрежимо малым уровнем риска 10^{-7} — 10^{-6} .

3. Управление климатическими рисками за счет принятия адаптационных мер

3.1. Классификация адаптационных мер

Существует ряд классификаций адаптационных мер. Одна из принятых классификаций адаптации по наиболее крупным признакам представлена в таблице 4.

Таблица 4

Классификация адаптационных мер по наиболее крупным признакам

Классификационный признак	Примечания
Технологический	Инновации
Поведенческий	Изменение принятых правил
Управленческий	Изменение методологии

В ГГО им. А. И. Воейкова разработана специальная, более подробная классификация, разделяющая адаптационные меры на гидрометеорологические и технические (рис. 6.)



Рис. 6. Классификация адаптационных мер, разработанная в ГГО.

Отдельные адаптационные меры относятся одновременно к техническим и гидрометеорологическим, их можно назвать природно-техногенными. Например, переход к возобновляемым источникам энергии (Климатические факторы..., 2010), использование грозозащитной аппаратуры и т. д.

3.2. Методы экономической оценки адаптационных мер

Перед разработкой адаптационных мер необходимо определить экономическую эффективность их применения. В международной практике приняты следующие методы экономических оценок :

- анализ затрат и выгод (в случаях, когда и те и другие известны и могут быть представлены в денежном выражении),
- анализ экономической эффективности затрат (достижение максимального снижения уровня риска при минимальных затратах),
- анализ по множеству критериев (одновременно применяются различные балльные оценки: экономические, технические, экологические, финансовые, социальные, которые взвешиваются по значимости), аналогичные балльные оценки использованы, например, в расчетах климатических ресурсов на территории России (Энциклопедия ..., 2005).

Кроме того, в настоящее время разработаны еще два метода, непосредственно предназначенные для выбора адаптационных мер в связи с климатическими изменениями:

- анализ реальных опционов (выбор наиболее рациональной меры адаптации с учетом приспособляемости объект); данный метод учитывает неопределенность в отношении будущих воздействий изменения климата и степень приспособляемости объектов инфраструктуры к изменению климата (Accounting..., 2009).

- метод полной экономической оценки и выбора адаптационных мер.

Анализ реальных опционов

Адаптационная стратегия осложняется факторами неопределенности. Одним из способов учета неопределенности климатического прогноза, прогнозов развития экономики, финансовой

политики, изменения ВВП является оценка приспособляемости объекта к последствиям изменения климата.

Учет приспособляемости обеспечивает метод анализа реальных опционов, в частности построение дерева решений, отражающего влияние адаптационной меры на доходность инвестиций при различных сценариях изменения климата и последствиях этих изменений при проведении адаптационных мер и без них. Принцип использования данной методики можно схематично показать на следующем примере.

Допустим, что нам известна некая адаптационная мера, например, построение дамбы для защиты прибрежной территории от наводнений, связанных с возможным повышением уровня моря. Альтернативой этому мероприятию может быть строительство не столь мощной защитной стены меньшей стоимостью, которая может быть в случае необходимости относительно просто модернизирована в будущем. На основе данной информации строится дерево решений, где все стоимости представлены в относительных единицах (о.е.). Пусть стоимость дамбы равна 75 о.е. Она создает выгоды в размере 100 единиц, защищая от наводнений в течение 50 лет. Стена, которая может быть изменена в будущем, стоит 50 единиц, еще 50 единиц стоят мероприятия по ее модернизации. В результате защиты от наводнений будет получен экономический эффект 200 единиц. Предположим, что существует равная вероятность сильных или слабых воздействий, связанных с изменением климата ($P = 0,5$), и, следовательно, равная вероятность значительного подъема уровня моря или его отсутствия. Тогда определение ЧПД (чистого приведенного дохода) может быть проведено по следующей схеме (рис. 7).

При расчете ЧПД принимаются следующие упрощающие предположения: ущерб от стратегии «неинвестирования» не учитывается; коэффициент дисконтирования (процентная ставка, применяемая для приведения будущей стоимости к настоящей) в соответствие с указаниями «Зеленого документа» — Международного руководства по адаптации к изменению климата (The Green Book, 2003) — составляет 0,8.

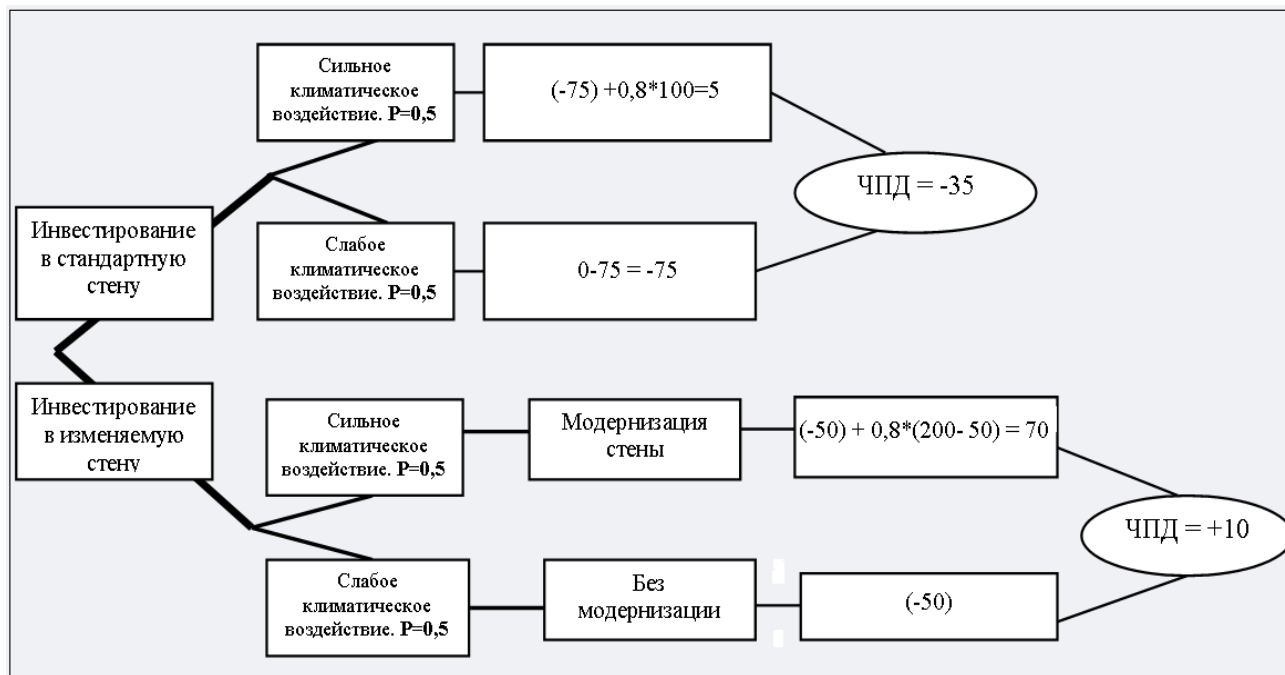


Рис. 7. Дерево решений.

Оценка экономического эффекта от инвестирования в стандартную стену получается в результате расчета ЧПД для каждого из возможных вариантов климатических изменений. При этом итоговый ЧПД $= 0,5 \cdot (5 - 75) = - 35$, это показывает, что инвестирование в строительство дамбы проводить не следует.

В случае инвестирования в стену, которая может быть модернизирована в случае необходимости в будущем, оценка ЧПД проводится по следующей схеме.

Если воздействие климатических изменений будет достаточно велико, чтобы оправдать модернизацию, выигрыш от инвестиций составит 70 о.е. Если же воздействия незначительны, модернизация проводиться не будет. Ожидаемая величина ЧПД для варианта с возможной модернизацией в будущем составляет $0,5 \cdot (70 - 50) = +10$. Таким образом, возможность модернизации в будущем отражается в более высоком ЧПД и определяет принятие решений.

Метод полной экономической оценки и выбора адаптационных мер.

Данный метод подробно изложен и проиллюстрирован в работе (Кобышева и др., 2012). Он состоит из двух основных этапов:

А) оценка инвестиционной привлекательности адаптационного проекта,

Б) принятие решений о выбор оптимальной адаптационной меры.

Методика оценки инвестиционной привлекательности адаптационного проекта.

В экономических расчетах и оценках применяется несколько основных методов расчета прибыльности инвестиций (Кобышева и др., 2012; Климатические факторы..., 2010).

Наиболее часто используется зарубежными менеджерами метод срока возврата инвестиций (срока окупаемости). В зарубежной литературе этот метод называется РВ-методом (РВ — Pay-Back Period). Срок возврата инвестиций рассчитывается по формуле:

$$PB = IC / B,$$

где IC — величина инвестированного капитала (руб.),

B — ежегодные выгоды, получаемые от адаптации (руб.).

Оценка чистой приведенной стоимости NPV (NPV — Net Present Value) — это сумма дисконтированных значений потока платежей, приведённых к ценности денег на момент расчета. Показатель NPV характеризует величину денежных средств, которую инвестор ожидает получить от проекта после того, как денежные притоки окупят его первоначальные инвестиционные затраты и периодические денежные оттоки, связанные с осуществлением проекта. Таким образом, значение NPV может быть интерпретировано как общая прибыль инвестора. Расчет NPV производится по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} = -IC + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t},$$

где i — ставка дисконтирования, CF_t — поток платежей (CF — Cash Flow) в t период, N — количество периодов, IC — величина инвестированного капитала.

Значение внутренней нормы доходности (IRR — Internal Rate of Return) характеризует процентную ставку, при которой чистый дисконтированный доход NPV равен 0. Значение IRR определяется из условия безубыточности проекта по следующей формуле:

$$NPV = -IC + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0,$$

$$\text{или} \quad IC = \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+IRR)^t}.$$

Использование теории принятия решений для выбора адаптационных мер.

Для принятия решений в условиях неопределенности предлагается следующая модель. Имеется ряд ОЯ различной интенсивности и продолжительности Φ_i и ряд возможных адаптационных мер A_j . Для

всех сочетаний Φ_i и A_j известны выгоды U_{ij} от адаптации или потери (затраты) R_{ij} . Из этих данных образуется либо матрица потерь (затрат), либо выгод (табл. 5.)

Таблица 5

Матрица полезности (выгод, ущерба)

	A_1	A_2	A_j	A_m
Φ_1	U_{11}, R_{11}	U_{12}, R_{12}	U_{1j}, R_{1j}	U_{1m}, R_{1m}
Φ_2	U_{21}, R_{21}	U_{22}, R_{22}	U_{2j}, R_{2j}	U_{2m}, R_{2m}
Φ_i	U_{i1}, R_{i1}	U_{i2}, R_{i2}	U_{ij}, R_{ij}	U_{im}, R_{im}
Φ_n	U_{n1}, R_{n1}	U_{n2}, R_{n2}	U_{nj}, R_{nj}	U_{nm}, R_{nm}

Для выбора адаптационной меры (стратегии адаптации) рекомендуется использовать следующие методы оптимизации: минимаксный, максиминный, Гурвича, Севиджа и Байеса (Хандожко, 2005). Проиллюстрируем применение данных методов на числовых примерах. Пусть мы располагаем для некоторого ОЯ несколькими возможными мерами адаптации A_j . Например, для борьбы с заморозками возможно покрытие посевов пленкой, разведение костров, поливы посевов и др. Заморозки имеют разную интенсивность и продолжительность и могут быть разделены на классы (Φ_i).

Запишем матрицу полезности (выгод, потерь).

Таблица 6

Пример матрицы полезности (выгод, потерь).

(Пример по Хандожко Л. А.)

Φ	A				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Φ_1	3	5	3	4	4
Φ_2	7	3	5	4	3
Φ_3	6	4	8	5	4
Φ_4	2	3	4	5	6
Φ_5	5	4	3	6	4
Макс. A_{ij}	7	<u>5</u>	8	6	6
Мин. A_{ij}	2	3	3	<u>4</u>	3
Среднее	4,5	4,0	5,5	5,0	4,5

Числа внутри матрицы определяем либо как выгоды, либо как потери в зависимости от метода оптимизации. Считая данную матрицу матрицей потерь, определим оптимальную стратегию (меру) адаптации по методу минимакса. С этой целью выбираем $R_{\max}$ для каждого A , а затем находим наименьшее значение из максимальных $R_{j\max}$, т. е. $A_{j\max}^* = 5$. Таким образом, в условиях неопределенности выбирается «осторожная» стратегия, при которой из максимальных возможных потерь отбирается минимальная. В этом случае мы получаем лучшие результаты в наихудших условиях.

Для матрицы выгод используем метод максимина, т. е. выбираем минимальные выгоды U_{ij} для каждой стратегии адаптации, а затем находим из этих минимумов максимальное значение, т. е. $A_{I\max}^* = 4$. В этом случае получаем минимальный проигрыш.

Методы Гурвича и Севиджа являются модификацией минимаксного и максиминного подхода. Метод Гурвича позволяет получить компромиссное решение, определив среднее по максимальному и минимальному значению для каждой стратегии. Он отражает взвешенный подход к наибольшей и наименьшей возможностям, соответствующим каждой стратегии. Оптимальной будет стратегия адаптации с максимальным средним.

В соответствии с принципом Севиджа матрица полезности преобразовывается для установления последствий ошибочных решений путем сопоставления результатов принятых решений с теми, которые могли бы быть, если бы характеристики ОЯ были бы известны. Определяем потерю выгоды или ее снижение относительно максимальной выгоды при данном Φ_i и получаем матрицу разностей между максимальными значениями U_{ij} и U_{ij} . Получаем матрицу ошибочных решений, которую называют *матрицей сожалений* (табл. 7).

Из последней графы выбираем минимальное значение максимума. В данном случае таких значений два, поэтому эти две стратегии адаптации равнозначны. В этом случае составляем матрицу потерь для того, чтобы установить, насколько потери превышают минимальные при данном Φ_i , т. е. находим разность между R_{ij} и минимумом R_{ij} .

Элементы полученной матрицы означают превышение потерь над минимальными. Данная матрица называется *матрицей опасений* (табл. 8). Минимаксную стратегию называют стратегией перестраховщиков.

Таблица 7

Матрица сожалений

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
Φ ₁	2	0	2	1	1
Φ ₂	0	4	2	3	4
Φ ₃	2	4	0	3	4
Φ ₄	4	3	2	1	0
Φ ₅	1	2	3	0	2
Макс. U _{ij}	4	4	<u>3</u>	<u>3</u>	4

Таблица 8

Матрица опасений

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
Φ ₁	0	2	0	1	1
Φ ₂	4	0	2	1	0
Φ ₃	2	0	4	1	0
Φ ₄	0	1	2	3	4
Φ ₅	2	1	0	3	1
Макс. U _{ij}	4	2	4	3	4

Из двух стратегий, выделенных в предыдущей матрице, следует опираться на стратегию A₄.

Ситуацию неопределенности можно частично избежать, если известны вероятности осуществления тех или иных Φ_i рассматриваемого ОЯ. Пусть, например, многолетние значения Φ_i определенного ОЯ известны и представлены следующим образом:

$$P(\Phi_1)=0,05, P(\Phi_2)=0,10, P(\Phi_3)=0,45, P(\Phi_4)=0,25, P(\Phi_5)=0,15.$$

Рассчитывается среднее значение (математическое ожидание) полезности (потерь, выгод)

$$M(R_j) = \sum R_j P_i \text{ или } M(U_j) = \sum U_j P_i$$

Получим для A_1

$$M(R_1) = 3 \cdot 0,05 + 7 \cdot 0,10 + 6 \cdot 0,45 + 2 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,80$$

Соответственно:

A_j	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$M(R_j)$	4,80	3,0	5,70	5,00	4,40

Как видим, предпочтение следует отдавать стратегии адаптации A_2 .

Окончательный выбор оптимальной стратегии адаптации зависит:

- от характера и условий решаемой задачи,
- от наличия информации (потери вследствие подверженности ОЯ или выгоды от адаптации и затраты на адаптацию; вероятность ОЯ),
- от свойств и уязвимости реципиента (например, разрушение атомной станции ведет к огромным социальным и экономическим потерям, поэтому следует минимизировать потери, т. е. использовать метод минимакса),
- от вида и агрессивности ОЯ (при особенно агрессивных ОЯ целесообразно применять максиминный метод),
- от экономического состояния области, для которой разрабатываются адаптационные меры (для дотационной области следует выбирать наиболее осторожный подход),
- от климатических условий района; при небольших изменениях климата наиболее полезен взвешенный подход (метод Гурвича) или максиминный метод, а при повышенной изменчивости и большом числе дней с агрессивными явлениями — минимаксный метод.

Помимо описанных методов максиминной и минимаксной свертки существуют и другие критерии выбора оптимальной стратегии. В условиях определенности используются такие методы

принятия решений, как метод главного критерия и метод линейной свертки. Данные методы были применены, например, при выборе типа возобновляемых источников энергии на территории Дальнего Востока.

4. Указания по применению методики адаптации

В соответствии с рис. 6, который разделяет гидрометеорологические и технические виды адаптации, гидрометеорологические адаптационные меры являются информационными, и их разработка, применение и решение о целесообразности их использования есть функция климатологов Росгидромета. В частности, климатологи разрабатывают и обосновывают климатические нормативные показатели для нормативных технических документов, участвуя в актуализации и гармонизации ряда глав СНиП, а также в совершенствовании других нормативных документов.

Важным направлением гидрометеорологической адаптационной стратегии являются оценки ресурсов возобновляемых источников энергии.

Климатологи должны разрабатывать критерии для страхования от гидрометеорологических ОЯ и затем обеспечивать страховые компании информацией о рисках последствий ОЯ.

Естественно, главной заботой климатологов является совершенствование климатических прогнозов и методов раннего предупреждения о возможных ОЯ.

Технические адаптационные меры разрабатываются специалистами в областях применения самостоятельно или совместно с климатологами. Технические адаптационные меры включают:

- изменение подверженности объектов технической сферы и других областей применения (вывод объекта из зоны риска, например, перенос строительства в другое место),
- разработку новой конструкции объектов, менее зависящей от климата,

— перераспределение и разделение риска (например, создание хранилищ углеводородного топлива на случай возникновения аварий в системах снабжения топливом; страхование и т. д.),

— изменение системы управления хозяйством в системе меняющегося климата и т.д.

В случае совместной разработки технических мер адаптации задача климатологов состоит главным образом в предоставлении специализированной климатологической информации о предполагаемых климатических условиях в будущем и о рисках. Стратегия адаптации разрабатывается на основе тесного сотрудничества климатологов и специалистов технической сферы, а экономическое обоснование этой стратегии является прерогативой специалистов технической сферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агентьева Е. М., Кобышева Н. В. (2011). Стратегия адаптации к изменению климата в технической сфере для России. // Труды ГГО. Вып. 563. С. 60—77.

Бедрицкий А. И., Кориунов А. А., Хандожко Л. А., Шаймарданов М. З. (2007). Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие России // Право и безопасность. № 1—2. С. 7—13.

Быков А. А., Акимов В. А., Фалеев М. И. (2004). Проблемы анализа риска // Российское научное общество анализа риска. Том 1. № 2. С. 125—137.

Галюк Л. П., Самолетова Н. А. (2008). Оценка риска, создаваемого смерчами, для Волгодонской АЭС. // Труды ГГО. Вып. 557. С. 225—229.

Климатические факторы возобновляемых источников энергии / под. ред. В. В. Елистратова, Н. В. Кобышевой, Г. И. Сидоренко. – СПб: Наука, 2010. — 235с.

Кобышева Н. В., Кобышев Н. А. (2012). Экономическое обоснование выбора возобновляемых источников энергии (на примере для Дальневосточного региона России) // Труды ГГО. Вып. 565. С.22—48.

Кобышева Н. В., Галюк Л. П., Панфутова Ю. А. (2008). Методика расчета социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды // Труды ГГО. Вып. 557. С. 162—172.

Кобышева Н. В., Кобышев Е. А. (2001). Районирование территории России по степени опасности возникновения смерчей. / В сб. Природные опасности России. Том 5 — М.: Изд. Фирма «КРУК». С. 165—167.

Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030г и дальнейшую перспективу (2011) / под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева — СПб:Д'АРТ. 254 с.

РД 52. 88.699 (2008). Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения опасных природных явлений. — М.: ЦМТР ГУ «НПО «Тайфун»». 31с.

Руководство по специализированному климатологическому обеспечению экономики (2008) / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб.: Гидрометеиздат. 334с.

Хандожко Л. А. (2005). Экономическая метеорология. — СПб.: Гидрометеиздат. 491 с.

Энциклопедия климатических ресурсов России (2005) / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб.: Гидрометеиздат,. 319 с.

Accounting for the Effects of Climate Change. (2009). — Supplementary Green Book Guidance. Defra. London. 28 pp.

The Green Book (2003). Appraisal and Evaluation in Central Government Treasury Guidance, London: TSO. 117. pp

IPCC 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 582 pp.

Klyachko M. (1996).The DIMAK Scale for Disaster Magnitude Measuring in service. Natural Disaster Reduction. Proc. of Conf. (Ed. by George W. Housner, etc.). ASCE. 76 pp.

<http://voeikovmgo.ru/>

ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

*П. В. Спорышев¹, В. М. Катцов¹, В. П. Мелешко¹, Г. В. Алексеев²,
И. Л. Кароль¹, В. М. Мирвис¹*

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

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 7
alexgv@aari.ru

Поступила в редакцию 8.09.2014

1. Эволюция научных представлений о причинах климатических изменений

Введение

Как отмечается в Оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (ОД_РФ-1), климатическая система Земли, под которой обычно понимают пять взаимодействующих друг с другом компонентов: атмосферу, гидросферу, криосферу, деятельный слой суши и биосферу, никогда не находится в состоянии равновесия. Она непрерывно меняется, даже в отсутствие изменений во внешних воздействиях. Под последними понимаются естественные и антропогенные факторы, влияющие на климатическую систему извне и вызывающие изменения климата¹.

¹ Определение понятия «климат» обусловлено поставленной задачей. По этой причине определений климата много, и они эволюционируют. Например, определение климата А. С. Мониным (1982) как «*статистический ансамбль состояний, которые проходит система океан-суша-атмосфера за периоды времени в несколько десятилетий*» может быть дополнено теперь двумя другими компонентами климатической системы — криосферой и биосферой. При этом в математической теории климата бывает удобно рассмотрение указанного ансамбля на промежутке времени, стремящемся к бесконечности. При такой постановке климат не испытывает изменений. Для большого количества задач, решаемых Росгидрометом подходит

При этом, к *естественным* внешним воздействиям относятся колебания орбитальных параметров Земли, вулканическая деятельность, солнечная активность, к *антропогенным* — изменения газового и аэрозольного составов атмосферы в результате хозяйственной деятельности человека, изменения характера землепользования. *Собственная*, т. е. не связанная с внешними воздействиями, изменчивость климатической системы обусловлена нелинейными взаимодействиями между перечисленными ее компонентами, имеющими разные времена отклика на внешние воздействия. Обратные связи разных знаков и нелинейность внутренних взаимодействий, присущих климатической системе Земли, чрезвычайно усложняют ее реакцию на внешние воздействия и, соответственно, выявление изменений климата и установление их причин, не говоря уже о прогнозе изменений климата.

Главной задачей фундаментальных исследований климатической системы Земли является *прогноз ее эволюции*. Прогнозирование венчает собой цикл исследований: от наблюдения за климатической системой и формулировки гипотез² относительно действующих в ней механизмов, воплощения этих гипотез в модели и проверка моделей путем сравнения модельных результатов с данными наблюдений. Когда качество модели признано удовлетворительным, можно говорить о создании теории³, а модель использовать в прогнозах.

определение Г. В. Грузы и Э. Я. Раньковой (2003): «*Климат в узком, но широко распространенном смысле, есть обобщение изменений погоды, и представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и повторяемостей явлений за выбранный период времени. Все эти дескриптивные статистики называются климатическими переменными*». Это определение использовано и в ОД_РФ-1.

² Гипотеза, то, что лежит в основе, — причина или сущность. В современном словоупотреблении гипотеза — выраженное в форме суждения (или суждений) предположение или предугадывание чего-либо: например, "предугадывание природы" в формулировке естественнонаучных законов. При этом первоначальный смысл термина "гипотеза" вошел в содержание понятия "научная гипотеза", выражающего предположительное суждение о закономерной (или причинной) связи явлений (БСЭ, 1971).

³ Теория, в широком смысле, — комплекс взглядов, представлений, идей, направленных на истолкование и объяснение какого-либо явления; в более узком и специальном смысле — высшая, самая развитая форма организации научного знания, дающая целостное представление о

Парниковый эффект как регулятор температуры на нашей планете известен еще с XIX века, но активно его обсуждать стали в 1960-е годы. CO₂, метан, закись азота, некоторые другие газы, а также водяной пар подобно теплице укрывают Землю, пропуская приходящие от солнца короткие волны и задерживая длинные, излучаемые нагретой Землей в космос. Парниковый эффект — один из факторов, обеспечивающих пригодность нашей планеты для жизни.

Однако с тех пор, как человек стал сжигать во все возрастающих количествах ископаемое топливо с выбросом в атмосферу парниковых газов, прежде всего CO₂, парниковый эффект стал быстро усиливаться. Нижняя часть атмосферы стала интенсивно теплеть, разбудив в климатической системе процессы, ускоряющие потепление. Возникла новая глобальная угроза, противодействие которой, очевидно, потребует скоординированных и очень значительных усилий всего человечества.

Современное пристальное внимание к проблеме антропогенного изменения климата и активные дискуссии по этой теме могут создать ложное впечатление о ее «молодости». Между тем, теория антропогенного изменения глобального климата имеет, по-видимому, почти двухвековую историю, если вести отсчет от первых гипотез относительно роли парникового эффекта в формировании климатических условий нашей планеты⁴. Предположение о потенциальной важности собственно антропогенного фактора для климата Земли было высказано более столетия назад. С тех пор эта теория, пережив длительный период слабого к ней интереса, достигла степени развития, когда стали возможны не только оценки будущих изменений климатической системы, но и проверка прогнозов, сделанных некоторое время тому назад.

закономерностях и существующих связях определенной области действительности — объекта данной теории (БСЭ, 1976).

⁴ Подробный обзор этой истории можно найти, например, в книге Спенсера Уирта (Weart, 2008), а вклад отечественной науки в исследования климатических изменений, предшествующие созданию МГЭИК достаточно детально представлен в монографии под редакцией М. И. Будыко и Ю. А. Израэля (Борзенкова и др., 1987). Материалы, представленные в этих работах, фактически послужили основой настоящей главы.

Настоящая глава открывает раздел, посвященный оценке новейших результатов в области исследования причин наблюдаемых изменений климата, имея своей целью ретроспективное рассмотрение эволюции теории антропогенного изменения климата, получающей все новые подтверждения в современных исследованиях.

1.1. Антропогенное изменение глобального климата: от гипотезы к теории

Истоки гипотезы антропогенного изменения климата следует искать в XIX в., когда никакого практического значения эта проблема не имела. Содержание CO_2 в атмосфере, как было оценено позднее по ледовым кернам, в это время не превышало 290 млн^{-1} , а средняя глобальная температура к середине века составляла около $13,6^\circ\text{C}$.

Идея о механизме парникового эффекта была впервые изложена в 1827 г. Жозефом Фурье в статье «Записка о температурах земного шара и других планет» (Fourier, 1827). В этой работе были рассмотрены различные механизмы формирования климата Земли, включая как факторы, влияющие на общий тепловой баланс Земли, так и факторы, влияющие на теплоперенос и температуры климатических поясов. В числе первых был рассмотрен фактор, получивший впоследствии название парникового эффекта. Фурье пришел к заключению, что Земля была бы значительно холоднее при отсутствии атмосферы.

В 1859 г. Джон Тиндалл обнаружил, что некоторые газы задерживают инфракрасное излучение, и предположил, что изменение концентраций этих газов может приводить к изменению климата. Наиболее эффективным из рассмотренных Тиндаллом газов оказался водяной пар (H_2O); другим — диоксид углерода (CO_2), несмотря на его малые концентрации в атмосфере (Tyndall, 1861).

В 1896 г. Сванте Аррениус опубликовал первый расчет глобального потепления в результате выбросов CO_2 (Arrhenius, 1896), в том числе результаты оценки увеличения концентрации диоксида углерода в атмосфере в 1,5, 2, 2,5 и 3 раза. В частности, при удвоении

CO₂ он получил увеличение глобальной температуры на 5—6 °С (эти оценки были впоследствии им уточнены в сторону уменьшения). Впрочем, для такого увеличения концентрации CO₂ в атмосфере, по его мнению, потребовались бы тысячелетия (т. е. при сохранении темпов промышленного развития конца XIX в.). Результаты Аррениуса подверглись критике со стороны некоторых ученых. Как бы то ни было, антропогенное потепление ни для Аррениуса, ни для кого-либо из его современников не выглядело угрожающе. Аррениус также выдвинул гипотезу, что снижение концентрации CO₂ в атмосфере может являться одной из причин возникновения ледниковых периодов. Полученная Аррениусом оценка воздействия удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере на среднюю глобальную температуру стала первой в исторической последовательности подобных оценок, выполненных в последующие годы (см. таблицу 1).

Таблица 1

Оценки воздействия удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере на среднюю глобальную температуру, по данным различных исследователей (Борзенкова и др., 1987; Edwards, 2010)

Исследователи	Год	Чувствительность климата к удвоению CO ₂	Примечание
Аррениус	1896	5—6 °С	2-мерная зонально-вертикальная модель; ручной расчет
Хёрлбёрт	1931	4 °С	Оценка (Hulburt, 1931) замечена только в 1960-х гг. из-за неприятия в целом теории CO ₂ ; Каллендер не знал о работе Хёрлбёрта до 1942 г.
Каллендер	1938	1,5 °С	1-мерная модель переноса радиации; удвоение CO ₂ не упоминается в тексте, но присутствует на рисунке; конвекция не учитывается
Каллендер	1949	2,1 °С	Пересмотренные результаты расчетов 1938 г.; удвоение CO ₂ упоминается явно

Исследователи	Год	Чувствительность климата к удвоению CO ₂	Примечание
Пласс	1956	3,8 °C	1-мерная модель переноса радиации; не учитывается конвекция и обратная связь водяного пара
Мёллер	1963	1,5—9,6 °C	1-мерная модель баланса энергии у поверхности; совместное поглощение H ₂ O и CO ₂ уменьшает общее потепление, но обратная связь водяного пара производит «почти произвольные изменения температуры»
Пласс, Килинг и др.	1963	3,8 °C	Консенсусная оценка
Манабе и Везеролд	1967	2,4 °C	1-мерная радиационно-конвективная модель; влажность и облачность оказывают сильное воздействие на эффект удвоения CO ₂
Манабе	1970	1,9 °C	Пересмотренная версия 1-мерной радиационно-конвективной модели Манабе и Везеролда 1967 г.; чувствительность оценена для «осредненной» облачности
Расул и Шнайдер	1971	0,8 °C	1-мерная радиационно-балансовая модель с фиксированными относи- тельной влажностью и облачностью
Будыко	1974	2,5—3,5 °C	Упрощенная климатическая модель
Манабе и Везеролд	1975	2,9 °C	Первое использование глобальной модели общей циркуляции для расчета эффектов удвоения CO ₂
Будыко	1977	3,3 °C	Анализ данных инструментальных наблюдений
Будыко	1979	3,5 °C	Анализ палеоклиматических данных

В 1897 г. Томас Чемберлен предложил свою модель глобального обмена углеродом, включающую обратные связи, в том числе и водяного пара, и объясняющую климатические изменения на геологических временных масштабах колебаниями концентрации CO_2 в атмосфере (Chamberlin, 1897). Гипотезы Аррениуса и Чемберлена подверглись критике со стороны Кнута Ангстрёма и его сторонников, считавших роль углекислого газа как причины потепления пренебрежимо малой, по сравнению с водяным паром.

Затем дискуссия об углекислом газе как причине климатических колебаний приостановилась до 1930-х гг., когда был обнаружен положительный тренд средней глобальной температуры по отношению к концу XIX в. К этому времени Милутин Миланкович разработал теорию ледниковых периодов, обусловленных периодическими изменениями орбитальных параметров Земли (Milankovitch, 1941). Впрочем, не все современники Миланковича разделяли его теорию (Костицын, 1984).

В 1938 г. Гай Стюарт Каллендер, проанализировав накопившиеся к тому времени результаты наблюдений за температурой и концентрацией CO_2 в атмосфере, пришел к выводу, что рост первой обусловлен ростом второй (Callendar, 1938). Работы Каллендера привели к возобновлению дискуссии, начатой вокруг результатов Аррениуса. Сомнения специалистов вызывал широкий круг вопросов — от достоверности данных наблюдений и значимости трендов концентрации углекислого газа до интенсивности его поглощения океаном, а также сравнительного (с водяным паром) вклада CO_2 в поглощение уходящей длинноволновой радиации. Каллендера критиковали за игнорирование ряда действующих в реальном мире физических процессов, таких как атмосферная конвекция, насыщение атмосферы водяным паром при потеплении, образование облаков и их участие в перераспределении потоков радиации. Каллендер признал, что многие неучтенные им процессы, в частности, связанные с облаками, могут играть важную роль, однако получить количественные оценки вкладов разных процессов в потепление климата в то время было невозможно.

По окончании Второй мировой войны компьютеры открыли новую эпоху исследований атмосферы и океана — эпоху физико-математического моделирования климатической системы. В 1950-е гг. появились в определенном смысле реалистичные компьютерные модели глобальной атмосферы. В 1956 г. Гильберт Пласс с помощью компьютерных расчетов пришел к заключению, что добавка CO_2 в атмосферу способна оказать значительное влияние на радиационный баланс: для удвоения концентрации CO_2 он получил рост температуры на $3,6^\circ\text{C}$, а для сокращения концентрации CO_2 — падение температуры на $3,8^\circ\text{C}$ (Plass, 1956). Правда, как и его предшественники, Пласс в своих расчетах не учитывал изменения влагосодержания атмосферы и облачности. Предположив сохранение антропогенных выбросов на уровне середины 1950-х гг. (т. е. $\sim 30\%$ за столетие), Пласс оценил дальнейшее возрастание глобальной температуры за счет хозяйственной деятельности человека в $1,1^\circ\text{C}$ за столетие. Это несколько выше $0,7^\circ\text{C}$ за XX в., однако, в своей оценке Пласс не учитывал термической инерции океана, способной замедлить реакцию климатической системы на радиационное воздействие. Им не учитывались и другие аспекты изменения состава атмосферы, также связанные с деятельностью человека.

В 1950-е гг. исследования радиоактивного изотопа углерода C^{14} , большое количество которого попало в климатическую систему Земли в результате испытаний ядерного оружия, позволили сделать вывод, что углекислый газ, попадая в атмосферу, довольно быстро в ней перемешивается как по горизонтали — от полюса до полюса, так и по вертикали — до верхних слоев стратосферы. Изотоп C^{14} также образуется в верхних слоях атмосферы под воздействием космических лучей, убывая затем в течение тысячелетий. Что касается «старого» углерода, содержащегося в ископаемом топливе, то в нем практически отсутствует радиоактивный изотоп. Таким образом, сжигание ископаемого топлива приводит к выбросу в атмосферу лишь нерадиоактивного углерода. В 1950-е гг. Ганс Зюсс (Suess, 1955) обнаружил, что содержание стабильного углерода C^{12} и C^{13} в годовых кольцах многовековых деревьев, относящихся к XX столетию,

повышено, а C^{14} , соответственно, понижено. Этот эффект он объяснил увеличением поступления в атмосферу углекислого газа в результате сжигания ископаемого топлива.

В это же время Роджер Ревелл совместно с Зюссом (Revelle and Suess, 1957), а также, независимо от них, несколько других исследователей установили, что избыток углекислого газа в атмосфере, образующийся в результате сжигания ископаемого топлива, далеко не так быстро, как представлялось ранее, компенсируется поглощением CO_2 океаном.

Работы Пласса, Зюсса, Ревелла, а также сразу вслед за ними — Берта Болина и Эрика Эрикссона (Bolin and Eriksson, 1959) вывели проблему антропогенного потепления на новый уровень общественного восприятия. Впоследствии, уже в начале 1960-х гг., в работах Болина и других проблема антропогенного изменения климата приобрела тревожное звучание, в конечном итоге оказавшись в одном ряду с крупнейшими глобальными вызовами человечеству.

В 1958 г. Чарльз Килинг начал измерения концентрации углекислого газа в атмосфере — сначала в Калифорнии, затем в Антарктиде и на Гавайях. Впоследствии антарктическая станция была закрыта, и основной стала гавайская обсерватория в Мауна Лоа, которая не прерывает измерений до настоящего времени. Килингу удалось довольно точно измерить концентрацию углекислого газа в атмосфере и обнаружить ее годовой рост (Keeling, 1960). В это время концентрация составляла 315 млн^{-1} , а средняя глобальная (5-летняя) температура $+13,9^\circ\text{C}$.

Модельные исследования, проведенные Фрицем Мёллером с помощью созданной им 1-мерной модели, показали, что учет обратной связи водяного пара делает модельный климат очень чувствительным к изменениям концентрации CO_2 (Möller, 1963).

В 1960-е гг. на передний план науки выдвинулись достижения Принстонской лаборатории в США. Сюкуро Манабе и Ричард Везеролд с помощью разработанной ими радиационно-конвективной модели выполнили расчет, убедительно продемонстрировавший, что удвоение CO_2 поднимет глобальную температуру на несколько

градусов (Manabe and Wetherald, 1967). Эти расчеты показали, что средняя и нижняя облачность способствует понижению температуры у поверхности, в то время как верхняя вызывает дополнительное потепление, а также, что рост концентрации CO_2 приводит к охлаждению стратосферы.

Кривая 3 на рисунке 1, взятом из работы Будыко (1972), показывает прогноз изменений глобальной приземной температуры на конец XX в. и далее, обусловленных ростом концентрации углекислоты в атмосфере. Прогноз основан на работе Манабе (Manabe, 1970).

Используя радиационно-конвективную модель, на базе оценки будущих изменений атмосферной концентрации CO_2 на конец XX в., выполненной Департаментом ООН по экономическим и социальным вопросам, Манабе установил, что рост глобальной приземной температуры с 1900 по 2000 г. составит около $0,8^\circ\text{C}$. Сегодня производит сильное впечатление тот факт, что прогноз был выполнен за 30 лет до конца XX века, а полученный результат довольно хорошо воспроизвел наблюдаемые изменения глобальной температуры в последующие десятилетия.

В конце 1960-х гг. появились еще две простые модели, разработанные в СССР Михаилом Ивановичем Будыко, и в США Уильямом Селлерсом, с которыми некоторые специалисты связывают новую постановку проблемы изменения климата.

М. И. Будыко и его коллеги в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, отдавая себе отчет в чрезмерной упрощенности существовавших в то время моделей, пытались делать прогнозы изменения климата с использованием эмпирических моделей, основанных на данных о прошлых состояниях климатической системы. Результаты расчетов с построенной Будыко предельно простой, нульмерной моделью теплового баланса Земли указали на относительную устойчивость глобального климата. Однако современное состояние климата Земли (температура, площадь снежного покрова) в модели Будыко находилось недалеко от «критической точки», за которой климат переходил в новое состояние

— с подъемом температуры, растаявшим льдом и более высоким уровнем океана, в соответствии с известными палеоклиматическими аналогами. За другой «критической точкой» в модели Будыко планету ждало глобальное оледенение, замерзшие океаны, состояние, названное Будыко «белая Земля» — климатическая катастрофа, способная уничтожить высшие формы жизни на планете (Будыко, 1968; Budyko, 1969). Экспоненциальный рост индустриализации, согласно расчетам Будыко, приводил к сильному глобальному потеплению (см. кривая 2 на рис. 1), иными словами, Будыко констатировал неизбежность глобального потепления в ближайшее столетие (Будыко, 1972).

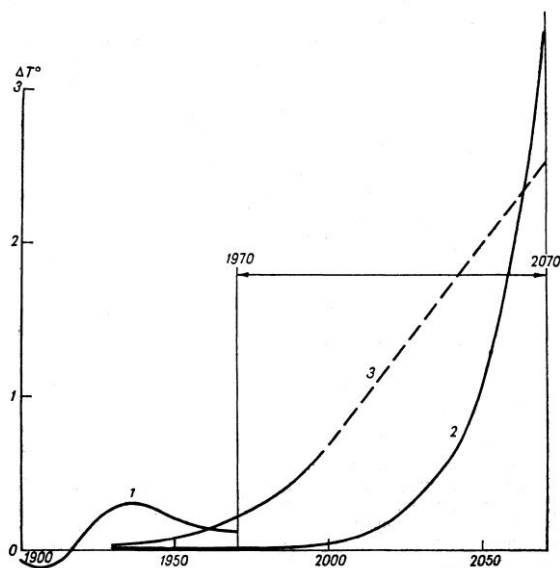


Рис. 1. Вековой ход аномалий температуры воздуха у земной поверхности: 1 — данные наблюдений; 2 — изменения, обусловленные ростом производства энергии; 3 — изменения, обусловленные ростом концентрации углекислоты (Будыко, 1972).

Уильям Селлерс рассчитал возможные отклонения для реальной атмосферы — отдельно в каждом широтном поясе (Sellers, 1969). Несмотря на то, что его модель использовала отличные от Будыко уравнения, результаты подтвердили, что климат опасно чувствителен к малым воздействиям — колебаниям солнечной активности или хозяйственной деятельности человека. Последняя, очевидно, направляла глобальный климат в сторону потепления.

Несмотря на недоверие к простым моделям со стороны части научного сообщества, неверие в прогноз потепления и в саму возможность прогнозировать изменения климата, которые встретили Будыко и Селлерс, в 1970-е гг. парниковый эффект и возможное глобальное потепление вышли на первый план климатических исследований по целому ряду направлений. Попутно существенно углубились исследования других климатоформирующих факторов, в частности аэрозолей. Исследования показали, что аэрозоли, связанные с человеческой деятельностью, противодействуют глобальному потеплению и могут привести к серьезному похолоданию (Bryson and Wendland, 1970; Кароль, 1977).

Наступила эпоха трехмерного физико-математического моделирования глобальной климатической системы.

1.2. Установление причин и прогноз климатических изменений

Дальнейшие исследования показали, что так называемые малые газовые примеси: озон, метан, окислы азота, хлорфторуглеродные соединения вносят свой вклад в парниковый эффект (Ramanathan, 1975; Wang et al., 1976; Кароль и др., 1983; Андропова и др., 1986; Ramanathan et al., 1987). В качестве важных факторов, оказывающих влияние на климат, были признаны сокращение площади лесов и другие изменения экосистем (Woodwell et al., 1978). Изменчивость солнечной активности также получила свои доли внимания в исследованиях изменений климата (Eddy, 1976; Kerr, 1991).

В 1979 г. администрация США обратилась к Национальной академии наук с запросом о чувствительности климата к CO_2 . Академия организовала группу экспертов под председательством авторитетного ученого Джула Чарни. В эту группу входили наиболее уважаемые эксперты, не участвовавшие в дебатах вокруг этой проблемы. Группа Чарни сравнила результаты расчетов с двумя независимыми (как в отношении «физического» содержания, так и математической реализации) 3-мерными сложными глобальными климатическими моделями, разработанными Манабе с коллегами из Принстонской лаборатории и Джеймсом Хансеном из НАСА. Группа обнаружила различия в деталях полученных результатов, но констатировала фундаментальное согласие их в главном: климат теплеет при росте концентрации CO_2 в атмосфере. Все прочие расчеты с использованием моделей, упрощенных разными способами и с использованием разных подходов, давали качественно один и тот же результат — глобальное потепление.

Модель Манабе показала, что при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере произойдет потепление, приблизительно, на 2°C , модель Хансена — на 4°C . Основываясь на этих оценках чувствительность глобального климата к удвоению CO_2 группа Чарни оценила как $1,5\text{—}4,5^\circ\text{C}$, с наиболее вероятным значением 3°C . Чарни признался тогда, что группа «постаралась, но не смогла найти какой-либо упущенный или недооцененный физический эффект» (National Academy of Sciences, 1979)⁵. В течение последующих многих лет появления новых сложных моделей, улучшения их пространственного разрешения и повышения реалистичности эта оценка если и корректировалась, то незначительно.

В СССР в этот период были выполнены оценки чувствительности климата к увеличению содержания CO_2 в атмосфере с помощью упрощенных энергобалансовых моделей, учитывающих различные обратные связи в климатической системе (Будыко, 1974; Мохов, 1981). Существенный вклад в развитие теории климата с помощью

⁵ Последний, Пятый оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 2013) в точности подтвердил диапазон чувствительности климата, полученный группой Чарни.

физико-математического моделирования был внесен Г. И. Марчуком и его сотрудниками (Марчук, 1979; Дымников и др., 1980; и др.). В частности, разработанная ими зонально осредненная модель общей циркуляции атмосферы также использовалась для оценок чувствительности климата (Дымников и др., 1980). Другой подход к установлению пределов возможной чувствительности климатической системы к увеличению содержания CO_2 был основан на анализе данных о современных изменениях климата, полученных по материалам метеорологических наблюдений. Результаты выполненных работ в целом соответствовали диапазону оценок, полученных другими методами (Будыко, 1977а, 1977б; Винников и Гройсман, 1981, 1982). В качестве независимого подхода для оценки климатических условий в будущем использовались также палеоклиматические данные. В середине 1970-х годов были выполнены первые оценки возможных изменений климата при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере с использованием карт В. М. Сеницына для плейстоцена (Будыко и др., 1978). Этот подход получил дальнейшее развитие в целом ряде последующих работ (Будыко, 1979, 1980; Будыко, Ронов и Яншин, 1985 и др.). В качестве палеоклиматических аналогов климата XXI века использовались оптимум голоцена (6,2—5,3 тыс. лет т. н.), оптимум миклутинского межледникового (около 122—125 тыс. лет т. н.) и оптимум плейстоцена (4,3—3,3 млн лет т. н.). Подробный обзор выполненных работ представлен в монографии под редакцией М. И. Будыко и Ю. А. Израэля (Борзенкова и др., 1987).

В ходе Первой всемирной конференции по климату, организованной Всемирной метеорологической организацией в 1979 г. в Женеве, в числе 25 заказных докладов фигурировало четыре доклада от СССР — Е. К. Федорова, Г. И. Марчука, И. П. Герасимова и Ю. А. Израэля. Е. К. Федоров, выступивший с вводным докладом на этой конференции, в частности отметил: «Изменения климата в будущем неизбежны. Они станут заметными и, может быть, необратимыми в ближайшие несколько десятилетий... В связи с этим очевидно, что необходимо было бы выработать некоторую стратегию,

т. е. систему заранее спланированных действий, которые обеспечили бы для человечества избежание негативных последствий возможных изменений климата...» (Федоров, 1979).

С начала 1980-х гг. начались попытки воспроизвести наблюдаемые изменения климата с помощью сложных климатических моделей. В моделях стали имитироваться воздействия извержения вулканов, колебания солнечной активности и рост концентрации парниковых газов. Успешная, в целом, попытка Хансена с коллегами воспроизвести таким образом эволюцию средней глобальной температуры в XX в. (Hansen et al., 1981) повысила доверие к оценкам будущих изменений климата, полученным с этой моделью. Результат Хансена оказался устойчивым — впоследствии способность воспроизводить наблюдаемую эволюцию климата при заданных наблюдаемых внешних воздействиях демонстрировали многие модели (учет загрязнения атмосферы выбросами аэрозоля промышленного происхождения улучшил картину (Mitchell et al., 1995; Santer et al., 1996)). Более того, комбинирование внешних воздействий в расчетах наблюдаемой эволюции климата стало одним из ключевых подходов в установлении причин изменения климата.

Успехи в воспроизведении наблюдаемого климата позволили Хансену с коллегами спрогнозировать обнаружение глобального потепления уже в 1990-е гг. Другие исследователи пришли к заключению, что антропогенное воздействие на климат начнет доминировать над остальными факторами в начале 2000-х гг. (Gilliland, 1982; Madden and Ramanathan, 1980). Эти прогнозы совпадали с ранее сделанными оценками Пласса, Ревела и Болина. Разумеется, эти прогнозы разделяли не все.

Мощное извержение филиппинского вулкана Пинатубо в 1991 г. и выброс в стратосферу около 20 миллионов тонн диоксида серы открыло новый период тестирования климатических моделей. В частности, модель, разработанная группой Хансена, сразу вслед за этим извержением предсказала примерно полуградусное снижение глобальной температуры, продолжавшееся в течение двух лет, как это впоследствии и случилось (Hansen et al., 1992). Ряд моделей

впоследствии успешно воспроизвели реакцию глобальной температуры на указанное внешнее воздействие (Graf et al., 1993).

По мере возрастания доступных вычислительных ресурсов ведущие центры начали переходить от расчетов «равновесных» состояний к расчетам эволюции глобального климата. Помимо меняющегося во времени воздействия радиационно-активных примесей в атмосфере, стали проверяться и другие возможные климатоформирующие факторы, например, колебания солнечной активности. В 1995 г. три центра (Ливерморская лаборатория в США, Центр Хэдли в Великобритании и Институт Макса Планка в Германии) провели успешные эксперименты по воспроизведению изменений температуры в XX в. Им удалось не только воспроизвести вековой глобальный температурный тренд, но и географическую структуру изменений. Наиболее близкими к реальности были расчеты последних десятилетий XX в., когда рост концентрации парниковых газов в атмосфере стал доминировать над другими факторами (Mitchell et al., 1995; Santer et al., 1996; Hasselmann et al., 1995).

В 1988 г. 45-я сессия Генеральной Ассамблеи ООН поручила Всемирной метеорологической организации и Программе ООН по окружающей среде учредить Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК) для подготовки оценочного доклада об ожидаемых последствиях изменения климата. Затем, на Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992 г.) была принята для подписания Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК). Положения РКИК накладывают на ее участников определенные обязательства в области изучения изменения климата и принятия мер по защите климатической системы. Оценочные доклады МГЭИК представляют собой авторитетные и наиболее полные анализы научной литературы по проблеме изменения климата, которые служат основой в деятельности РКИК.

В Первом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 1990) приводится широкий обзор состояния науки об изменении климата, обсуждение неопределенностей и свидетельств потепления.

Второй оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 1996) утверждает: «баланс свидетельств предполагает наличие различного влияния человека на глобальный климат».

Третий доклад МГЭИК (IPCC, 2001) приходит к заключению, что «большая часть потепления последних 50 лет с вероятностью $> 66\%$ может быть отнесена к деятельности человека».

Начало XXI века отмечено нарастанием усилий ведущих центров моделирования климата по воспроизведению наблюдаемой эволюции климатической системы на протяжении периода инструментальных наблюдений. Именно эти эксперименты заложили основу активно развивающегося в настоящее время направления науки о климате — обнаружения и установления причин наблюдаемых изменений климата. Обзор вклада российских ученых в эти исследования представлен в работах (Мохов, 2004, 2009, 2013).

В пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления убедительно свидетельствует сравнение данных наблюдений и результатов двух серий модельных расчетов эволюции климата XX — начала XXI веков, где в одной серии учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия на климатическую систему Земли, а в другой только естественные внешние воздействия. Прямое сравнение данных наблюдений за глобальной температурой приземного воздуха с результатами модельных расчетов показало, что только в экспериментах, учитывающих антропогенные внешние воздействия, хорошо воспроизводится наблюдаемое повышение температуры. В экспериментах, где антропогенные воздействия не учитываются, температура в последние десятилетия XX века понижается (см. рисунок 2). Подробное обсуждение этих исследований можно найти в (Hegerl et al., 2007; Спорышев и др., 2008; секция 2 настоящей статьи).

Четвертый доклад МГЭИК (IPCC, 2007) констатирует: «Потепление не вызывает сомнений» и «большая часть потепления последних 50 лет с вероятностью $> 90\%$ является следствием роста парниковых газов». Кроме того, доклад отмечает, что содержание парниковых газов в атмосфере достигло беспрецедентного уровня, и

они вынуждают климат меняться. Влияние антропогенного воздействия на температуру приземного воздуха обнаружено не только глобально, но и отдельно на каждом континенте, за исключением Антарктиды, где недостаточно данных наблюдений для достоверных выводов. Выявлено влияние человека на повышение температуры верхнего 700-метрового слоя Мирового океана.

По прошествии более двух десятков лет со времени опубликования первых оценок МГЭИК, относящихся к будущим климатическим изменениям, представляет определенный интерес сопоставление этих оценок с фактическими изменениями климата. Разумеется, модельные оценки будущих изменений климата не являются прогнозами (см., напр., (Катцов и др., 2008)).

Наблюдаемое изменение средней глобальной температуры за период 1990—2005 гг. в целом оказывается в пределах модельных оценок ранних докладов МГЭИК (рис. 2).

Следует отметить, что сценарии возможных в будущем внешних воздействий, использовавшиеся в ранних оценках (Первый и Второй оценочные доклады МГЭИК), основаны на существенно менее сложных и детализированных предпосылках, нежели последующие сценарии SRES (Nakicenovic, 2000) (Третий и Четвертый оценочные доклады МГЭИК). Например, в Первом оценочном докладе сценарии внешних воздействий не учитывали будущих распределений аэрозоля.

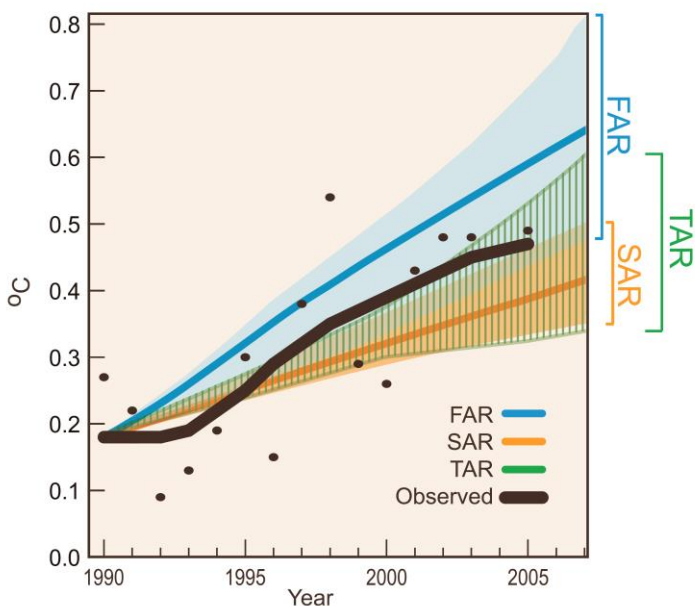


Рис. 2. Аномалии среднегодовой глобальной приземной температуры по отношению к периоду 1961—1990 по данным наблюдений (Observed) по работе (Brohan et al., 2006) и оценкам Первого (FAR), Второго (SAR) и Третьего (TAR) оценочных докладов МГЭИК (IPCC, 1990; IPCC, 1996; IPCC, 2001).

“Лучшие оценки” по модельным расчетам FAR и SAR показаны жирными линиями, тогда как затенением соответствующего цвета указаны прогнозируемые диапазоны возможных значений. В Третьем оценочном докладе (TAR) нет “лучшей оценки”, а соответствующий диапазон возможных значений указан на рисунке штриховкой. Наблюдаемые среднегодовые значения показаны черными точками, а черная кривая, отражающая долгопериодные изменения, получена из среднегодовых значений путем сглаживания с помощью 13-точечного фильтра.

Рисунок из работы (Le Treut et al., 2007).

2. Причины наблюдаемых изменений глобального климата

Введение

В настоящем разделе обсуждаются причины наблюдаемых глобальных климатических изменений. Принципиальный подход к проблеме остается неизменным со времени выхода ОД_РФ-1. Выявление причин климатических изменений основывается на сравнении наблюдаемых изменений с ожидаемой реакцией на предполагаемые внешние воздействия, полученной с помощью тщательно выверенных климатических моделей. При сравнении используются статистические процедуры, позволяющие объективно установить согласуются ли количественно изменения, наблюдаемые в климатической системе, с ожидаемыми изменениями, полученными в модельных расчетах. Кроме того, проверяется, что указанные изменения не могут быть вызваны другими физически возможными механизмами. В частности, проверяется, не являются ли они просто проявлением естественной изменчивости, свойственной климатической системе (Спорышев и др., 2008).

За прошедшие годы свидетельства влияния человека на климат стали более весомыми. В настоящее время более полные и продолжительные данные наблюдений и расчеты с новым поколением климатических моделей позволяют обнаруживать антропогенное влияние в наблюдаемых изменениях в большем числе компонентов климатической системы. Пятый Оценочный доклад МГЭИК (ОД5 МГЭИК) констатирует, что с вероятностью, большей 95 %, влияние человека было доминирующей причиной потепления, наблюдаемого с середины XX века (Stocker et al., 2013). Согласованность наблюдаемых и расчетных изменений во всей климатической системе Земли, включая глобальные и региональные температуры, температуру тропосферы и стратосферы, глобальный влагооборот, глобальный баланс энергии, изменения в криосфере и Мировом океане, указывает на то, что наблюдаемые климатические изменения

вызваны в первую очередь увеличением концентраций атмосферных парниковых газов вследствие хозяйственной деятельности человека.

В последующих разделах более детально рассматриваются изменения в компонентах климатической системы, которые являются ключевыми для выявления антропогенного влияния на климат. Обзор в основном опирается на ОД5 МГЭИК с учетом работ, вышедших после его опубликования, а также русскоязычных работ, не отраженных в докладе.

2.1. Изменения в ключевых компонентах климатической системы Земли

Основой для прогнозирования будущих климатических изменений, а также установления причин наблюдаемых изменений являются расчеты с современными полными климатическими моделями, выполняемые в рамках Международного проекта сравнения совместных моделей (CMIP). Новые климатические расчеты, выполненные в рамках 5-й фазы CMIP (CMIP5), обладают рядом преимуществ по сравнению с предыдущими расчетами, выполненными в рамках 3-й фазы проекта (CMIP3). В частности, увеличено пространственное разрешение моделей, улучшены схемы параметризации физических процессов, более полно учитывается влияние аэрозолей на климат.

Для задач, рассматриваемых в настоящей работе, наиболее важным является проведение в рамках CMIP5 специальных экспериментов, направленных на установление причин наблюдаемых климатических изменений. В рамках CMIP3 аналогичные расчеты проводились с меньшим числом моделей и в меньшем объеме. В частности, для большинства моделей CMIP5 кроме исторических расчетов, учитывающих все внешние воздействия на климатическую систему Земли и естественной, и антропогенной природы, представлены также расчеты, в которых раздельно учитываются заданные по данным наблюдений естественные внешние воздействия и изменения концентрации в атмосфере хорошо перемешанных

парниковых газов. К естественным внешним воздействиям, в частности, относятся изменения величины приходящей солнечной радиации и изменения концентрации в атмосфере аэрозолей вулканического происхождения, а к антропогенным — изменения концентрации в атмосфере парниковых газов и аэрозолей антропогенного происхождения, а также изменения в землепользовании. Сравнение результатов исторических расчетов по мультимодельным ансамблям с различными внешними воздействиями позволяет получить прямое визуальное представление о соответствии наблюдаемых изменений расчетным и на его основе сделать предварительные выводы о возможных причинах климатических изменений.

На рис. 3 представлена эволюция средней глобальной приземной температуры за период инструментальных наблюдений по данным наблюдений и по модельным расчетам. Рисунок основан на работе (Jones et al., 2013). Отметим, что на вставке в рис. 3b представлены наблюдаемые изменения температуры по трем различным архивам данных (HadCRUT4, GISTEMP и MLOST), что позволяет оценить уровень неопределенности в данных наблюдений. Сравнение расчетов по мультимодельным ансамблям CMIP5 и CMIP3 при учете всех внешних воздействий с данными наблюдений (рис. 3a) показывает хорошее согласие. Наблюдаемые колебания температуры попадают в межмодельный разброс практически каждый год, и ансамблевые средние достаточно близки к наблюдениям.

Такого не происходит, когда в расчетах учитываются только естественные внешние воздействия (рис. 3b). В этом случае наблюдаемое во второй половине XX века потепление в модельных расчетах полностью отсутствует. Отметим, что на обоих рисунках и в наблюдениях, и в модельных расчетах явно прослеживаются последствия крупнейших вулканических извержений: Кракатау (1883 г.), Санта-Мария (1902 г.), Агунг (1963 г.), Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1992 г.). Отметим также, что разброс в мультимодельном ансамбле CMIP5 заметно больше, чем в ансамбле CMIP3.

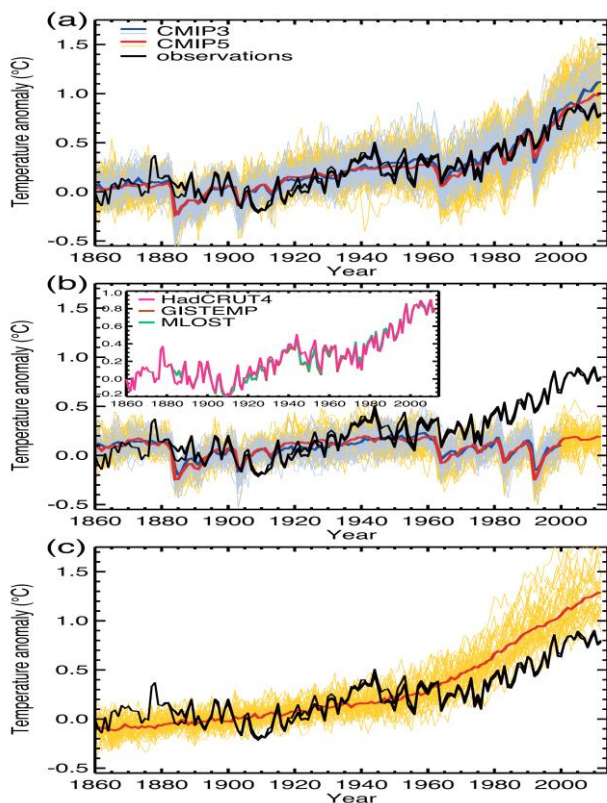


Рис. 3. Три оценки средней глобальной приземной температуры (черные линии) по данным наблюдений HadCRUT4, GISTEMP и MLOST сравниваются с модельными расчетами (по ансамблям CMIP3 — синие линии, и CMIP5 — желтые линии) при учете и антропогенных, и естественных внешних воздействий (а), только естественных воздействий (б) и только влияния роста парниковых газов (с).

Жирные красные и синие линии показывают средние по модельным ансамблям CMIP5 и CMIP3 соответственно. В отдельном прямоугольнике на рис.3б разными цветами показаны три оценки по разным архивам данных наблюдений.

Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Jones et al., 2013).

Среди возможных причин этого в работе (Jones et al., 2013) отмечается увеличение числа моделей в ансамбле CMIP5, а также то, что в большем числе моделей в этом ансамбле учитываются

изменения в землепользовании, а также изменения концентрации в атмосфере большего числа типов аэрозолей, причем в разных моделях могут использоваться разные параметризации этих воздействий.

Когда в расчетах учитываются только изменения концентрации в атмосфере хорошо перемешанных парниковых газов, то модели показывают потепление во второй половине XX века существенно большее наблюдаемого, и наблюдаемые колебания температуры во многие годы не попадают в межмодельный разброс (рис. 3с).

Модельные расчеты по ансамблю CMIP3, учитывающие только влияние роста парниковых газов, на рис. 3с не представлены. Данные наблюдений и результаты модельных расчетов географически осреднены в соответствии с имеющимися данными наблюдений по архиву HadCRUT4 (поскольку пространственное покрытие у этого архива наименьшее) и представлены в виде аномалий по отношению к периоду 1880—1919 гг., хотя первоначально температурные данные в каждой ячейке сетки были получены как аномалии по отношению к периоду 1961—1990 гг..

Пространственная структура изменений среднегодовой температуры приземного воздуха показана на рис. 4. На рисунке представлены линейные тренды в наблюдаемой и расчетных температурах за периоды 1901—2010 гг., 1901—1950 гг., 1951—2010 гг. и 1979—2010 гг. Данные наблюдений взяты из архива HadCRUT4, и модельные тренды рассматриваются только в тех точках, где имеется достаточно данных наблюдений. Для периода 1901—2010 гг. наблюдения показывают потепление почти во всех точках с наибольшим потеплением на континентах в высоких и средних широтах Северного полушария. Небольшое похолодание наблюдается в Северной Атлантике южнее Гренландии. Отметим, что на суше температура увеличивается быстрее, чем на океанах, что особенно ясно видно при рассмотрении периода 1951—2010 гг. Модельный анализ, выполненный в работе (Воег, 2011), показал, что более медленное потепление океанов определяется не только температурной инерцией воды, но в значительной степени обусловлено переносом избыточного тепла, образующегося при увеличении концентрации

парниковых газов в атмосфере, от океанов, особенно из области экваториального Тихого океана, к континентам.

На рис. 4 модельные расчеты представлены тремя ансамблями, различающимися учетом внешних воздействий на климатическую систему Земли. Сравнение экспериментов по ансамблю *historical*, в котором в расчетах учитываются все внешние воздействия и антропогенные, и естественные, с данными наблюдений показывает лучшее по всем ансамблям согласие с наблюдениями во все рассматриваемые периоды.

Для периодов 1901—2010 гг. и 1951—2010 гг. наблюдаемые изменения в более чем 85 % ячеек сетки попадают в центральные 90 % разброса по модельному ансамблю. Отметим одну особенность в структуре трендов потепления, которая особенно важна для территории России. При рассмотрении структуры потепления в Евразии в период 1951—2010 гг. видно существенное различие между модельными расчетами и данными наблюдений. По модельным расчетам наиболее быстро потепление происходит в высоких широтах, образуя так называемое полярное усиление, а по данным наблюдений зона быстрого потепления расположена южнее, в средних широтах. При рассмотрении периода 1979—2010 гг. это различие уже не так заметно, поскольку наблюдаемое потепление происходит с примерно одинаковой скоростью и в высоких, и в средних широтах.

Два других модельных ансамбля демонстрируют существенные различия с данными наблюдений. В ансамбле *historicalNat*, в котором в модельных расчетах учитываются только естественные внешние воздействия, глобального потепления нет, а наблюдаемые тренды в периоды 1901—2010 гг. и 1951—2010 гг. более чем в двух третях ячеек сетки выходят за границы 90 % разброса по модельному ансамблю.

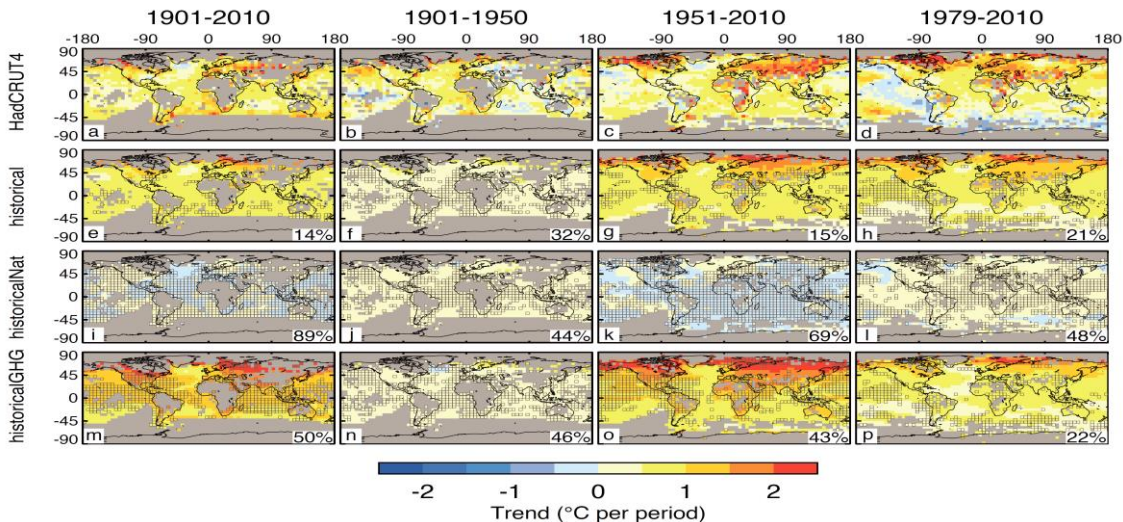


Рис. 4. Линейные тренды в наблюдаемой и расчетной среднегодовой приземной температуре (град. С за соответствующий период) за периоды 1901—2010 (a, e, i, m), 1901—1950 (b, f, j, n), 1951—2010 (c, g, k, o) и 1979—2010 (d, h, l, p).

Тренды в температуре по данным архива HadCRUT4 (a—d), по модельным расчетам CMIP3 и CMIP5 с учетом и антропогенных, и естественных внешних воздействий (e—h), по модельным расчетам CMIP3 и CMIP5 с учетом только естественных воздействий (i—l), по модельным расчетам CMIP3 и CMIP5 с учетом только роста атмосферной концентрации парниковых газов (m—p). Тренды показаны только в точках, где имеется достаточно данных наблюдений в архиве HadCRUT4, а точки, где данных наблюдений недостаточно для установления тренда, окрашены серым цветом. На рисунках e—p прямоугольниками с серыми границами отмечены ячейки сетки, где наблюдаемые тренды выходят за границы 5-й и 95-й процентилей модельных распределений, и доля числа таких ячеек (%) по отношению к общему числу ячеек, где рассчитывался тренд, показана в правом нижнем углу.

Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Jones et al., 2013).

В ансамбле historicalGHG, в котором в модельных расчетах учитывается только влияние роста атмосферной концентрации парниковых газов, потепление в периоды 1901—2010 гг. и 1951—2010 гг. заметно больше наблюдаемого, и наблюдаемые тренды выходят за границы 90 % разброса по модельному ансамблю более чем в 40 % ячеек сетки. Этого и следовало ожидать, поскольку в расчетах не учитывается охлаждающий эффект аэрозолей антропогенного и естественного происхождения.

К настоящему времени выполнено довольно много работ, в которых используются формальные статистические методы для выделения вклада отдельных внешних воздействий на климатическую систему Земли в наблюдаемое глобальное потепление. Каждому из возможных внешних воздействий соответствует своя пространственно-временная структура отклика климатической системы на это воздействие («климатический сигнал»). Структура отклика на рассматриваемое воздействие выводится из специальных экспериментов с МОЦАО, а затем статистическими методами устанавливается доля вклада отдельных внешних воздействий в наблюдаемую картину температурных (или иных) климатических изменений. Отметим, что при статистическом анализе принимается в расчет возможность того, что модели недооценивают или, наоборот, переоценивают влияние отдельных факторов.

В работе (Bindoff et al., 2013) дан краткий обзор современных результатов таких исследований. В расчетах, на которых основывались эти исследования, использовались разные МОЦАО и разные схемы параметризации внешних воздействий. Кроме того, отличалась и сама техника статистического анализа. Однако общие выводы, в целом, согласуются. Суммируя их, Bindoff et al. (2013) приходят к выводу, что с вероятностью, большей 95 %, более половины наблюдаемого повышения средней глобальной приземной температуры в 1951—2010 гг. обусловлено антропогенным повышением концентраций парниковых газов и другими антропогенными воздействиями. С вероятностью, большей 66 %, вклад парниковых газов в повышение глобальной температуры в

1951—2010 гг. находится в диапазоне от 0,5 до 1,3 °C, в то время как вклад прочих антропогенных факторов, включая охлаждающий эффект аэрозолей, попадает в диапазон от –0,6 до 0,1 °C. Вклад естественных факторов составляет от –0,1 до 0,1 °C, а на долю внутренней изменчивости приходится от –0,1 до 0,1 °C. Суммарный вклад всех рассматриваемых внешних воздействий довольно хорошо соответствует наблюдаемому потеплению за этот период (рис. 5).

Дополнительный аргумент в пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления дает статистический анализ связи изменений средней глобальной приземной температуры с естественными и антропогенными факторами. Так, в работах (Мохов, Смирнов, 2009; Мохов и др., 2012) по данным с середины XIX в. на базе анализа причинности по Грейнджеру и кроссвейвлетного анализа сделан вывод об определяющем влиянии изменений концентрации углекислого газа в атмосфере на долгопериодные тренды средней глобальной температуры, при этом естественные климатические циклы с периодами в несколько десятилетий существенно влияют только на относительно быстрые ее вариации. Влияние на долгопериодные тренды естественных факторов, связанных с солнечной и вулканической активностью, заметно менее значимо.

Важное свидетельство антропогенного влияния на климат дает анализ вертикальной структуры температурных изменений в атмосфере. В двух работах (Lott et al., 2013; Santer et al., 2013) результаты ансамблевых модельных расчетов с отдельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий, выполненных в рамках проекта CMIP5, сравнивались с данными наблюдений.

В работе (Lott et al., 2013) сравнение модельных результатов для периода 1961—2010 гг. производилось с данными трех архивов радиоизондовых наблюдений, что позволяет оценить разброс в имеющихся данных. Наблюдаемые и рассчитанные вертикальные профили трендов среднесезонной температуры воздуха для четырех широтных поясов показаны на рис. 6.

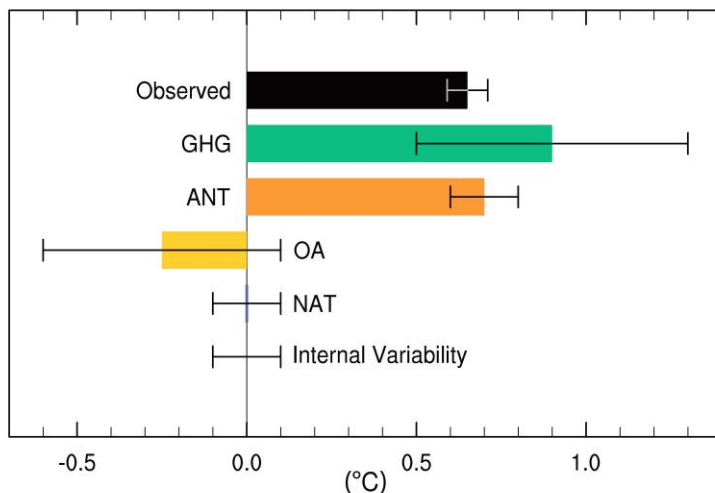


Рис. 5. Вероятностные границы (горизонтальные интервалы) и средние значения (цветные прямоугольники) оценок установленного вклада различных факторов в линейный тренд наблюдаемого потепления в 1951—2010 гг.: изменения концентраций парниковых газов (GHG), других антропогенных воздействий (OA), естественных воздействий (NAT), суммарного воздействия всех антропогенных факторов (ANT) и естественной изменчивости (Internal Variability).

Величина тренда по данным архива HadCRUT4 показана черным (Observed) вместе с 5–95 % доверительным интервалом для нее, учитывающим неопределенности в этом архиве (Morice et al., 2012).

Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013).

Во всех случаях лучшее согласие с данными наблюдений показывают результаты модельного ансамбля, в котором учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия. В этом ансамбле получено похолодание в стратосфере, близкое к наблюдаемому, и потепление в тропосфере, согласующееся с наблюдаемым, но несколько его превосходящее, особенно в тропических широтах (рис. 6b). В ансамбле, учитывающем только влияние изменений концентрации парниковых газов, потепление в тропосфере близко к потеплению, полученному в первом ансамбле, но величина похолодания в стратосфере существенно меньше наблюдаемой. В ансамбле, где учитывались только естественные

внешние воздействия, и потепление, и похолодание выражены очень слабо и полностью расходятся с данными наблюдений.

В работе (Santer et al., 2013) результаты модельных расчетов для периода спутниковых наблюдений (1979—2012 гг.) сравнивались с данными микроволнового зондирования атмосферы по приборам MSU (Microwave Sounding Units), установленным на спутниках, причем для сравнения использовались результаты обработки этих данных, выполненные двумя группами независимых исследователей. Выводы, полученные в этой работе, близки к выводам работы (Lott et al., 2013). Суммируя, можно заключить, что в последние 50 лет наблюдается необычная вертикальная структура температурных изменений в атмосфере. Ее характерными чертами являются похолодание в стратосфере и потепление в тропосфере. Модельные расчеты показывают, что похолодание в стратосфере обусловлено в основном уменьшением озонового слоя, вызванного антропогенным воздействием, и в меньшей степени увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, которое в свою очередь определило потепление тропосферы. Кроме того, расчеты показали, что такую структуру потепления маловероятно получить в результате только внутренних колебаний, присущих климатической системе Земли, или в ответ на естественные внешние воздействия, включая извержения вулканов и изменения в потоке приходящей солнечной радиации.

Статистический анализ позволил с высокой степенью уверенности идентифицировать антропогенный сигнал в температурных изменениях глобальной атмосферы, как по данным радиозондовых наблюдений, так и по данным спутникового зондирования атмосферы.

Мировой океан играет ключевую роль при рассмотрении изменений количества энергии, которое содержится в климатической системе Земли. По оценке (Rhein et al., 2013) на долю океана приходится 93 % энергии, накопленной климатической системой за период с 1971 г. по 2010 г., который характеризуется относительно большим количеством наблюдений.

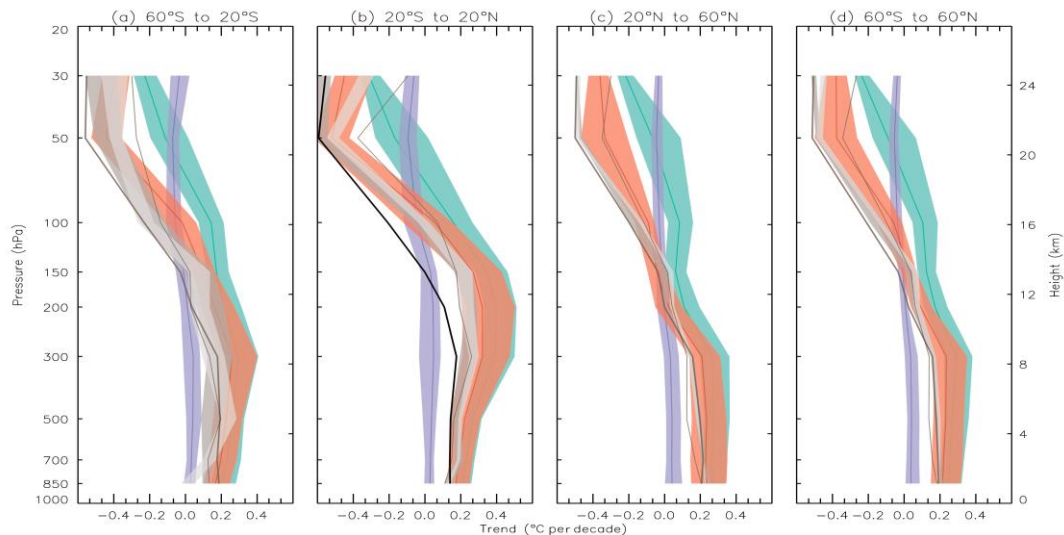


Рис. 6. Наблюдаемые и рассчитанные линейные тренды среднезональной температуры ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) для периода 1961—2010 для расчетов по моделям CMIP5 с учетом и антропогенных, и естественных внешних воздействий (красный), только естественных воздействий (синий) и только с учетом влияния парниковых газов (зеленый).

Затенением соответствующего цвета выделены области между 5-ой и 95-ой процентилями модельных распределений. Показаны также тренды по трем архивам данных радиозондовых наблюдений (жирная черная линия: HadAT2, тонкая черная линия: RAOBCORE 1.5, темно-серая полоса: RICH-obs 1.5 ансамбль, светло-серая полоса: RICH- τ 1.5 ансамбль). Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Lott et al., 2013).

Более 60 % общего увеличения энергии в климатической системе приходится на верхний слой океана (0—700 м) и около 30 % на более глубокие слои.

За последние несколько лет были обнаружены и уменьшены ошибки анализов данных наблюдений за температурой верхнего слоя океана, что повысило достоверность оценок происходящих изменений. По оценке (Rhein et al., 2013), основанной на данных (Domingues et al., 2008), рост теплосодержания в верхнем слое океана за период 1971—2010 гг., рассчитанный на основе линейного тренда, составил около 17 (от 15 до 19) $\times 10^{22}$ Дж.

В работе (Domingues et al., 2008) было выполнено сравнение модельных расчетов изменения теплосодержания верхнего слоя океана по 7 МОЦАО проекта CMIP3 с данными откорректированного архива наблюдений. При учете в модельных экспериментах как антропогенных, так и естественных внешних воздействий модели, использованные в этой работе, показали достаточно близкие к наблюдениям результаты, как для общего тренда изменений, так и для многолетних колебаний теплосодержания верхнего слоя океана. Средний по ансамблю моделей тренд за период 1961—1999 гг. был только на 10 % меньше наблюдаемого. Модельные расчеты, в которых учитывалось только антропогенное воздействие, а изменения приходящего потока солнечной радиации и влияние вулканических извержений в расчет не принимались, значительно переоценивают общий линейный тренд и недооценивают величину многолетней изменчивости.

На рис. 7 показано воспроизведение десятию моделями проекта CMIP5 эволюции теплосодержания верхнего слоя глобального океана. Рисунок аналогичен рисунку из работы (Domingues et al., 2008), но выполнен по расчетам с моделями нового поколения.

Из рисунка видно довольно хорошее, в целом, согласие с данными наблюдений модельных расчетов при учете всех внешних воздействий — и антропогенных, и естественных, хотя межмодельный разброс довольно велик. Расчеты, в которых учитываются только

естественные внешние воздействия, полностью расходятся с наблюдениями.

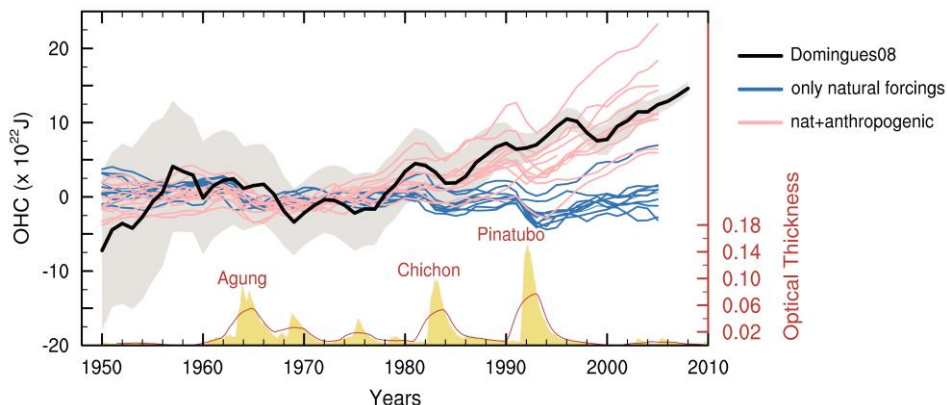


Рис. 7. Сравнение теплосаза верхних 700 м глобального океана (ОНС, единица: 10^{22} Дж) по данным наблюдений (черная линия) и рассчитанного по десяти моделям CMIP5 с учетом только естественных внешних воздействий (синие линии), а также и антропогенных, и естественных внешних воздействий (розовые линии).

Серое затенение показывает зону неопределенности в данных наблюдений. Все временные ряды рассчитаны как аномалии по отношению к теплосаза в 1961 г. Средняя глобальная величина оптической толщины стратосферного аэрозоля (Optical Thickness) показана бежевым цветом в нижней части рисунка. Трехлетнее скользящее среднее для этой величины показано коричневой кривой. Указаны также названия и время извержения крупнейших вулканов Агунг, Эль-Чичон, Пинатубо. Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Domingues et al., 2008).

Статистический анализ антропогенного вклада в наблюдаемые изменения температуры верхнего слоя океана на основе сравнения модельных расчетов с несколькими архивами данных наблюдений был выполнен в работах (Gleckler et al., 2012; Pierce et al., 2012). В первой работе сравнение производилось с расчетами по 13 моделям CMIP3, а во второй с расчетами по 20 моделям CMIP5. В обоих случаях удалось выявить антропогенный сигнал в наблюдаемых изменениях температуры. Причем, в работе (Pierce et al., 2012) на

основе статистических методов оптимального обнаружения сигнала было показано, что для периода 1955—2004 гг. наблюдаемые температурные изменения не согласуются ни с предположением, что они вызваны внутренними колебаниями, присущими климатической системе, ни с предположением, что они являются следствием влияния изменений солнечной активности или извержений вулканов.

2.2. Совместный анализ основных климатических характеристик

Данные наблюдений, связанные с каждым элементом климатической системы, как правило, независимы, и, следовательно, совместный анализ всех наблюдений по основным компонентам климатической системы повышает уровень доверия к выводам по сравнению с одним исследованием или анализом какого-то одного компонента системы. Способность климатических моделей воспроизводить наблюдаемые изменения (с точностью до внутренней изменчивости) в широком наборе климатических характеристик также создает уверенность в качестве моделей, используемых для моделирования климата Земли.

Рис. 8 показывает, как наблюдаемые изменения во всей климатической системе можно понять с точки зрения воздействия естественных и антропогенных факторов.

На рис. 8 представлены временные ряды приземной температуры (коричневый фон рисунков, обозначение: T , единица: $^{\circ}\text{C}$), осадков (зеленый фон, обозначение: $P_{\text{гес}}$, единица: мм в сутки), теплозапаса океана (голубой фон, обозначение: ОНС , единица: 10^{22} Дж), концентрации морского льда (белый фон, обозначение: Sea Ice , единица: 10^6 кв. км). На всех рисунках данные наблюдений показаны черным цветом или черным цветом и серым затенением.

Результаты модельных расчетов, учитывающих только естественные внешние воздействия, показаны синим цветом, а расчетов, учитывающих и антропогенные и естественные внешние воздействия, — розовым.

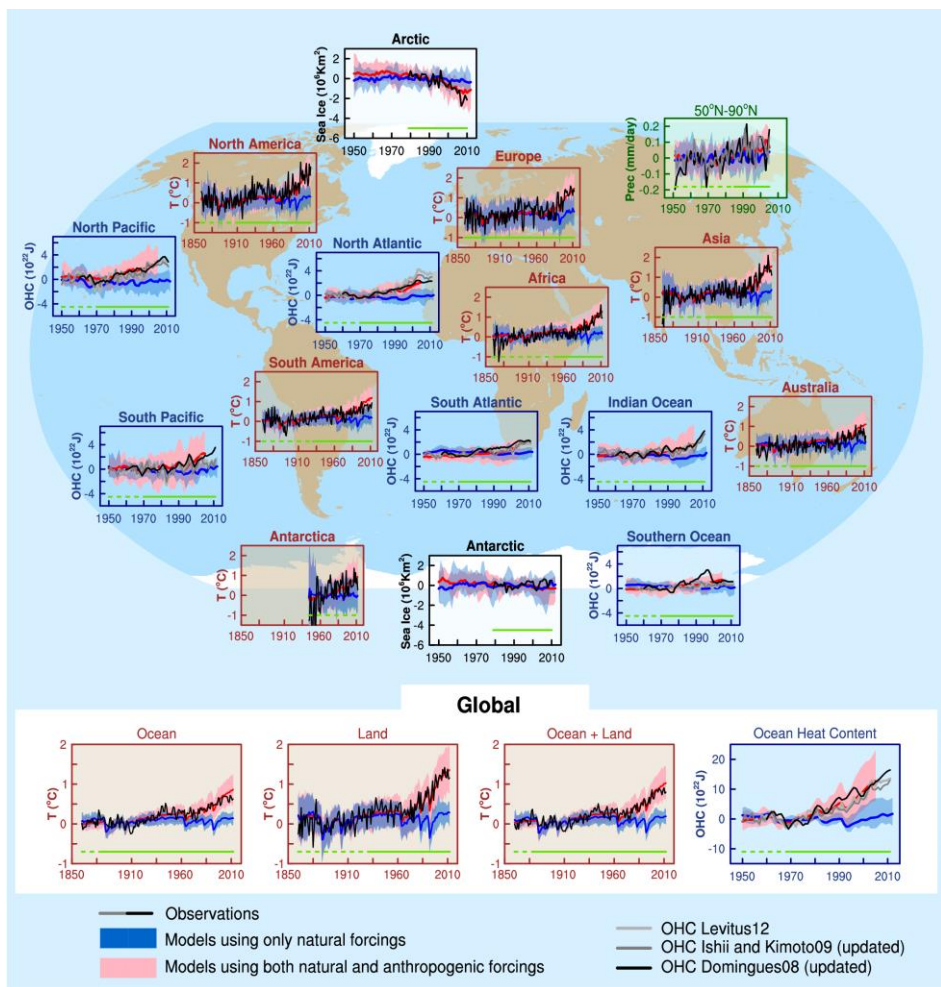


Рис. 8. Обнаружение и установление причин сигналов в элементах климатической системы Земли в региональном (верхняя часть рисунка) и глобальном (нижняя часть рисунка) масштабах.

Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013).

Затенением соответствующего цвета выделены области между 5-ой и 95-ой процентиллями модельных распределений. Темно-синие и

темно-красные линии показывают средние по модельным ансамблям. Для осадков показаны данные наблюдений из двух архивов, а для теплозапаса океана — из трех. Данные разных архивов наблюдений показаны черными или темно-серыми линиями разной цветовой интенсивности. Зеленые линии в нижней части рисунков отражают качество наблюдений и оценок. Для рядов температуры и осадков сплошные линии показывают, что при расчете площадь области, охваченной наблюдениями, составила более 50 % суммарной, а пунктирные линии — менее 50 %. Например, для Антарктиды площадь области, охваченной наблюдениями, никогда не превышает 50 % площади континента. На рисунках, относящихся к теплосодержанию океана и морскому льду, сплошные зеленые линии показывают, что для оценок использовались более качественные данные с хорошим охватом, а пунктирные линии — данные с лишь адекватным охватом.

Из рисунка ясно видна согласованность наблюдаемых изменений с модельными расчетами, которые включают антропогенные и естественные воздействия. Изменения температуры приземного воздуха над сушей, температуры поверхности океанов, а также изменения теплозапаса океана в глобальном масштабе (нижняя часть рисунка) явно демонстрируют антропогенные и природные сигналы, при этом четко видно различие между наблюдаемыми изменениями и модельными расчетами, основанными на гипотезе только естественных внешних воздействий на климатическую систему. Эти сигналы не просто появляются в глобальных средних, но и повторяются в масштабах континентов и отдельных океанических бассейнов (верхняя часть рисунка). Изменения морского льда в Арктике существенно выходят за границы ожидаемого диапазона, определяемого естественной изменчивостью. Однако в Антарктике концентрация морского льда остается в целом в пределах естественной изменчивости, что согласуется с модельными экспериментами, учитывающими все внешние воздействия.

Таким образом можно констатировать, что наблюдается одновременное увеличение запаса энергии всех основных компонент

климатической системы Земли. Причем амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления в различных компонентах хорошо согласуются с ожидаемым по модельным расчетам откликом климатической системы Земли на антропогенные и естественные внешние воздействия.

3. Антропогенная составляющая изменения климата на территории России

Введение

В настоящей секции рассматривается эволюция климата России в целом в XX — начале XXI века по данным наблюдений, а также в расчетах, выполненных по современным глобальным климатическим моделям с учетом влияния всех внешних воздействий и с учетом только естественных внешних воздействий. Дается статистическая оценка вклада отдельных внешних воздействий в климатические изменения на территории России. Рассматривается вся территория России в целом и Россия как часть более крупных регионов.

Анализируются региональные аспекты установления причин климатических изменений и оценки степени влияния отдельных внешних воздействий на климат. Обсуждаются проблемы соответствия модельных расчетов данным наблюдений для разных сезонов и разных регионов применительно к территории России. Рассматриваются вопросы статистической интерпретации результатов ансамблевых модельных расчетов. Даются статистические оценки вклада отдельных внешних воздействий в региональные климатические изменения на территории России.

Обсуждаются вопросы обнаружения влияния внешних воздействий на климат России при рассмотрении отдельных аномальных климатических явлений, используемые в таких исследованиях статистические методы. Анализируются полученные результаты и обсуждаются нерешенные проблемы.

3.1. Изменения климата России в модельных расчетах с раздельным учетом влияния антропогенных и естественных внешних воздействий

3.1.1. Используемые данные наблюдений и модельных экспериментов

Материал данного раздела в основном основан на работе (Спорышев, Говоркова, 2013), в которой используются два архива данных наблюдений за температурой приземного воздуха: архив University of Delaware Terrestrial Air Temperature V2.01 (далее по тексту — UD) и архив CRUTEM3v (далее — CRU). Важно отметить, что при осреднении по достаточно большим регионам оба архива дают близкие результаты.

Модельные расчеты представлены тремя ансамблями экспериментов с МОЦАО, участвовавшими в проекте CMIP5. В рамках проекта CMIP5 выполнялись специальные эксперименты по моделированию эволюции климата XIX—XXI веков (1850—2005 гг.) с учетом всех внешних воздействий как естественной, так и антропогенной природы. К антропогенным внешним воздействиям, в частности, относятся наблюдаемые изменения в атмосферной концентрации основных парниковых газов и аэрозолей антропогенного происхождения, а также изменения в землепользовании, а к естественным воздействия — изменения в структуре приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы и изменения в концентрации аэрозолей естественного происхождения, например, связанные с извержениями крупных вулканов. Эти эксперименты в проекте CMIP5 называются Historical. Для ансамбля таких экспериментов используется обозначение Hist. Кроме того, с рядом МОЦАО были выполнены специальные эксперименты, предназначенные для установления причин наблюдаемых климатических изменений, в которых влияние внешних воздействий учитывалось раздельно. Сформировано два ансамбля таких экспериментов: в первом ансамбле все внешние воздействия были фиксированы, кроме изменений в концентрации

основных парниковых газов (ансамбль Hist-GHG), а во втором ансамбле учитывались только внешние воздействия естественной природы (ансамбль Hist-Nat). В работе (Спорышев, Говоркова, 2013) приводятся характеристики 17 МОЦАО, эксперименты с которыми рассматриваются, а также указано, проводились ли с данной моделью эксперименты с раздельным учетом влияния внешних воздействий. Таким образом, ансамбль Hist составляют 17 экспериментов с 17 МОЦАО (по одному эксперименту с каждой моделью), а ансамбли Hist-GHG и Hist-Nat состоят из 9 экспериментов с 9 МОЦАО.

Использованные модели отличались как пространственным разрешением, так и схемами параметризации физических процессов, что в расчетах выразилось в разной чувствительности моделей к внешним воздействиям, а также в разной скорости поглощения тепла Мировым океаном. Кроме того, внешние воздействия отличались между экспериментами с разными моделями за счет того, что не все модели принимали во внимание полный набор внешних воздействий, а также за счет того, что использовались разные алгоритмы расчета их влияния на атмосферную циркуляцию. Несмотря на эти неопределенности, существуют явные различия между модельными ансамблями, и анализ этих различий служит основой для понимания причин наблюдаемых климатических изменений.

3.1.2. Временной ход температурных изменений

Даже при полном учете всех внешних воздействий нельзя ожидать, что модели будут способны воспроизвести межгодовые колебания температуры, поскольку значительный вклад в эти колебания вносит естественная изменчивость, присущая климатической системе Земли, которая воспроизводится в модельных расчетах только статистически. Учесть влияние естественной изменчивости, связанной с долгопериодными колебаниями в системе взаимодействия океан—атмосфера, можно в экспериментах с заданным по данным наблюдений начальным состоянием Мирового океана, которые не рассматриваются в настоящей работе. В

рассматриваемых модельных расчетах источником близости модельных и наблюдаемых изменений является влияние внешних воздействий, которое проявляется как в масштабах десятилетий (например, влияние изменений в газовом составе атмосферы), так и в годовых масштабах (например, влияние аэрозолей антропогенного и естественного происхождения).

На рис. 9 представлен временной ход среднегодовой температуры приземного воздуха в среднем по всей территории России по данным наблюдений и по трем модельным ансамблям. На рисунке показаны две кривые наблюдений, соответствующие двум архивам данных UD и CRU. Различие между ними очень мало, и в дальнейшем при вычислении различных статистических характеристик соответствия наблюдаемых и модельных данных будет использоваться только один архив UD.

Визуально лучше всего модельные расчеты с данными наблюдений согласуются в ансамбле Hist. Основные температурные изменения на территории России начинают происходить с середины XX века.

В ансамбле Hist-GHG повышение температуры в последние десятилетия превышает наблюдаемые значения, а в ансамбле Hist-Nat повышение температуры отсутствует.

При статистическом анализе соответствия модельных расчетов данным наблюдений основное внимание уделялось периоду 1950—2005 гг., поскольку именно в этот период влияние внешних воздействий проявляется достаточно явно, кроме того для этого периода имеется наиболее полная база данных наблюдений.

Для количественной оценки соответствия наблюдаемых и модельных межгодовых колебаний температуры были рассчитаны среднеквадратические отклонения ежегодных значений температуры от среднего для периода 1950—2005 гг. По данным наблюдений эта величина составляет 0,75 °C. В экспериментах Hist она различается между экспериментами и колеблется от 0,57 °C до 0,91 °C, а в среднем по всем экспериментам равна 0,74 °C, что, практически, точно соответствует наблюдениям.

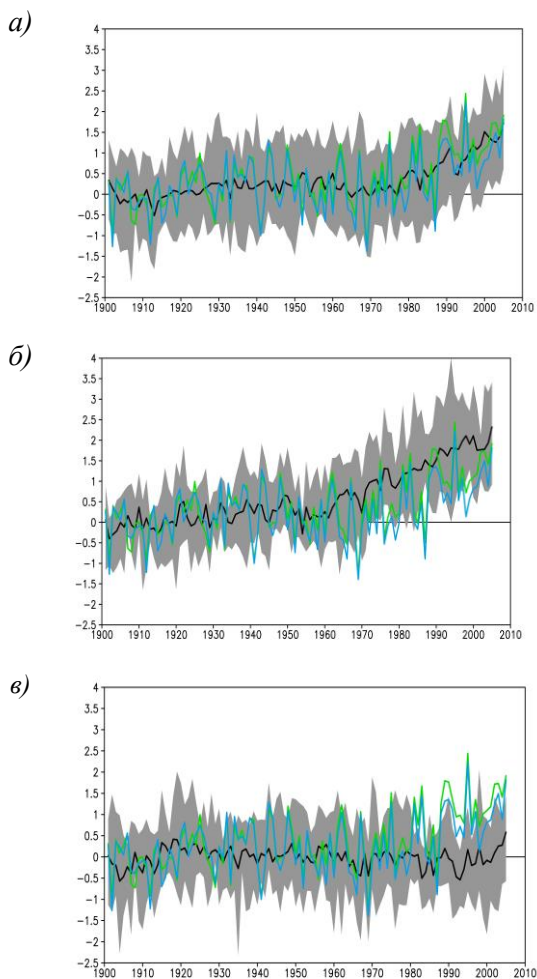


Рис. 9. Аномалии среднегодовой температуры приземного воздуха на территории России по данным наблюдений (зеленая (CRU) и синяя (UD) кривые) и в среднем по ансамблям Hist (*a*), Hist-GHG (*б*) и Hist-Nat (*в*) (черные кривые).

Аномалии рассчитаны по отношению к базовому периоду 1901—1930 гг.
Серым цветом выделен диапазон разброса оценок по модельным ансамблям.

В среднем по ансамблю Hist-GHG среднеквадратические отклонения составили $0,83\text{ }^{\circ}\text{C}$, а по ансамблю Hist-Nat — $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, значение среднеквадратического отклонения в ансамбле Hist-GHG больше, а в ансамбле Hist-Nat меньше, чем по данным наблюдений, что, очевидно, связано со значительным повышением температуры в рассматриваемый период в первом ансамбле и его отсутствием во втором.

Для того чтобы оценить, какая часть межгодовой изменчивости может быть воспроизведена в модельных расчетах, были рассчитаны коэффициенты корреляции наблюдаемой и модельных температур. Для среднегодовой температуры они представлены на рис. 10. Из рис. 9 можно заключить, что существенный вклад в высокие значения корреляций должно вносить присутствие в данных тренда, который в первом приближении можно рассматривать как линейный. В связи с этим для сравнения справа рис. 10 приведены аналогичные коэффициенты корреляции, полученные после удаления линейного тренда из временных рядов.

Рассмотрим подробнее результаты для ансамбля Hist (рис. 10а, 10б). Коэффициенты корреляции сильно различаются между экспериментами и для некоторых моделей статистически незначимы на уровне 5 %. Разброс составляет от 0,11 до 0,57. Ансамблевое осреднение позволяет ослабить влияние естественного шума и усилить сигнал, связанный с внешними воздействиями. Корреляция ансамблевого среднего с данными наблюдений статистически значима и равна 0,54.

Для количественной оценки влияния одной переменной на другую часто используется коэффициент детерминации. Он показывает, какая доля дисперсии первой переменной может быть объяснена с помощью линейной регрессионной модели, в которой предиктором является вторая переменная.

В рассматриваемом случае коэффициент детерминации составляет 0,29, и, таким образом, 29 % дисперсии межгодовых температурных изменений воспроизводится в ансамбле Hist.

После удаления линейного тренда из временных рядов корреляции падают, а для двух моделей становятся даже отрицательными. Коэффициент корреляции с ансамблевым средним также падает до 0,23 и становится статистически незначимым. Однако довольно большая величина этого коэффициента говорит о том, что влияние внешних воздействий на изменения температуры в регионе не является линейным.

В ансамбле Hist-GHG (рис. 10в, 10г) во всех экспериментах корреляции статистически значимы, а для ансамблевого среднего коэффициент корреляции равен 0,49. Однако связь с данными наблюдений в этом ансамбле держится только на трендовой составляющей. Удаление линейного тренда для большинства моделей, практически, обнуляет корреляции, а коэффициент корреляции с ансамблевым средним становится отрицательным. В ансамбле Hist-Nat (рис. 10д, 10е) все корреляции малы, а коэффициент корреляции с ансамблевым средним равен 0,18. Удаление линейного тренда слабо сказывается на величинах коэффициента корреляции.

На территории России влияние внешних воздействий на временную эволюцию температуры происходит на фоне значительной естественной изменчивости, что затрудняет выделение сигнала, связанного с внешними воздействиями. В связи с этим представляется интересным обратить особое внимание на летний сезон, когда влияние естественной изменчивости минимально.

На рис. 11 представлены коэффициенты корреляции температуры приземного воздуха по данным наблюдений и модельных расчетов для лета. Картина статистических связей в этом случае отличается от представленной на рис. 10. В ансамбле Hist в 15 экспериментах из 17 коэффициенты корреляции статистически значимы. Коэффициент корреляции со средним по ансамблю составляет 0,6, и он заметно больше чем для среднегодовой температуры. Таким образом, 36 % дисперсии межгодовых изменений температуры воспроизводится в ансамбле.

Удаление линейного тренда из временных рядов в большинстве экспериментов слабее влияет на корреляцию. Коэффициент корреляции со средним по ансамблю остается статистически значимым и довольно большим (0,51).

В ансамбле Hist-GHG корреляции заметно слабее, и в трех экспериментах коэффициенты корреляции статистически незначимы. Для ансамблевого среднего коэффициент корреляции равен 0,33. Так же, как и в случае среднегодовой температуры, удаление линейного тренда разрушает статистические связи. В ансамбле Hist-Nat коэффициенты корреляции, в целом, больше, а коэффициент корреляции с ансамблевым средним равен 0,27 и статистически значим. Удаление линейного тренда слабо сказывается на значениях коэффициента корреляции.

Таким образом, можно заключить, что основной вклад в наблюдаемое повышение температуры на территории России вносит влияние изменений в концентрации парниковых газов. Однако и естественные внешние воздействия значимо проявляются в межгодовых колебаниях температуры.

Эти воздействия особенно хорошо различимы летом, когда влияние аэрозолей на поток приходящей на поверхность солнечной радиации достигает годового максимума, а собственная (не связанная с внешними воздействиями) межгодовая изменчивость температуры сравнительно мала.

Аналогичный анализ модельного воспроизведения временного хода температурных изменений был выполнен и для ряда крупных регионов России. Выводы, в целом, согласуются. Существенную часть дисперсии межгодовых изменений (от 20 до 40 %) удается воспроизвести в ансамбле Hist, в двух других ансамблях соответствие с наблюдениями заметно хуже. По сезонам максимальные значения коэффициентов корреляции получаются летом на фоне меньшей собственной изменчивости.

3.1.3. Пространственное соответствие расчетных и наблюдаемых изменений

В работе (Спорышев, Говоркова, 2013) для проведения анализа пространственного соответствия было выбрано два климатических временных интервала: «контрольный климат» (1951—1980 гг.) и «изменившийся климат» (1991—2005 гг.). Сравнение наблюдаемых и

средних по модельному ансамблю изменений на территории России показывает их существенное расхождение. Это расхождение особенно заметно при сравнении не среднегодовых, а сезонных изменений. На рис. 12 показаны изменения температуры приземного воздуха на территории России зимой для изменившегося климата по отношению к контрольному.

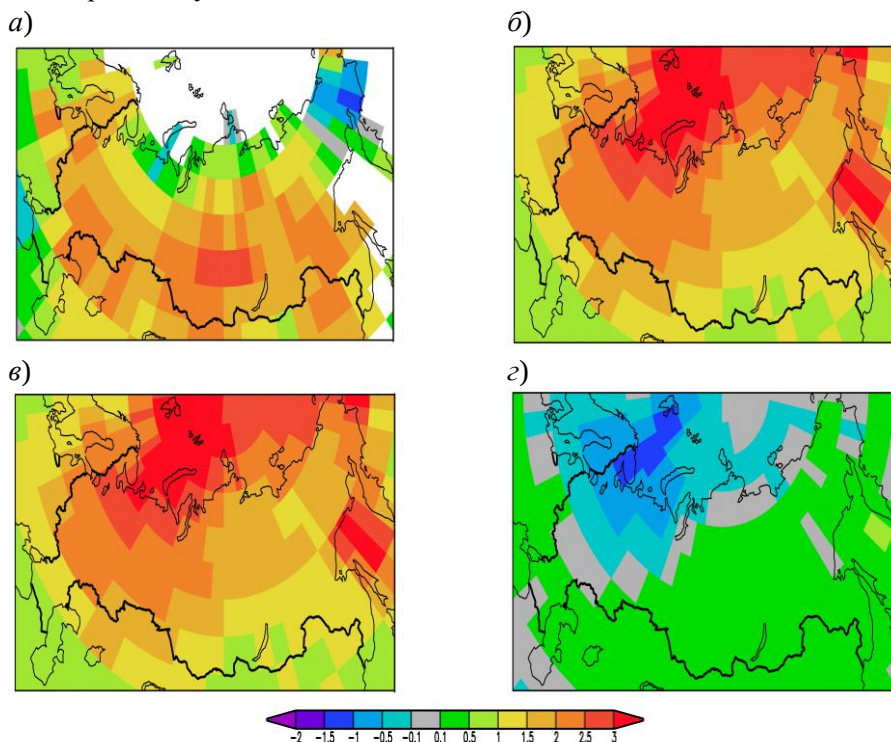


Рис. 12. Изменения температуры приземного воздуха на территории России зимой для «изменившегося климата» (1991—2005 гг.) по отношению к «контрольному климату» (1951—1980 гг.) по данным наблюдений UD (а) и в среднем по трем модельным ансамблям: Hist (б), Hist-GHG (в) и Hist-Nat (з).

В целом, изменения, наиболее близкие по средней величине потепления к наблюдаемым, получены в ансамбле Hist (рис. 12б). В ансамбле Hist-GHG (рис. 12в) потепление заметно больше

наблюдаемого, а в ансамбле Hist-Nat (рис. 12г) потепление отсутствует.

Однако, хотя и наблюдаемые изменения (рис. 12а), и средние по ансамблю Hist показывают близкое потепление в среднем по территории России, при их детальном сравнении видны существенные различия. В модельных расчетах присутствует слабо выраженное полярное усиление потепления, тогда как по данным наблюдений наиболее сильное потепление происходит южнее в средних широтах. В целом, поле модельных изменений гораздо более однородно, чем наблюдаемых, и в нем практически нет областей сильно выраженного потепления, а областей похолодания нет совсем.

В то же время, по данным наблюдений на территории России есть как области особенно сильного потепления (например, европейская территория России или юг центральной Сибири), так и похолодания (например, крайний северо-восток России). Причина таких различий может быть связана как с неадекватностью модельного воспроизведения климатических изменений, так и с тем, что эволюция климатической системы может быть, в принципе, получена в модельных расчетах только в вероятностной форме (Катцов и др., 2008).

Как отмечено в работе (Спорышев и др., 2012), даже при использовании «идеальной» климатической модели, если бы существование такой модели было возможно, нелинейность и стохастичность, присущие климатической системе, а также неполнота информации о ее начальном состоянии и внешних воздействиях на нее, не позволяют рассчитывать на то, что в расчетах будут получены климатические изменения, точно соответствующие наблюдаемым. Две модельные реализации эволюции климатической системы, отличающиеся только начальными условиями, неизбежно будут существенно расходиться. А среднее по модельному ансамблю не будет точно совпадать ни с какой-то одной реализацией, ни с данными наблюдений. Поэтому при анализе пространственного соответствия модельных расчетов данным наблюдений следует ориентироваться не на различия между наблюдениями и ансамблевым средним, а на попадание наблюдаемых изменений в прогнозируемые статистические интервалы, полученные по модельному ансамблю.

В работе (Спорышев, Говоркова, 2013) использовалось дальнейшее развитие вероятностного подхода, предложенного в работе (Спорышев и др., 2012). При этом подходе предполагается, что каждый член модельного ансамбля является равноправным и взаимозаменяемым с любым другим членом ансамбля и с реальной наблюдаемой эволюцией климатической системы. Все данные наблюдений и модельных расчетов были переведены в единую регулярную сетку разрешения 5×5 . В каждой ячейке сетки, расположенной на континентах, анализировались аномалии средней температуры приземного воздуха для изменившегося климата по отношению к контрольному. Отметим, что рассматривались все континенты, за исключением Антарктиды, для которой данных наблюдений недостаточно для проведения такого анализа. Для всех трех рассматриваемых модельных ансамблей были построены 90%-ные «интервалы предсказания» для возможных климатических изменений и проверялось, попадают ли наблюдаемые изменения в эти интервалы. Интервалы предсказания являются для случайных величин аналогом обычных доверительных интервалов, которые по определению строятся только для детерминированных величин. Если задан уровень уверенности α , то при многократной реализации используемой вероятностной модели случайная величина будет с вероятностью α попадать в построенный для нее $(100 \cdot \alpha)\%$ -ный интервал предсказания. Таким образом, если с вероятностной точки зрения наблюдения можно рассматривать как еще один член модельного ансамбля, то примерно в 90 % случаев наблюдаемые изменения будут попадать в 90%-ные интервалы предсказания, построенные по этому ансамблю. И процент точек, в которых наблюдаемые изменения попадают в модельные интервалы, представляет собой численную характеристику соответствия наблюдаемых и модельных изменений. Ячейки регулярной сетки имеют разную площадь, зависящую от географической широты ячейки. И как обычно в метеорологии, естественнее говорить не о проценте точек, а о соответствующей доле площади, что, по сути, не меняет проведенных рассуждений. Проверка попадания

наблюдаемого изменения в модельный интервал предсказания эквивалентна статистическому тесту по оценке значимости отклонения наблюдаемого изменения от ансамблевого среднего. Попадание в 90%-ный интервал означает, что отклонение от ансамблевого среднего не значимо на уровне 10 %.

Результаты статистического анализа показали, что температурные изменения, полученные в ансамбле Hist, хорошо соответствуют наблюдаемым изменениям. Так, для всей территории континентов проценты площади ячеек, в которых наблюдаемые изменения попадают в модельные интервалы, для года, зимы и лета Северного полушария (СП) при ожидаемых 90 % составили, соответственно, 91,5 %, 91,0 % и 89,4 % (таблица 2).

В ансамбле Hist-GHG указанные доли равны, соответственно, 77,8 %, 79,3 % и 78,9 %, а в ансамбле Hist-Nat — 35,7 %, 56,6 % и 51,9 %. Проверка статистической значимости полученных отличий показала, что для ансамбля Hist рассматриваемые отличия не значимы на уровне 5 %, а для двух других ансамблей значимы.

Таблица 2

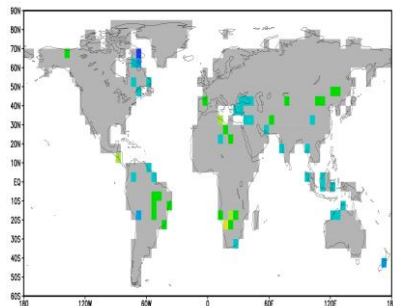
Доля (%) площади регионов, на которой наблюдаемые изменения температуры приземного воздуха для периода 1991—2005 гг. по отношению к периоду 1951—1980 гг. попадают в 90 %-ные интервалы предсказания для них

Регион	Год, сезон	Модельный ансамбль		
		Hist	Hist-GHG	Hist-Nat
Все континенты (кроме Антарктиды)	Год	91,5	77,8	35,7
	Зима	91,0	79,3	56,6
	Лето	89,4	78,9	51,9
Вся территория России	Год	98,8	93,3	26,9
	Зима	90,0	80,0	66,1
	Лето	99,6	98,2	79,1

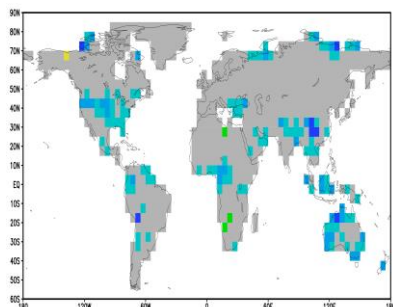
Дополнительную информацию о соответствии наблюдаемых изменений расчетным можно получить из рисунка 13, где для среднегодовой температуры приземного воздуха для трех модельных

ансамблей показаны области, в которых наблюдаемые изменения температуры не отклоняются значимо на уровне 10 % от ансамблевого среднего (окрашены серым цветом), а также области, где эти отклонения значимы. Причем, в случае значимых отклонений указано, насколько наблюдаемые изменения выходят за границы 90%-ных интервалов предсказания.

а)



б)



в)

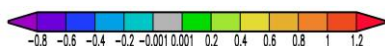
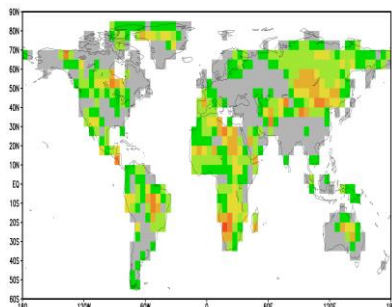


Рис. 13. Области, в которых наблюдаемые изменения среднегодовой температуры приземного воздуха для «изменившегося климата» (1991—2005 гг.) по отношению к «контрольному климату» (1951—1980 гг.) не отклоняются значимо на уровне 10 % от ансамблевого среднего (серый тон), а также области, где эти отклонения значимы для модельных ансамблей Hist (а), Hist-GHG (б) и Hist-Nat (в).

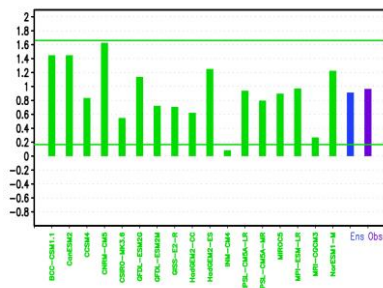
В случае значимых отклонений указано, насколько наблюдаемые изменения выходят за границы 90%-ных интервалов предсказания.

Из рисунка видно, что для ансамбля Hist число точек, в которых наблюдаемые изменения значимо больше или меньше расчетных, примерно равно (рис. 13а). Для двух других ансамблей это не так. Для ансамбля Hist-GHG наблюдаемые изменения в подавляющем большинстве случаев оказываются меньше расчетных, а для ансамбля Hist-Nat — больше. Таким образом, наблюдаемые температурные изменения хорошо соответствуют модельным расчетам, учитывающим все внешние воздействия, и не могут быть объяснены ни только естественными воздействиями, ни только влиянием роста атмосферной концентрации парниковых газов.

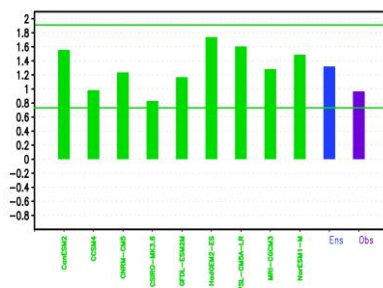
Климатические изменения как наблюдаемые, так и модельные схожи в географически близких регионах, что статистически проявляется в уменьшении числа степеней свободы в используемой нами вероятностной модели. Разнообразие климатических изменений на территории России сравнительно невелико, и при отдельном рассмотрении России число степеней свободы оказывается недостаточным для получения статистически точного соответствия. Однако и в этом случае было получено очевидное расхождение результатов расчетов из ансамбля Hist-Nat с данными наблюдений. Так, для среднегодовой температуры доля площади ячеек, в которых наблюдаемые изменения попадают в модельные интервалы, составили для ансамблей Hist, Hist-GHG и Hist-Nat 98,8 %, 93,3 % и 26,9 % соответственно (см. табл. 2).

Подобный анализ может выполняться и для отдельных крупных регионов. Так на рисунке 14 для трех модельных ансамблей показаны расчетные и наблюдаемые изменения среднегодовой температуры приземного воздуха в среднем по территории России с указанием границ 90%-ных интервалов предсказания для них. Видно очень хорошее соответствие наблюдаемых и расчетных изменений в ансамбле Hist (рис. 14а). Среднее по ансамблю близко к наблюдаемому, и модели примерно поровну делятся на те, в которых изменения больше и меньше наблюдаемых. Наблюдаемое изменение попадает в 90%-ный интервал предсказания и для ансамбля Hist-GHG (рис. 14б).

a)



6)



6)



Рис. 14. Изменения среднегодовой температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в среднем по территории России для периода 1991—2005 гг. по отношению к 1951—1980 гг. для ансамблей Hist (*a*), Hist-GHG (*б*) и Hist-Nat (*в*).

Под каждым столбиком указана соответствующая МОЦАО. Последние два столбика соответствует среднему по ансамблю и наблюдаемому изменениям соответственно. Горизонтальные прямые показывают границы 90%-ных интервалов предсказания.

Таблица 3

Изменения температуры приземного воздуха (°C) для периода 1991—2005 гг. по отношению к 1951—1980 гг.

Регион	Год, сезон	Данные наблюдений	Модельный ансамбль		
			Hist	Hist-GHG	Hist-Nat
Все континенты (кроме Антарктиды)	Год	0,60	0,62 (0,28; 0,96)	0,89 (0,48; 1,30)	−0,01 (−0,29; 0,28)*
	Зима	0,70	0,68 (0,28; 1,07)	0,99 (0,57; 1,42)	0,02 (−0,39; 0,43)*
	Лето	0,52	0,57 (0,25; 0,90)	0,81 (0,40; 1,22)	0,01 (−0,21; 0,22)*
Вся территория России	Год	0,97	0,91 (0,17; 1,66)	1,32 (0,73; 1,91)	−0,01 (−0,64; 0,62)*
	Зима	1,45	1,28 (−0,28; 2,83)	1,81 (0,87; 2,75)	0,07 (−1,29; 1,44)*
	Лето	0,52	0,59 (0,11; 1,08)	0,86 (0,12; 1,60)	0,00 (−0,45; 0,45)*
Европейская территория России	Год	0,80	0,87 (−0,05; 1,78)	1,38 (0,56; 2,19)	−0,00 (−0,75; 0,75)*
	Зима	1,48	1,25 (−0,68; 3,18)	2,16 (0,55; 3,77)	−0,25 (−2,21; 1,71)
	Лето	0,35	0,69 (−0,09; 1,47)	0,88 (0,03; 1,74)	−0,01 (−0,77; 0,75)
Западная Сибирь	Год	1,12	0,93 (0,07; 1,79)	1,27 (0,59; 1,95)	−0,05 (−0,78; 0,67)*
	Зима	1,75	1,26 (−0,74; 3,26)	1,72 (0,48; 2,97)	0,18 (−1,55; 1,92)
	Лето	0,58	0,58 (0,04; 1,11)	0,86 (−0,25; 1,96)	−0,00 (−0,59; 0,58)*

Восточная Сибирь	Год	0,90	0,94 (0,24; 1,63)	1,35 (0,74; 1,95)	0,02 (–0,53; 0,57)*
	Зима	1,04	1,33 (0,04; 2,62)	1,69 (0,80; 2,58)	0,16 (–0,62; 0,93)*
	Лето	0,57	0,54 (0,04; 1,04)	0,85 (0,17; 1,53)	0,01 (–0,51; 0,53)*
Крайний северо-восток России	Год	0,75	1,10 (0,20; 2,01)	1,56 (0,66; 2,47)	0,05 (–0,48; 0,58)*
	Зима	–0,20	1,61 (–0,21; 3,44)	2,14 (0,79; 3,50)*	0,12 (–0,93; 1,18)
	Лето	0,51	0,67 (0,00; 1,34)	0,99 (0,19; 1,80)	0,09 (–0,46; 0,64)
Континенталь- ная Арктика	Год	0,90	1,00 (0,29; 1,70)	1,36 (0,76; 1,97)	–0,01 (–0,61; 0,59)*
	Зима	1,04	1,37 (0,19; 2,55)	1,77 (0,99; 2,56)	0,08 (–0,79; 0,95)*
	Лето	0,52	0,57 (0,09; 1,04)	0,79 (0,02; 1,55)	0,01 (–0,52; 0,54)

Примечания.

1. Регионы со второго по пятый соответствуют работе (Катцов и др., 2008).
2. Крайний северо-восток России включает Магаданскую область, Камчатский край и Чукотский автономный округ. Континентальная Арктика охватывает территорию суши севернее 60° с. ш.
3. Под полученными в модельных ансамблях величинами температурных изменений указаны 90%-ные интервалы предсказания для них. Интервалы отмечены звездочкой (*), если наблюдаемые изменения выходят за их границы.

Однако в этом случае только в одной модели (CSIRO-Mk3.6.0) полученное изменение было меньше наблюдаемого. Результаты по ансамблю Hist-Nat полностью расходятся с данными наблюдений (рис. 14в).

Аналогичный анализ был выполнен и для ряда крупных регионов на территории России. В таблице 3 для семи регионов представлены наблюдаемые изменения температуры по данным архива UD и полученные в модельных расчетах средние по модельным ансамблям изменения, а также границы 90%-ных интервалов предсказания для них.

Результаты, полученные по ансамблю Hist, очень хорошо соответствуют данным наблюдений: во всех случаях наблюдаемые изменения попали в рассчитанные для них интервалы предсказания, а ансамблевые средние оказались в большинстве случаев довольно близкими к данным наблюдений. В ансамбле Hist-GHG наблюдаемые изменения практически во всех случаях попадают в 90%-ные интервалы предсказания для них, однако расхождение средних по ансамблю с наблюдаемыми значениями в большинстве случаев существенно больше. Интервалы предсказания по ансамблю Hist-Nat по большей части не содержат наблюдаемых изменений.

3.2. Установление причин наблюдаемых изменений в интенсивности и частоте возникновения экстремальных температур на территории России методами оптимального обнаружения климатических сигналов

Данные наблюдений показывают изменения региональных экстремальных температур во многих регионах Земного шара, в целом согласующиеся с наблюдаемым потеплением. Так, например, уменьшается число морозных дней в средних широтах Северного полушария, во многих регионах увеличиваются теплые экстремумы, а холодные становятся менее холодными. Практически по всему Земному шару увеличивается частота возникновения необычно теплых сезонных температур, например, таких, которые случаются раз

в 10 лет (Hansen et al., 2012). Для оценки антропогенного вклада в такие изменения используются модельные расчеты с отдельным учетом влияния антропогенных и естественных факторов, которые позволяют получить пространственную структуру сигнала, связанного с антропогенным воздействием, а далее применяются методы оптимального обнаружения сигнала (“optimal fingerprinting” или “optimal detection”), которые позволяют значительно увеличить отношение сигнала к шуму. Обзор современных методов, используемых для установления причин климатических изменений, дан, например, в работе (Hegerl, Zwiers, 2011).

Для территории России подобный анализ затрудняется высокой межгодовой изменчивостью, что значительно усложняет отделение сигнала от шума. Возможно, в связи с этим специально для территории России подобные исследования еще не проводились. В значительном числе работ, анализирующих региональные изменения, используется набор крупных регионов на континентах, предложенный в работе (Giorgi, Francisco, 2000). Один из таких регионов представляет интерес для нашего обзора, поскольку большую его часть составляет территория России. Это регион Северная Азия — NAS (Northern Asia), представляющий собой территорию Азии, попадающую в область (50° с. ш. — 70° с. ш.; 40° в. д. — 180° в. д.). Рассмотрим подробнее, какие результаты получены для этого региона.

В работах (Stott et al., 2011; Christidis et al., 2012) для выделения антропогенного сигнала использовались ансамблевые модельные расчеты с двумя МОЦАО HadGEM1 (Великобритания) и MIROC (Япония). Было выполнено две серии расчетов. В первой серии учитывались антропогенные и естественные внешние воздействия, а во второй — только антропогенные воздействия. Для первой модели каждая серия состояла из 4 расчетов, а для второй — из 10. В работе (Stott et al., 2011) по данным наблюдений за температурой приземного воздуха из архива CRUTEM3v для периода 1909—2008 гг. анализировались изменения в частоте возникновения экстремально теплых сезонов, то есть таких, в которых средняя сезонная температура в регионе превышает 90-ю процентиль для контрольного

периода 1961—1990 гг. Такие температуры возникают в контрольный период с частотой раз в десять лет. Для региона Северная Азия на базе расчетов с каждой моделью было установлено, что антропогенные воздействия вносят значимый вклад в увеличение частоты возникновения экстремально теплых сезонов летом, осенью и зимой. Для весны расчеты с моделью MIROC также показали значимый антропогенный вклад, тогда как расчеты с моделью HadGEM1 — нет. В работе (Christidis et al., 2012) оценивалось антропогенное влияние на возникновение экстремально высоких среднегодовых температур. Анализировался сдвиг распределений среднегодовых температур в модельных расчетах для периода 2000—2009 гг. по отношению к контрольному периоду 1961—1990 гг. Для региона Северная Азия было показано, что антропогенное воздействие более чем в четыре раза увеличило вероятность появления в 2000—2009 гг. года с температурой, превосходящей максимальную за все время с 1900 г.

Антропогенное влияние было также выявлено в изменениях суточных температур. Так в работе (Zwiers et al., 2011) для периода 1951—2000 гг. анализировались изменения минимальных за год минимальных и максимальных за сутки температур (TN_n и TX_n, соответственно), а также изменения максимальных за год минимальных и максимальных за сутки температур (TN_x и TX_x, соответственно). Оценка антропогенного влияния выполнялась на основе расчетов с семью МОЦАО, участвовавшими в проекте CMIP3. Для большинства регионов и, в частности, для региона Северная Азия было выявлено значимое антропогенное влияние в увеличении максимальной за год минимальной за сутки температуры (TN_x, рис. 15).

В работах (Morak et al., 2011; Morak et al., 2013) также рассматривались суточные температуры, анализировались изменения в частоте возникновения экстремальных температур в зимнее (с октября по март для Северного полушария и с апреля по сентябрь для Южного полушария) и летнее полугодия.

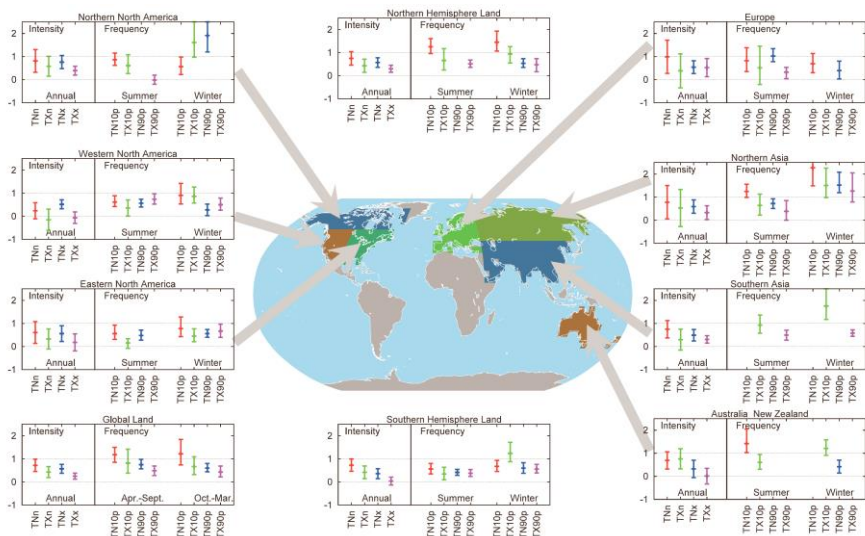


Рис. 15. Выявление изменений в интенсивности и частоте возникновения экстремальных температур (Bindoff et al., 2013).

Левая часть каждого рисунка показывает шкалирующие множители и 90%-доверительные интервалы для них для изменений в интенсивности экстремальных явлений в ответ на внешние воздействия в период 1951—2000 гг. Здесь обозначения TNn и TXn соответствуют минимальным за год минимальным и максимальным за сутки температурам, а TNx и TXx — максимальным за год минимальным и максимальным за сутки температурам; оценки основаны на модельных расчетах, учитывающих антропогенные и естественные внешние воздействия (Zwiers et al., 2011). Правая часть каждого рисунка показывает шкалирующие множители и 90%-доверительные интервалы для них для изменений в частоте возникновения экстремальных температур в зимнее (с октября по март для Северного полушария и с апреля по сентябрь для Южного полушария) и летнее полугодия. Здесь TN10p и TX10p соответствуют частоте, с которой минимальные и максимальные за сутки температуры оказываются ниже их 10-й процентиля, вычисленной для базового периода 1961—1990, TN90p и TX90p — частоте, с которой минимальные и максимальные за сутки температуры оказываются выше их 90-й процентиля, вычисленной для базового периода 1961—1990 (Morak et al., 2013). Оценки основаны на расчетах с МОЦАО HadGEM1 при учете антропогенных и естественных внешних воздействий. Наличие сигнала установлено на уровне значимости 0,05, если 90%-доверительный интервал для шкалирующего множителя находится целиком выше нулевой линии. Серым цветом отмечены области, где данных наблюдений недостаточно для выполнения оценок.

Точнее для периода 1951—2003 гг. анализировались изменения TN10p и TX10p — частоты, с которой, соответственно, минимальные и максимальные за сутки температуры оказываются ниже их 10-й процентиля, вычисленной для базового периода 1961—1990 гг., а также TN90p и TX90p — частоты, с которой, соответственно, минимальные и максимальные за сутки температуры оказываются выше их 90-й процентиля, вычисленной для базового периода.

Оценка вклада внешних воздействий выполнялась на основе четырех расчетов с МОЦАО HadGEM1 с учетом антропогенных и естественных внешних воздействий. Для региона Северная Азия было выявлено значимое влияние внешних воздействий в изменениях всех индексов в зимнее и летнее полугодия за исключением индекса TX90p летом (рис. 15).

3.3. Выявление антропогенного вклада в возникновение аномальных климатических явлений на территории России на примере лета 2010 г.

Поскольку многие из последствий изменения климата проявляются через экстремальные погодные условия, растет интерес к количественной оценке роли человека и других внешних воздействий на конкретно наблюдавшиеся экстремальные климатические явления. Особый интерес представляет рекордная погодная аномалия на Европейской территории России летом 2010 г. Следствиями этой аномалии были: экстремальная жара, жесточайшая за последние 120 лет засуха и лесные пожары, приведшие к огромным человеческим и экономическим потерям (Фролов, Страшная, 2011; Мещерская и др., 2011).

Исследованиями, выполненными в России и за рубежом, установлено, что непосредственной причиной аномалии явилось необыкновенно длительное блокирование западного переноса в атмосфере вследствие естественной изменчивости атмосферы и, в частности, нелинейной неустойчивости волн Россби (Шакина, 2011; Шакина и др., 2011; Dole et al., 2011; Barriopedro et al., 2011).

Отмечается также вероятная возможность повышения риска подобных аномалий под влиянием климатических изменений, связанных с антропогенным воздействием (Мохов, 2011; Груза, Ранькова, 2011; Rahmstorf, Connou, 2011). По мнению Володина (2011) весомый вклад в формирование экстремальной аномалии температуры воздуха 2010 г. внесла почвенная засуха, образовавшаяся месяцем раньше на пути переноса воздушных масс (Володин, 2011).

Следует признать, что по вопросу о том, в какой степени это событие связано с антропогенным изменением климата, высказывались различные позиции. Авторы эмпирического исследования (Rahmstorf, Connou, 2011) пришли к выводу, что с вероятностью 80 % рекорд июля 2010 г. не был бы достигнут без наблюдавшегося тренда крупномасштабного потепления климата. Авторы другой работы (Dole et al., 2011) на основе численного моделирования заключили, что блокирующий антициклон, ставший главным виновником аномалии, возник вследствие внутренней изменчивости атмосферы, а такие факторы как увеличение концентрации парниковых газов, изменение ледового покрова в Арктике и аномалии температуры поверхности океана не оказали решающего влияния на его формирование. Однако было отмечено также, что изменение климата в ближайшие десятилетия может привести к увеличению вероятности возникновения подобных аномально жарких погодных условий на территории Европейской части России.

Более глубокий анализ выполнен в работе (Otto et al., 2012). По результатам большой серии ансамблевых модельных экспериментов с использованием глобальной модели циркуляции атмосферы HadAM3P авторы оценили вероятностные распределения июльской температуры воздуха на западе России, соответствующие десятилетиям 1960—1969 и 2000—2009 гг. При этом было показано, что изменения величины аномалии, подобной наблюдавшейся в 2010 г., по сравнению с самой аномалией (примерно 6°) при фиксированной повторяемости относительно невелики (примерно 1,5°). На рис. 16 они показаны красной вертикальной стрелкой. Поэтому с позиции оценки величины

наблюдавшаяся аномалия может быть объяснена изменчивостью климатической системы. Более очевидным является изменение в частоте (или времени возврата) условий, подобных аномалии 2010 г. По оценкам авторов эта частота увеличилась за 40 лет приблизительно в 3 раза (см. горизонтальную красную стрелку на рис. 16).

Таким образом, общий вывод выполненных исследований состоит в том, что возникновение экстремальных условий генерируется внутренней изменчивостью, однако внешние воздействия на климатическую систему и общее потепление увеличивают вероятность их возникновения в будущем.

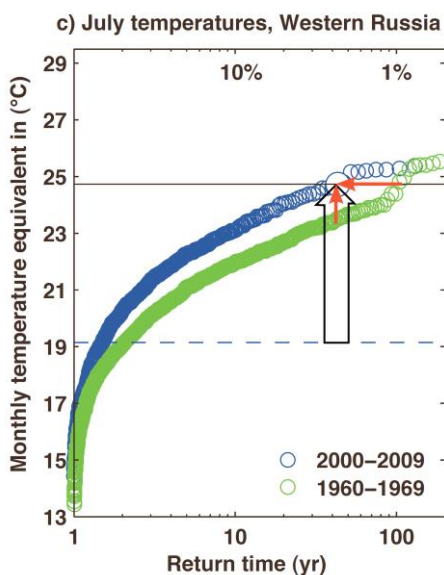


Рис. 16. Температура в июле в западной части территории России (месячная эквивалентная температура в °C) (Otto et al., 2012; Bindoff et al., 2013). Результаты оценки периодов возврата аналогов аномалии температура—геопотенциал в июле 2010 г. по данным ансамблевых моделирований за два десятилетия 1960—1969 (зеленый цвет) и 2000—2009 гг. (синий цвет). Вертикальная черная стрелка показывает разность между средним уровнем температуры 1960—1969 гг. (синий пунктир) и уровнем температуры 2010 г. (черная линия). Вертикальная красная стрелка показывает изменение температуры за счет сдвига распределения, а горизонтальная красная стрелка — изменение в частоте аномалий, аналогичных 2010 г.

4. Влияние неантропогенных факторов на современный климат

Введение

Изменения климата происходят в результате собственных колебаний климатической системы и внешних воздействий естественного и антропогенного происхождения. В числе внешних естественных воздействий (на временных масштабах до столетий) в первую очередь обычно рассматриваются изменения потока солнечной радиации и вулканическая активность.

Изменения потока солнечной радиации в результате изменения положения Солнца и Земли вызывает периодические изменения в радиационном воздействии, однако этот фактор играет роль только на временных масштабах в десятки и сотни тысяч лет и более. Кроме того, определенное влияние оказывают колебания солнечной активности (СА) в так называемых циклах, из которых наиболее известен 11-летний цикл. Эти колебания сопровождаются относительно небольшими изменениями общего потока солнечной радиации на временных масштабах от десятилетий до столетий и более.

Вулканическая активность носит эпизодический характер, но может иметь драматические последствия и достаточно быстро влиять на климат. Воздействие астероидов случается крайне редко, однако считается, что они играли важную роль в истории Земли.

Согласно заключению МГЭИК (Stocker et al., 2013) антропогенное воздействие является основной причиной современного потепления климата. На долю неантропогенных факторов приходится не более 10 % наблюдаемого потепления. Вместе с тем принято считать, что потепления климата в 1910—1940-х годах было вызвано естественными причинами.

4.1. Солнечная радиация

Новые измерения солнечной постоянной⁶ (СП) дают величину потока, равную $1360,8 \pm 0,5 \text{ Вт/м}^2$ в течение 2008 года (Kopp and Lean, 2011), что на 4.46 Вт/м^2 меньше по сравнению с величиной, полученной ранее в обсерватории Давос. Меньшая величина потока рассматривается как наиболее достоверная в настоящее время. Расчеты показывают, что изменение потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы на десятые доли процента в моделях общей циркуляции атмосферы дает незначительный эффект при моделировании климата, поскольку существуют большие неопределенности в описании оптических свойств облаков, которые могут оказывать большее влияние на радиационный баланс атмосферы.

По данным наблюдений годовые вариации полного потока солнечной радиации между максимумом и минимумом в 11-летнем солнечном цикле составляют примерно $1,0 \text{ Вт/м}^2$. В работе (Scafetta and Willson, 2009) утверждается, что тренд СП по данным последовательных измерений на разных спутниках между минимумами 1986 и 1996 гг. составлял $0,033\text{—}0,037 \%$, что, по их мнению, может давать заметный вклад в потепление.

Недавно на основе данных измерений на спутнике появилось предположение о возможном влиянии нестабильности спектрального состава солнечного излучения (Harder et al., 2009). Оказалось, что уменьшение излучения в коротковолновой части спектра в 2004—2007 гг. компенсировалось его ростом в длинноволновой части. Однако Lean et al. (2012) считают, что этот эффект может быть вызван дрейфом чувствительности прибора, а не изменениями в спектре излучения.

Приведенные примеры показывают, что существуют расхождения в оценках современных изменений СП и ее изменений, основанных на

⁶ Солнечная постоянная — суммарный поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению лучей и находящуюся вне земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца.

инструментальных наблюдениях на спутниках. Очевидно, что точность восстановления прошлых значений СП на основе косвенных показателей СА не может быть выше. Еще большая неопределенность существует относительно будущих изменений потока солнечной радиации на границе атмосферы. Если ожидаемое уменьшение солнечной активности будет происходить, то существует вероятность, что уменьшение потока на границе атмосферы отчасти компенсирует прогнозируемый рост радиационного воздействия, вызванный ростом парниковых газов в глобальной атмосфере (Jones et al., 2012).

Согласно новым оценкам, приведенным в (Stocker et al., 2013) за период с 1750 года по настоящее время радиационное воздействие на верхней границе атмосферы изменилось на $0,05 \text{ Вт/м}^2$ в диапазоне разброса $0,00—0,10 \text{ Вт/м}^2$. По сравнению с антропогенным воздействием, равным $2,29 \text{ Вт/м}^2$, солнечное воздействие составило лишь 2 %.

Как известно, самое большое уменьшение потока солнечной радиации наблюдалось в период Минимума Маундера во второй половине XVII столетия и продолжалось примерно 50 лет. Число пятен на Солнце тогда сократилось с десятков тысяч до нескольких десятков. Предполагается, что уменьшение потока приходящей на верхнюю границу солнечной радиации способствовало похолоданию климата во время так называемого Малого ледникового периода. Поскольку можно лишь косвенным путем установить примерное число солнечных пятен в тот период, представляется сложным определить, насколько количественно изменился поток приходящей солнечной радиации на границу атмосферы. В ряде исследований, основанных на использовании моделей климата разной степени сложности, принималось, что это уменьшение потока могло быть в диапазоне $0,01—0,25 \text{ %}$. Расчеты показали, что уменьшение глобальной температуры воздуха у поверхности Земли составило при этом несколько десятых градуса (Meehl et al., 2013).

Поскольку причины уменьшения активности Солнца в прошлом неизвестны, можно предположить, что в любое время в будущем может снова возникнуть аналогичное уменьшение активности Солнца,

и тем самым изменится поток приходящей солнечной радиации. Если это случится, то интересно оценить, насколько возможное неожиданное глобальное похолодание может компенсировать антропогенное потепление, вызванное ростом парниковых газов в атмосфере. Чтобы ответить на этот вопрос, использовалась совместная модель океан—атмосфера, имеющая высокое разрешение в стратосфере, в которой учитывались фотохимические процессы образования/разрушения озона в стратосфере и спектральная зависимость поглощения солнечной радиации (Meehl et al., 2013). В этом исследовании задавалось значение потока солнечной радиации на 0,25 % меньшим по сравнению с современным измеряемым минимумом, полагая при этом, что такое значение было наиболее вероятным в период Минимума Маундера. В расчеты также включался 11-летний солнечный цикл, повторяющий последние наблюдаемые 4 цикла (для периодов 2009—2052 гг. и 2053—2096 гг.). Большой солнечный минимум получен как среднее из минимальных значений потоков в 1975, 1986 и 1996 гг., уменьшенное на 0,25 %. В результате ультрафиолетовый диапазон уменьшился на 8 %. Интенсивность солнечного излучения понижалась в течение 5 лет (2020—2024 гг.) до минимального значения и затем быстро возрастала через 40 лет (2065—2070 гг.) до первоначальной величины перед окончанием эксперимента в 2080 гг. Период такой длительности существовал в течение Минимума Маундера, когда наблюдалось лишь несколько солнечных пятен. Выполнено три эксперимента, которые затем сравнивались с расчетами, проведенными по сценарию RCP4.5.

Результаты анализа показали, что солнечный минимум, аналогичный минимуму Маундера, в середине XXI века может замедлить глобальное антропогенное потепление и уменьшить рост приземной температуры на несколько десятых градуса (0,24—0,26 °C). Этот вывод подтверждается в ранее полученных работах с более простыми моделями климата.

Однако с ростом потока солнечной радиации до первоначальной величины, глобальная температура воздуха восстанавливается до значения, полученного в эксперименте по сценарию RCP4.5. Другими

словами, понижение потока солнечной радиации до величины, наблюдавшейся в период Минимума Маундера, лишь замедлит, но не остановит глобальное антропогенное потепление климата.

В работе (Anet et al., 2013) исследовалось влияние уменьшения солнечной активности по типу минимума Дальтона на эволюцию климата и озоновый слой в XXI веке. Этот второй по интенсивности минимум (после Минимума Маундера) за последние 400 лет наблюдался в 1790—1820 гг. Проведены три серии ансамблевых экспериментов с помощью модели атмосфера—океан—фотохимия АОСМ СОСOL3-MPIOM с учетом сценария RCP4.5. В одной серии солнечная активность отсутствовала, в двух других она была пониженной при разной интенсивности радиационного воздействия. Показано, что уменьшение потока солнечной радиации не предотвратит продолжающееся антропогенное потепление. Рассчитанная температура за 20 лет в конце XXI века может понизиться, в зависимости от принятых гипотез в сценариях, до 0,3 °C по сравнению со сценарием неизменности солнечной постоянной. Поскольку продолжительность минимума, принятая в данной работе бóльшая, чем в работе (Meehl et al., 2013), расчетное ослабление глобального потепления получилось также несколько бóльшим. Вместе с тем это не умаляет того факта, что основное потепление связано с антропогенной эмиссией, и минимум Дальтона может в лучшем случае вызвать временное уменьшение потепления.

В большинстве исследований влияние СА на климат оценивалось на временных масштабах 11 лет и более. В частности, обнаружено влияние на изменения температуры верхнего слоя океана с масштабом 11 и 70—80 лет при запаздывании в 1—2 года (Gray et al., 2010). Оценки временных масштабов изменений СА, в наибольшей степени влияющих на климат, различаются у разных авторов. Cubbish et al., (2006) считают, что отклик климатической системы на относительно короткие вариации солнечного воздействия больше, чем на длительные. Lovejoy and Schertzer (2012) подтверждают уменьшение этого влияния с увеличением временного масштаба, отмечая при этом, что большинство палеорекоonstrukций указывают на усиление с

ростом масштаба колебаний СА. Love et al. (2011) рассматривают как одно из возможных предположение, что влияние солнечно-земного взаимодействия на современные изменения климата проявляется в долговременных трендах.

Помимо статистического анализа связи между изменениями СА и колебаниями характеристик климата, главным образом, температуры, были выполнены эксперименты с глобальными моделями климата с дополнительным форсингом от вариаций СА. Ammann et al. (2007) использовали глобальную модель климата NCAR в серии экспериментов с изменением солнечной активности за последнее тысячелетие, полученным на основе анализа ледяных кернов в Антарктиде. В результате расчетов показано, что при максимальном изменении солнечной постоянной $< 2 \text{ Вт/м}^2$ изменения температуры могут составить $0,1\text{—}0,15 \text{ }^\circ\text{C}$, максимум на $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ при высокой чувствительности модели. Расчеты также показывает максимум потепления на $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ в 1950-е годы, которое затем уменьшается под влиянием усиления вулканической активности. Без учета антропогенного воздействия модель не воспроизводит потепления в конце XX столетия.

В работе Seidenglanz et al. (2012) оценивалась реакция климата на два цикла СА — 90-летнего цикла Глейссберга и 200-летнего цикла де Ври с заданными амплитудами СП в 1 Вт/м^2 с помощью глобальной модели климата. Изучалась реакция глубинных слоев океана на изменения СП. Были найдены когерентности между изменениями СП в каждом из циклов и потенциальной температуры на разных глубинах с запаздываниями до 50 лет для 90-летнего цикла и до 180 лет для 200-летнего цикла в зависимости от региона земного шара.

Jones et al. (2012) исследовали возможное влияния СА на ПТВ в XXI столетии. Для этой цели использовалась энергобалансовая модель, реконструированные данные по СА и проводились сравнения с результатами, полученными по глобальной модели HadCM3. Найдено, что похолодание в результате снижения СА может быть около $0,06\text{—}0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, что составляет малую долю ожидаемого потепления к 2100 году.

Swingedouw et al. (2011) оценивали реакцию модельного климата на изменения СА в последнее тысячелетие, полученные по данным реконструкций. Установлено, что колебания средней ПТВ Северного полушария коррелируют (0,74) с колебаниями СА за 1001—1860 гг. Более того, обнаружено влияние СА на Северо-Атлантическое колебание с запаздыванием в 40 лет в результате смещения зоны тропической конвекции в Тихом океане. Атлантическая мериодическая циркуляция океана в Сев. Атлантике ослабевает при усилении влияния СА.

Из приведенного выше краткого обзора следует, что в последние годы получены интересные результаты по изучению влияния солнечной активности на глобальный климат с помощью физически содержательных моделей атмосфера—океан—криосфера. Вместе с тем необходимо отметить, что интерпретация модельной реакции климата на изменение потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы затрудняется рядом причин. Во-первых, реакция модельного климата зависит от учитываемых обратных связей в конкретной модели и может существенно отличаться в разных моделях. Во-вторых, обнаружение возможной реакции климата на сравнительно слабый сигнал, хотя и действующий в течение продолжительного времени, затрудняется естественной изменчивостью в системе атмосфера—океан—криосфера, имеющей большие временные масштабы релаксации. Чтобы получить достоверную реакцию климатической системы на внешнее воздействие, необходимо проводить мультимодельные расчеты. Другими словами, большинство указанных выше модельных результатов требует подтверждения выводов с помощью расчетов с другими независимыми моделями.

4.2. Вулканическое радиационное воздействие

Извержение вулканов, в результате которых в атмосферу выбрасывается значительное количество SO_2 , является основной естественной причиной изменения климата на временных масштабах

от года до нескольких десятилетий. Хотя вулканические извержения выбрасывают в атмосферу минеральные частицы (пепел) и сульфатный аэрозоль, именно последний вследствие длительного существования в атмосфере и эффективного рассеяния солнечного света может оказывать сильное влияние на радиационный перенос и соответственно климат.

При извержении вулканов выбросы CO_2 в атмосферу оказываются, по крайней мере, в 100 раз меньшими, чем антропогенные. Чтобы оказать значительное влияние на климат, сульфатный аэрозоль должен попасть в стратосферу, где время его жизни намного больше, чем в тропосфере. Так, в тропиках время жизни стратосферного аэрозоля может быть около года.

Исследованиям влияния вулканических извержений на климат уделяется большое внимание. Исследования проводятся как по эмпирическим данным, так и с помощью глобальных моделей климата.

Во второй половине XX века основными извержениями вулканов, повлиявшими на межгодовые колебания глобальной приземной температуры, были извержения вулканов Агунг, Эль-Чичон и Пинатубо. В начале XXI века наблюдалось несколько небольших извержений вулканов, которые оказывали влияние на концентрацию стратосферного аэрозоля, но радиационное воздействие этого аэрозоля на климат было очень малым. Так, в результате двух недавних извержений в высоких широтах (вулкан Казаточи в августе 2008 г. и Саричев в июне 2009 г.), каждый из которых выбросил примерно 1,5 млн тонн SO_2 в стратосферу, заметной реакции климатической системы на эти извержения не было установлено. Вместе с тем такие извержения позволили лучше изучить зависимость климатической реакции от количества выброшенного аэрозоля и времени года, когда он выброшен (Haywood et al., 2010; Kravitz et al., 2011). Радиационное воздействие при извержениях в высоких широтах зависит от потока солнечной радиации и времени жизни вулканического аэрозоля. В работе Kravitz and Robock (2011) показано, что при извержениях в высоких широтах должно быть

выброшено не меньше 5 млн тонн SO_2 в нижнюю стратосферу весной или летом и намного больше зимой, чтобы обнаружить реакцию климата.

Stenchikov et al. (2006) исследовали с помощью семи глобальных моделей климата реакцию атмосферы на вулканические извержения в 1980—1999 гг. Было установлено понижение температуры воздуха непосредственно после извержения и усиление в последующую зиму Арктической осцилляции (АО) в средних широтах, которое приводило к повышению температуры. Модели согласованно воспроизводили потепление, но расходились в расчетах усиления АО, которое получалось слабее по сравнению с данными наблюдений.

Из недавних публикаций заслуживает внимание работа Miller et al. (2012), в которой рассматривался 8000-летний ряд следов извержений, реконструированный по данным ледяных кернов из ледников канадской Арктики. Установлено, что внезапное ускорение роста ледников в 1430—1455 гг. произошло после крупных извержений вулканов, которое сопровождалось похолоданиями летом и сокращением таяния льда, что действовало как обратная связь, сохраняющая тенденцию к понижению температуры воздуха.

Извержение вулканов представляет собой естественный эксперимент по оценке влияния стратосферного аэрозоля на климат. Так, Trenberth and Dai (2007) показали, что азиатский и африканский летние муссоны и глобальный гидрологический цикл был более слабым в следующем году после извержения Пинатубо в 1991 году. Эти наблюдения согласуются с данными климатического моделирования. Поскольку реакция гидрологического цикла в климатической системе оказывается очень быстрой, последствия, связанные с извержением вулканов, могут продолжаться около года.

Можно ли предсказать будущие значимые для климата извержения вулканов? Согласно некоторым историческим данным существует примерно 80-ти летняя периодичность извержения вулканов, однако период наблюдений является коротким и недостаточно надежным. Имеющиеся данные показывают, что 1912—1963 гг. был необычно спокойным за последние 500 лет, а

период 1250—1300 гг. отмечен как климатически значимый за предшествующие 1500 лет. Современный уровень знаний позволяет делать прогнозы периодов вулканической активности на основании статистического анализа, полагая, что распределения в недавнем прошлом являлись стационарными.

4.3. Влияние собственной изменчивости в океане

Океаническое влияние на изменения климата наиболее заметно в высоких и умеренных широтах Северного полушария, особенно в Арктике, на масштабах от сезона до десятилетий. В то же время основной инструмент прогноза будущего климата — глобальные модели циркуляции атмосферы и океана — неудовлетворительно воспроизводят естественные колебания океанической циркуляции. Следствием такого положения остается нерешенная проблема прогноза естественных изменений климата на период нескольких десятилетий, несмотря на имеющиеся расчеты эволюции климата на более длительные сроки по глобальным моделям при заданном сценарии радиационного воздействия. Основная причина состоит в сложности прогноза естественных колебаний климата, значительная часть которых связана с океаном, и отсутствия необходимых глобальных данных наблюдений о состоянии океана и климатической системы в целом.

Далека от решения проблема учета влияния экваториальных и тропических областей океана, куда поступает большая часть солнечного тепла и формируются эпизоды Эль-Ниньо, аномально теплые режимы, 60—70-летние колебания в Северной Атлантике (Атлантическая междесятилетняя осцилляция (АМО)) и Тихоокеанская десятилетняя осцилляция (ТДО).

Теплосодержание океана возрастало в последние десятилетия наиболее устойчиво в низких широтах. По оценке Rhein et al. (2013) на долю океана приходится 93 % энергии, накопленной климатической системой за период 1971—2010 гг. При этом основная часть потепления приходится на низкие широты Северного полушария

(Palmer et al., 2007). В работе Wang et al. (2008) показано, что аномальный прогрев океана в тропической Атлантике может вызвать изменения в переносе тепла и неустойчивость в атмосфере.

Неравномерное глобальное потепление, проявляющееся на междесятилетних масштабах, связано с внутренней изменчивостью в океане, на что указывают расчеты с моделью атмосферы, в которых задавались многолетние наблюдаемые колебания в Атлантическом океане. Модель атмосферы воспроизвела междесятилетние колебания температуры воздуха Северного полушария, подобные по фазе и амплитуде наблюдаемым с исключенным трендом (Zhang et al., 2007).

В работе (Kravtsov and Spannagle, 2008) междесятилетние колебания глобальной ПТВ определены как разность наблюдаемых изменений и средней по ансамблю моделей CMIP3 температуры, которая не содержит междесятилетних колебаний. Выделенный сигнал напоминает атлантическую междесятилетнюю осцилляцию (АМО), по-видимому, связанную с внутренней динамикой океанической термохалинной циркуляции. Имеются основания предполагать, что АМО влияет на полувековой тренд в глобальной ПТВ через прямой региональный вклад в ее изменения.

Относительно изменений океанической и атмосферной составляющих в меридиональном переносе тепла Held (2001) на основе моделирования показал, что обе составляющие изменяются когерентно и с одинаковым знаком. С другой стороны, Bjerknes (1964) полагал, что поток на верхней границе атмосферы меняется мало и поэтому изменения переноса в атмосфере и океане должны компенсировать друг друга, т. е. иметь противоположные знаки.

Проверка этого положения на модельных расчетах (Van Der Swaluw et al., 2007) показала его справедливость на междесятилетних масштабах, в то время как на межгодовых масштабах изменений компенсации не происходит: изменчивость потока на верхней границе атмосферы велика. Компенсация хорошо выражена в высоких широтах в районе Гренландского, Исландского и Норвежского морей (Северо-Европейский бассейн), где усиление океанического притока ведет к повышению ТПО, уменьшению температурного градиента и,

как следствие, к ослаблению вихревого переноса атмосферой. В области 40—60° с. ш. атмосфера опережает (воздействует на) океан, в высоких широтах 60—80° с. ш. океан воздействует на атмосферу. Максимум этого воздействия приходится на 70° с. ш., при этом океан опережает атмосферу на 1 год.

Исследования возможной быстрой перестройки в атлантической термохалинной циркуляции, выполненные на глобальной модели климата HadCM3, показали (Hawkins and Sutton, 2008), что этому предшествуют быстрые изменения температуры и солёности поверхностного слоя в Северных морях и поступления плотных вод через Датский пролив с опережением примерно на 10 лет.

Наряду с признанием важной роли океана в формировании изменений климата отмечается, что неопределенность, вносимая накоплением тепла в океане, меньше чем вносимая неадекватным описанием обратных связей в атмосфере (Knutti and Tomassini, 2008). Оценивая роль внутренней изменчивости и внешнего воздействия в изменениях климата по результатам расчетов на глобальных моделях, авторы работы (Sedláček and Knutti, 2012) пришли к выводу, что потепление в XX столетии вызвано, главным образом, внешними причинами.

В настоящее время в научной литературе активно обсуждается наблюдаемая в последние полтора десятилетия «приостановка» глобального потепления: наблюдаемый тренд средней глобальной температуры оказался меньшим, чем средний тренд, полученный в моделях CMIP3, использованных в Четвертом оценочном докладе МГЭИК. Как показано в (Hawkins and Sutton, 2009), тренды в наблюдениях за короткие периоды (десятилетия) могут быть в большей степени обусловлены собственной изменчивостью климатической системы, в значительной мере определяемой естественными колебаниями океана, чем внешним воздействием. Это же свойственно и модельным расчетам (Easterling and Wehner, 2009).

Согласно Пятому оценочному докладу МГЭИК (Stocker et al., 2013), наблюдаемое в 1998—2012 гг. ослабление тренда повышения приземной температуры по сравнению с периодом 1951—2012 гг.

приблизительно в равной мере обусловлено ослаблением тренда радиационного воздействия и охлаждением в силу естественной внутренней изменчивости, включая возможное перераспределение тепла в океане.

Работа выполнена при поддержке ЦНТП Росгидромета и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 12-05-01069-а, 14-05-00603-а, 14-05-00753-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андропова Н. Г., Бабанова В. В., Кароль И. Л., Киселев А. А., Кудрявцев А. П., Морозова И. А., Розанов Е. В., Фролькис В. А. (1986). Радиационно-фотохимические модели атмосферы. / Под ред. И. Л. Кароля. — Л.: Гидрометеиздат. 192 с.

БСЭ (1971). Большая советская энциклопедия. / Гл. ред. А. М. Прохоров. Изд. 3. Т. 6. Газлифт—Гоголево. — М.: Советская энциклопедия. 624 с.

БСЭ (1976). Большая советская энциклопедия. / Гл. ред. А. М. Прохоров. Изд. 3. Т. 25. Струнино—Тихорецк. — М.: Советская энциклопедия. 600 с.

Борзенкова И. И., Будыко М. И., Бютнер Э. К., Величко А. А., Винников К. Я., Голицын Г. С., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Кобак К. И., Кузьмин И. И., Легасов В. А., Менжулин Г. В. (1987). Антропогенные изменения климата. / Под ред. М. И. Будыко, Ю. А. Израэля. — Л.: Гидрометеиздат. 406 с.

Будыко М. И. (1968). О происхождении ледниковых эпох // Метеорология и гидрология. № 11. С. 3—12.

Будыко М. И. (1972). Влияние человека на климат. — Л.: Гидрометеиздат. 47 с.

Будыко М. И. (1974). Изменения климата. — Л.: Гидрометеиздат. 280 с.

Будыко М. И. (1977а). Исследование современных изменений климата // Метеорология и гидрология. № 10. С. 3—10.

Будыко М. И. (1977б). Современное изменение климата. — Л.: Гидрометеиздат. 47 с.

Будыко М. И. (1979). Полуэмпирическая модель термического режима атмосферы и реальный климат // Метеорология и гидрология. № 4. С. 5—17.

Будыко М. И. (1980). Климат в прошлом и будущем. — Л.: Гидрометеиздат. 352 с.

Будыко М. И., Винников К. Я., Дроздов О. А., Ефимова Н. А. (1978). Предстоящие изменения климата // Изв. АН СССР. Серия геогр. № 6. С. 5—20.

Будыко М. И., Ронов А. Б., Янишин А. Л. (1985). История атмосферы. — Гидрометеиздат. 209 с.

Винников К. Я., Гройсман П. Я. (1981). Эмпирический анализ влияния CO_2 на современные изменения средней годовой приземной температуры воздуха северного полушария // Метеорология и гидрология. № 11. С. 30—43.

Винников К. Я., Гройсман П. Я. (1982). Эмпирическое исследование чувствительности климата // Изв. АН СССР. ФАО. Т. 18. № 11. С. 1159—1169.

Володин Е. М. (2011). О природе некоторых сверх-экстремальных аномалий летней температуры. / В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. / Под ред. Н. П. Шакиной. — М.: Триада-ЛТД. С. 48—57.

Груза Г. В. и Ранькова Э. Я. (2003). Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 39. № 2. С. 1—20.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. (2011). Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на Европейской территории РФ // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 47. № 6. С. 717—721.

Дымников В. П., Галин В. Я., Перов В. Л. (1980). Исследование чувствительности климата к удвоению CO_2 с помощью зонально-осредненной модели общей циркуляции атмосферы. / В кн.: Математические модели атмосферных движений (математическое моделирование динамики атмосферы и океана). 2 часть. Сборник научных трудов ВЦ СО АН СССР / Под ред. Г. И. Марчука. — Новосибирск. ВЦ СО АН СССР. С. 39—59.

Кароль И. Л. (1977). Изменение глобального содержания стратосферных аэрозолей и их связь с колебаниями средней прямой солнечной радиации и температуры у поверхности Земли // Метеорология и гидрология. № 3. С. 32—40.

Кароль И. Л., Розанов Е. В., Тимофеев Ю. М. (1983). Газовые примеси в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат. 192 с.

Катцов В. М., Мелешко В. П., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М. (2008). Модели, предназначенные для оценки будущих изменений климата. Оценочный Доклад Росгидромета «Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации». / Под ред. А. И. Бедрицкого и др. Т. 1. С. 112—151.

Костицын В. А. (1984). Эволюция атмосферы, биосферы и климата. / V. A. Kostizin (1935). Evolution de l'atmosphere. Circulation organique. Epoque glaciaires. Paris, Hermann / Пер. с франц. / Под ред. и с послесловием Н. Н. Моисеева. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 96 с.

Марчук Г. И. (1979). Моделирование изменений климата и проблема долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. № 7. С. 25—36.

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

Монин А. С. (1982). Введение в теорию климата. — Л.: Гидрометеиздат. 247 с.

Мохов И. И. (1981). О влиянии CO₂ на термический режим земной климатической системы // Метеорология и гидрология. № 4. С. 24—34.

Мохов И. И. (2004). Российские климатические исследования в 1999—2002 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 40. № 2. С. 147—155.

Мохов И. И. (2009). Российские климатические исследования в 2003—2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 45. № 2. С. 180—192.

Мохов И. И. (2011). Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 47. № 6. С. 709—716.

Мохов И. И. (2013). Результаты российских исследований климата в 2007—2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 49. № 1. С. 3—18.

Мохов И. И., Смирнов Д. А. (2009). Эмпирические оценки воздействия естественных и антропогенных факторов на глобальную приповерхностную температуру // Доклады АН. Т. 426. № 5. С. 679—684.

Мохов И. И., Смирнов Д. А., Карпенко А. А. (2012). Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений // Доклады АН. Т. 443. № 2. С. 225—231.

Спорышев П. В., Говоркова В. А. (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.

Спорышев П. В., Катцов В. М., Матюгин В. А. (2012). Согласованность температурных изменений на территории России в ансамблевых модельных расчетах и данных наблюдений // Метеорология и гидрология. № 1. С. 5—19.

Спорышев П. В., Мирвис В. М., Катцов В. М., Мелешко В. П., Ранькова Э. Я. (2008). Антропогенный вклад в изменение климата. Оценочный Доклад Росгидромета «Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации». / Под ред. А. И. Бедрицкого и др. Т. 1. С. 152—173.

Федоров Е. К. (1979). Изменения климата и стратегия человечества // Метеорология и гидрология. № 7. С. 12—24.

Фролов А. В., Страшина А. И. (2011). О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур. / В сб.: Анализ условий аномальной погоды на

территории России летом 2010 года. / Под ред. Н. П. Шакиной. — М.: Триада-ЛТД. С. 22—31.

Шакина Н. П. (2011). Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. — М.: Триада-ЛТД. 72 с.

Шакина Н. П., Иванова А. Р., Бирман Б. А., Скриптунова Е. Н. (2011). Блокирование: условия лета 2010 года в контексте современных знаний. / В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. / Под ред. Н. П. Шакиной. — М.: Триада-ЛТД. С. 6—21.

Ammann C. M., Joos F., Schimel D., Otto-Bliesner B. L. and Tomas R. (2007). Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model. PNAS. March 6, 2007. V. 104. № 10. P. 3713—3718.

Anet J. G., Rozanov E. V., Muthers S., Peter T., Brönnimann S., Arfeuille F., Beer J., Shapiro A. I., Raible C. C., Steinhilber F. and Schmutz W. K. (2013). Impact of a potential 21st century “grand solar minimum” on surface temperatures and stratospheric ozone // Geophys. Res. Lett. V. 40. P. 4420—4425. doi: 10.1002/grl.508.

Arrhenius S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground // Philosophical Magazine. V. 41. P. 237—276.

Barriopedro D., Fischer E. M., Luterbacher J., Trigo R. M., García-Herrera R. (2011). The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe // Science. V. 332 (6026). P. 220—224. doi: 10.1126/science.1201224.

Bindoff N. L., Stott P. A., AchutaRao K. M., Allen M. R., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K., Hegerl G., Hu Y., Jain S., Mokhov I. I., Overland J., Perlwitz J., Sebbari R., Zhang X. (2013). Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. / In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P. M. — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. P. 867—952.

Bjerknes J. (1964). Atlantic air-sea interaction // Advances in Geophysics. Academic Press. V. 10. P. 1—82.

Boer G. J. (2011). The ratio of land to ocean temperature change under global warming // Climate Dynamics. V. 37. P. 2253—2270.

Bolin B. and Eriksson E. (1959). Changes in the Carbon Dioxide Content of the Atmosphere and Sea Due to Fossil Fuel Combustion. / In: The Atmosphere and the Sea in Motion / Edited by Bert Bolin. — New York. Rockefeller Institute Press. P. 130—142.

Brohan P., Kennedy J. J., Harris I., Tett S. F. B. and Jones P. D. (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 // J. Geophys. Res. V. 111. D12106. doi: 10.1029/2005JD006548.

Bryson R. A. and Wendland W. M. (1970). Climatic Effects of Atmospheric Pollution. / In: Global Effects of Environmental Pollution. / Edited by S. F. Singer. — New York. Springer-Verlag. P. 130—138.

Budyko M. I. (1969). The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth // Tellus. V. 21. P. 611—619.

Callendar G. S. (1938). The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Climate // Quarterly J. Royal Meteorological Society. V. 64. P. 223—240.

Christidis N., Stott P. A., Zwiers F. W., Shiogama H., Nozawa T. (2012). The contribution of anthropogenic forcings to regional changes in temperature during the last decade // Climate Dynamics. V. 39. P. 1259—1274.

Chamberlin T. C. (1897). A Group of Hypotheses Bearing on Climatic Changes // J. Geology. V. 5. P. 653—683.

Climate Research Board (1979). Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment (Jule Charney, Chair). — Washington. DC. National Academy of Sciences. 22 p.

Cubbish U., Zorita E., Kaspar F., Gonzalez-Rouco J. F., von Storch H., Proömmel K. (2006). Simulation of the role of solar and orbital forcing on climate // Advances in Space Research. V. 37. P. 1629—1634.

Dole R., Hoerling M., Perlwitz J., Eischeid J., Pegion P., Zhang T., Quan X.-W., Xu T. and Murray D. (2011). Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? // Geophys. Res. Lett. V. 38. L06702. doi: 10.1029/2010GL046582.

Domingues C., Church J., White N., Gleckler P., Wijffels S., Barker P., Dunn J. (2008). Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise // Nature. V. 453. P. 1090—1093.

Easterling D. R. and Wehner M. F. (2009). Is the climate warming or cooling? // Geophys. Res. Lett. V. 36. L08706. doi: 10.1029/2009GL037810.

Eddy J. A. (1976). The Maunder Minimum // Science. V. 192. P. 1189—1202.

Edwards P. N. (2010). A Vast Machine: Computer Models, Climate Data and the Politics of Global Warming. — Cambridge. MA. MIT Press. 552 p.

Fourier J. (1827). Mémoire sur la température du globe terrestre et des espaces planétaires // Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France. V. 7. P. 569—604.

Gilliland R. L. (1982). Solar, Volcanic and CO₂ Forcing of Recent Climatic Changes // Climatic Change. V. 4. P. 111—131.

Giorgi F., Francisco R. (2000). Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM // Climate Dynamics. V. 16. P. 169—182.

Gleckler P. J., Santer B. D., Domingues C. M., Pierce D. W., Barnett T. P., Church J. A., Taylor K. E., AchutaRao K. M., Boyer T. P., Ishii M., Caldwell P. M. (2012). Human-induced global ocean warming on multidecadal timescales // *Nature Climate Change*. V. 2. P. 524—529.

Graf H.-F., Kirchner I., Robock A., Schult I. (1993). Pinatubo eruption winter climate effects: model versus observations // *Climate Dynamics*. V. 9. P. 81—93.

Gray L. J., Beer J., Geller M., Haigh J. D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G. A., Shindell D., van Geel B. and White W. (2010). Solar influences on climate // *Rev. Geophys.* V. 48. RG4001. doi: 10.1029/2009RG000282.

Hansen J. E., Johnson D., Lacis A., Lebedeff S., Lee P., Rind D. and Russell G. (1981). Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide // *Science*. V. 213. P. 957—966.

Hansen J. E., Lacis A., Ruedy R. and Sato M. (1992). Potential Climate Impact of Mount Pinatubo Eruption // *Geophysical Research Letters*. V. 19. P. 215—218.

Hansen J., Sato M., Ruedy R. (2012). Perception of climate change // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. V. 109. P. 14726—14727.

Harder J. W., Fontenla J. M., Pilewskie P., Richard E. C. and Woods T. N. (2009). Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared // *Geophys. Res. Lett.* V. 36. L07801. doi: 10.1029/2008GL036797.

Hasselmann K., Bengtsson L., Cubasch U., Hegerl G. C., Rodhe H., Roeckner E., von Storch H., Voss R., Waszkewitz J. (1995). Detection of Anthropogenic Climate Change using a Fingerprint Method // *Max-Planck-Institut für Meteorologie. Rep.* 168. 20 p.

Hawkins E. and Sutton R. (2008). Potential predictability of rapid changes in the Atlantic meridional overturning circulation // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L11603. doi: 10.1029/2008GL034059.

Hawkins E. and Sutton R. (2009). The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions // *Bulletin of the American Meteorological Society*. V. 90. P. 1095—1107.

Haywood J. M., Jones A., Clarisse L., Bourassa A., Barnes J., Telford P., Bellouin N., Boucher O., Agnew P., Clerbaux C., Coheur P., Degenstein D., Braesicke P. (2010). Observations of the eruption of the Sarychev volcano and simulations using the HadGEM2 climate model // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. V. 115. D21212.

Hegerl G., Zwiers F. (2011). Use of models in detection and attribution of climate change // *WIREs Climate Change*. V. 2. P. 570—591.

Hegerl G. C., Zwiers F. W., Braconnot P., Gillett N. P., Luo Y., Marengo Orsini J. A., Nicholls N., Penner J. E. and Stott P. A. (2007). Understanding and Attributing Climate Change / In: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

/ Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller. — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. P. 663—745.

Held I. M. (2001). The partitioning of the poleward energy transport between the tropical ocean and at mosphere // *J. Atmos. Sci.* V. 58. P. 943—948.

Hulburt E. O. (1931). The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth // *Physical Review*. V. 38. P. 1876—1890.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1990). Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report Prepared for IPCC by Working Group I / Edited by J. T. Houghton et al. — Cambridge. Cambridge University Press. 410 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996). Climate Change 1995: The Science of Climate Change / Edited by J. T. Houghton et al. — Cambridge. Cambridge University Press. 572 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC / Edited by J. T. Houghton et al. — Cambridge. Cambridge University Press. 881 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (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 / Edited by S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller. — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 996 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (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 / Edited by 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. — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 1535 p.

Jones G. S., Lockwood M. and Stott P. A. (2012). What influence will future solar activity changes over the 21st century have on projected global near-surface temperature changes? // *J. Geophys. Res.* V. 117. D05103. doi: 10.1029/2011JD017013.

Jones G. S., Stott P. A., Christidis N. (2013). Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations // *J. Geophys. Res. Atmos.* V. 118. P. 1—24. doi: 10.1002/jgrd.50239.

Keeling C. D. (1960). The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere // *Tellus*. V. 12. P. 200—203.

Kerr R. A. (1991). Could the Sun Be Warming the Climate? // *Science*. V. 254. P. 652—653.

Knutti R. and Tomassini L. (2008). Constraints on the transient climate response from observed global temperature and ocean heat uptake // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L09701. doi: 10.1029/2007GL032904.

Kopp G. and Lean J. L. (2011). A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophys. Res. Lett.* V. 38. L01706. doi: 10.1029/2010GL045777.

Kravitz B. and Robock A. (2011). Climate effects of high-latitude volcanic eruptions: role of the time of year // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres.* V. 116. D01105.

Kravitz B., Robock A., Bourassa A., Deshler T., Wu D., Mattis I., Finger F., Hoffmann A., Ritter C., Bitar L., Duck T. J. and Barnes J. E. (2011). Simulation and observations of stratospheric aerosols from the 2009 Sarychev volcanic eruption // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres.* V. 116. D18211.

Kravtsov S. and Spannagle C. (2008). Multidecadal Climate Variability in Observed and Modeled Surface Temperatures // *Journal of Climate.* V. 21. P. 1104—1121.

Le Treut H., Somerville R., Cubasch U., Ding Y., Mauritzen C., Mokssit A., Peterson T. and Prather M. (2007). Historical Overview of Climate Change. / In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller. — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. P. 93—127.

Lean, Judith L., Matthew T. DeLand (2012). How Does the Sun's Spectrum Vary? // *J. Climate.* V. 25. P. 2555—2560. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00571.1>.

Lott F. C., Stott P. A., Mitchell D. M., Christidis N., Gillett N. P., Haimberger L., Perlwitz J., Thorne P. W. (2013). Models versus radiosondes in the free atmosphere: a new detection and attribution analysis of temperature // *J. Geophys. Res. Atmos.* V. 118. P. 2609—2619. doi: 10.1002/jgrd.50255.

Love J. J., Mursula K., Tsai V. C. and Perkins D. M. (2011). Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity and global temperature significant? // *Geophys. Res. Lett.* V. 38. L21703. doi: 10.1029/2011GL049380.

Lovejoy S. and Schertzer D. (2012). Stochastic and scaling climate sensitivities: solar, volcanic and orbital forcings // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L11702. doi: 10.1029/2012GL051871.

Madden R. A. and Ramanathan V. (1980). Detecting Climate Change Due to Increasing Carbon Dioxide // *Science.* V. 209. P. 763—768.

Manabe S. (1970). The Dependence of Atmospheric Temperature on the Concentration of Carbon Dioxide. / In: *Global Effects of Environmental Pollution.* / Edited by S. F. Singer. — Reidel Publishing Company. Dordrecht-Holland. P. 25—29.

Manabe S. and Wetherald R. T. (1967). Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity // *J. Atmospheric Sciences*. V. 24. P. 241—259.

Meehl G. A., Arblaster J. M. and Marsh D. R. (2013). Could a future “Grand Solar Minimum” like the Maunder Minimum stop global warming? // *Geophysical Res. Lett.* V. 40. doi: 10.1002/grl.50361.

Milankovitch M. (1941). Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. — Belgrade. Königlich Serbische Akademie. 633 p.

Miller G. H., Geirsdóttir Á., Zhong Y., Larsen D. J., Otto-Bliesner B. L., Holland M. M., Bailey D. A., Refsnider K. A., Lehman S. J., Southon J. R., Anderson C., Björnsson H. and Thordarson T. (2012). Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L02708. doi: 10.1029/2011GL050168.

Mitchell J. F. B., Johns T. C., Gregory J. M. and Tett S. F. B. (1995). Climate Response to Increasing Levels of Greenhouse Gases and Sulphate Aerosols // *Nature*. V. 376. P. 501—504.

Möller F. (1963). On the Influence of Changes in the CO₂ Concentration in Air on the Radiation Balance of the Earth's Surface and on the Climate // *J. Geophysical Research*. V. 68. P. 3877—3886.

Morak S., Hegerl G. C., Kenyon J. (2011). Detectable regional changes in the number of warm nights // *Geophysical Research Letters*. V. 38. L17703. doi: 10.1029/2011GL048531.

Morak S., Hegerl G. C., Christidis N. (2013). Detectable changes in the frequency of temperature extremes // *Journal of Climate*. V. 26. P. 1561—1574.

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

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T. Y., Kram T., La Rovere E. L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N. and Dadi Z. (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge University Press. Cambridge. U. K. 599 p.

Otto F. E. L., Massey N., van Oldenborgh G. J., Jones R. G., Allen M. R. (2012). Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L04702. doi: 10.1029/2011GL050422.

Palmer M. D., Haines K., Tett S. F. B. and Ansell T. J. (2007). Isolating the signal of ocean global warming // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L23610. doi: 10.1029/2007GL031712.

Pierce D. W., Gleckler P. J., Barnett T. P., Santer B. D., Durack P. J. (2012). The fingerprint of human-induced changes in the ocean's salinity and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L21704. doi: 10.1029/2012GL053389.

Plass G. N. (1956). The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change // *Tellus.* V. 8. P. 140—154.

Rahmstorf S., Coumou D. (2011). Increase of extreme events in a warming world // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* V. 108. № 44. P. 17905—17909. doi: 10.1073/pnas.1101766108.

Ramanathan V. (1975). Greenhouse Effect Due to Chlorofluorocarbons: Climatic Implications // *Science.* V. 190. P. 50—52.

Ramanathan V., Callis L., Cess R., Hansen J., Isaksen I., Kuhn W., Lacis A., Luther F., Mahlman J., Reck R. and Schlesinger M. (1987). Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases // *Rev. Geophys.* V. 25. P. 1441—1482.

Revelle R. and Suess H. E. (1957). Carbon Dioxide Exchange between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ During the Past Decades // *Tellus.* V. 9. P. 18—27.

Rhein M., Rintoul S. R., Aoki S., Campos E., Chambers D., Feely R. A., Gulev S., Johnson G. C., Josey S. A., Kostianoy A., Mauritzen C., Roemmich D., Talley L. D., Wang F. (2013). Observations: Ocean. / In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. P. 255—315.

Santer B. D., Painter J. F., Bonfils C., Mears C. A., Solomon S., Wigley T. M. L., Glackler P. J., Schmidt G. A., Doutriaux C., Gillet N. P., Taylor K. E., Thorne P. W., Wentz F. J. (2013). Human and natural influences on the changing thermal structure of the atmosphere // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* V. 110. № 43. P. 17235—17240.

Santer B. D., Taylor K. E., Wigley T. M. L., Johns T. C., Jones P. D., Karoly D. J., Mitchell J. F. B., Oort A. H., Penner J. E., Ramaswamy V., Schwarzkopf M. D., Stouffer R. J. and Tett S. (1996). A Search for Human Influences on the Thermal Structure of the Atmosphere // *Nature.* V. 382. P. 39—46.

Scafetta N. and Willson R. C. (2009). ACRIM-gap and TSI trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model // *Geophys. Res. Lett.* V. 36. L05701. doi: 10.1029/2008GL036307.

Sedláček J. and Knutti R. (2012). Evidence for external forcing on 20th-century climate from combined ocean-atmosphere warming patterns // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L20708. doi: 10.1029/2012GL053262.

Seidenglanz A., Prange M., Varma V. and Schulz M. (2012). Ocean temperature response to idealized Gleissberg and de Vries solar cycles in a comprehensive climate model // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L22602. doi: 10.1029/2012GL053624.

Sellers W. D. (1969). A Global Climatic Model Based on the Energy Balance of the Earth-Atmosphere System // *J. Applied Meteorology*. V. 8. P. 392—400.

Stenchikov G., Hamilton K., Stouffer R. J., Robock A., Ramaswamy V., Santer B. and Graf H.-F. (2006). Arctic Oscillation response to volcanic eruptions in the IPCC AR4 climate models // *J. Geophys. Res.* V. 111. D07107. doi: 10.1029/2005JD006286.

Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Alexander L. V., Allen S. K., Bindoff N. L., Bréon F.-M., Church J. A., Cubasch U., Emori S., Forster P., Friedlingstein P., Gillett N., Gregory J. M., Hartmann D. L., Jansen E., Kirtman B., Knutti R., Krishna Kumar K., Lemke P., Marotzke J., Masson-Delmotte V., Meehl G. A., Mokhov I. I., Piao S., Ramaswamy V., Randall D., Rhein M., Rojas M., Sabine C., Shindell D., Talley L. D., Vaughan D. G., Xie S.-P. (2013). Technical Summary. / In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. — Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. P. 33—115.

Stott P. A., Jones G. S., Christidis N., Zwiers F., Hegerl G., Shioyama H. (2011). Single-step attribution of increasing frequencies of very warm regional temperatures to human influence // *Atmospheric Science Letters*. V. 12. P. 12220—12227.

Suess H. E. (1955). Radiocarbon Concentration in Modern Wood // *Science*. V. 122. P. 415—417.

Swingedouw D., Terray L., Cassou C., Voldoire A., Salas-Mélia D. and Servonnat J. (2011). Natural forcing of climate during the last millenium: Fingerprint of solar variability. Low frequency solar forcing and NAO // *Clim. Dyn.* V. 36. P. 1349—1364. doi: 10.1007/s00382-010-0803-5.

Trenberth and Dai (2007). Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L15702. doi: 10.1029/2007GL030524.

Tyndall J. (1861). On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connection of Radiation, Absorption and Conduction // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. V. 151. P. 1—36.

Van Der Swaluw E., Drijfhout S. S. and Hazeleger Bjerknes W. (2007). Compensation at High Northern Latitudes: The Ocean Forcing the Atmosphere // *Journal of Climate*. V. 20. P. 6023—6032.

Wang C., Lee S.-K., Enfield D. B. (2008). Climate Response to Anomalously Large and Small Atlantic Warm Pools during the Summer // *Journal of Climate*. V. 21. P. 2437—2450.

Wang W. C., Yung Y. L., Lacis A. A., Mo T. and Hansen J. E. (1976). Greenhouse Effects Due to Man-Made Perturbations of Trace Gases // *Science*. V. 194. P. 685—690.

Weart S. (2008). *The discovery of global warming*. — Cambridge. MA. Harvard University Press. 200 p.

Woodwell G. M., Whittaker R. H., Reiners W. A., Likens G. E., Delwiche C. C., Botkin D. B. (1978). The Biota and the World Carbon Budget // *Science*. V. 199. P. 141—146.

Zhang R., Delworth T. L. and Held I. M. (2007). Can the Atlantic Ocean drive the observed multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L02709. doi: 10.1029/2006GL028683.

Zwiers F. W., Zhang X., Feng Y. (2011). Anthropogenic influence on long return period daily temperature extremes at regional scales // *Journal of Climate*. V. 24. P. 881—892.

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА
НА СТРОИТЕЛЬСТВО, НАЗЕМНЫЙ ТРАНСПОРТ,
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС**

Е. И. Хлебникова¹, Т. А. Дацук², И. А. Салль¹

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

E-mail: khlebnikova_e@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская улица, 4
E-mail: tdatsuk@mail.ru

Поступила в редакцию 8.09.2014

Поступила после доработки 22.10.2014

Введение

В настоящей работе обсуждаются современные представления о влиянии изменений климата на топливно-энергетический комплекс, строительство и наземный транспорт на территории России. Перечисленные секторы экономики вносят наиболее заметный вклад в изменение состава атмосферы, приводящее к возникновению парникового эффекта. Поэтому фактор изменений климата имеет двоякое влияние на развитие этих отраслей. С одной стороны, изменение климатических параметров оказывает прямое воздействие на состояние среды и непосредственно влияет на эффективность функционирования отраслевых объектов. С другой стороны, необходимость смягчения изменений климата диктует определенные условия адаптации к изменениям климата, оказывая тем самым косвенное воздействие на технологическое обновление и развитие рассматриваемых секторов и экономики в целом.

Традиционно считается, что сельское хозяйство является наиболее уязвимым к неблагоприятным метеорологическим условиям. Однако,

как показывают статистические данные по США (Lazo et al., 2011), на первом месте по уровню variability доходов, связанных с воздействием метеорологических факторов, с учетом влияния рыночных механизмов, находится отрасль, принадлежащая к технической сфере экономики, а именно, добывающая промышленность.

В первом «Оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации» (Оценочный доклад..., 2008) — далее ОД_РФ-1 — нашли отражение позитивные и негативные эффекты воздействия климатических изменений на состояние зданий и сооружений, наземный транспорт, энергопотребление. В частности, даны относительные оценки наблюдаемого уменьшения продолжительности отопительного периода (около 5 % за 30 лет) и дефицита тепла (около 10 % на юге страны и 5—8 % на остальной территории). Приведены количественные оценки ожидаемых изменений характеристик отопительного периода, основанные на применении результатов моделирования средних месячных климатических характеристик с помощью некоторых глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) поколения CMIP3 (Meehl et al., 2005), а также более ранних версий глобальных климатических моделей.

В ОД_РФ-1 было обращено внимание на тенденцию уменьшения долговечности зданий, на снеговые нагрузки как на основную причину разрушительного воздействия на здания, а также на возможное в перспективе увеличение гололедных и ветровых нагрузок в отдельных регионах. На качественном уровне отмечены такие негативные последствия происходящего потепления как уменьшение продолжительности эксплуатации сезонных транспортных коридоров в районах Крайнего Севера, увеличение числа ураганов, шквалов и других опасных для транспорта и энергетики явлений.

В настоящей статье приведены результаты, отражающие влияние изменения климата на рассматриваемые виды хозяйственной деятельности, которые получены за последние годы. Анализ

климатического воздействия в будущем выполнен на основе результатов расчетов с помощью глобальных климатических моделей поколения CMIP5 (Taylor et al., 2011), а также региональной климатической модели высокого пространственного разрешения (Катцов, Говоркова, 2013).

1. Строительство

Строительная индустрия России — вследствие большой капиталоемкости и длительных сроков окупаемости создаваемых сооружений — принадлежит к секторам экономики, требующим принятия неотложных мер по адаптации к наблюдаемым и ожидаемым изменениям климата. Существующие здания, построенные в середине XX в. и последующие десятилетия, проектировались на основе климатических параметров середины прошлого века, и в настоящее время не всегда обеспечивают возможность создания оптимального микроклимата внутри зданий. На фоне возникающих экстремальных атмосферных нагрузок многие конструкции функционируют только благодаря запасу прочности, что влечет за собой высокую вероятность разрушений.

Климатические условия учитываются в строительстве на различных стадиях строительного проектирования, организации и проведения строительных работ, эксплуатации зданий и сооружений (Анапольская, Гандин, 1973; Заварина, 1976; Руководство, 2008). Для решения всей совокупности задач необходимы данные об изменении метеорологических переменных (температура воздуха и почвы, осадки, влажность воздуха, ветер, солнечная радиация) и атмосферных явлениях (метели, гололедные явления и др.) в регионе строительства. На основании этой информации определяются специализированные климатические показатели, соответствующие методам инженерных расчетов, которые используются при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Изменение этих показателей дает возможность проанализировать последствия

климатических изменений для существующих и проектируемых объектов строительства.

В ОД_РФ-1 обращалось внимание на основные виды воздействия изменений климата на состояние зданий и сооружений (сокращение продолжительности отопительного периода, уменьшение долговечности зданий и сооружений и пр.). Данные последних лет и современные результаты климатического моделирования демонстрируют сохранение тенденций, отмеченных в ОД_РФ-1, и их возможное усиление в будущем.

Уменьшение продолжительности отопительного периода¹ является положительным следствием происходящего потепления, которое создает предпосылки для сокращения расходов на отопление. Сравнительный анализ данных метеорологических наблюдений за два предшествующих десятилетия (рис. 1) показывает, что на территории России за это время продолжительность отопительного периода значительно уменьшилась (до 5 сут/10 лет на севере ЕЧР). Одновременно произошло повышение средней температуры. В меньшей степени изменение продолжительности отопительного периода проявляется в районах АЧР с суровыми климатическими условиями. В этих же районах регистрируется наибольшее увеличение средней температуры отопительного периода (до 1,5 °С).

По данным о средних многолетних значениях продолжительности и средней температуры отопительного периода в районе строительства рассчитывается величина, называемая «градусо-сутки отопительного периода»², которая является одним из основных

¹ Началом отопительного периода считается дата устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха вниз через уровень +8 °С осенью, а окончанием периода — дата устойчивого температурного перехода вверх через этот уровень весной. При этом переход считается устойчивым, если температура остается ниже (выше) соответствующего уровня не только в те сутки, когда произошел переход, но также и в течение пяти последующих суток.

² Величина «градусо-сутки отопительного периода» рассчитывается путем умножения разности между температурой комфорта внутри помещения конкретного назначения и средней температурой наружного воздуха за отопительный период на значение продолжительности отопительного периода.

климатических параметров, используемых на этапе строительного проектирования ограждающих конструкций зданий.

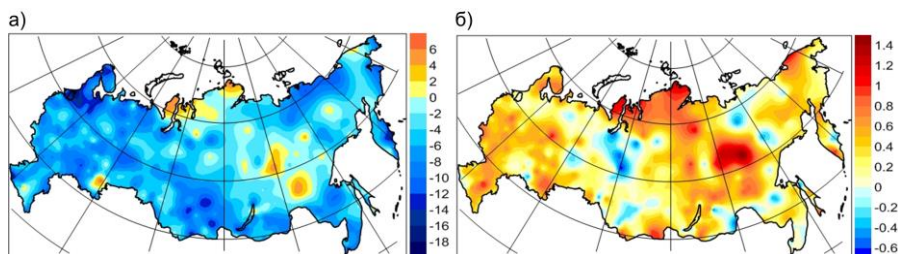


Рис. 1. Изменение характеристик отопительного периода по данным наблюдений в 1991—2010 гг. по отношению к 1971—1990 гг. Слева — продолжительность (сут.), справа — средняя температура воздуха (°С).

При проведении теплотехнических расчетов (в частности, при проектировании систем отопления и вентиляции), наряду с характеристиками отопительного периода, используются климатические параметры, отражающие экстремальные условия термического режима в холодное и теплое время года. В качестве расчетных параметров используются квантили редкой повторяемости для температуры воздуха различного временного осреднения. Для зимнего сезона обычно употребляют значения температуры воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92.

Специалисты в области строительства обращают внимание на то, что тенденция к потеплению климата хорошо проявляется в повышении средних месячных температур и сокращении продолжении отопительного периода. Вместе с тем, в зимний сезон по-прежнему наблюдаются экстремально низкие температуры воздуха (Самарин, 2009). Вследствие этого расчетные зимние температуры, оцениваемые по многолетним историческим рядам наблюдений в предположении стационарности, меняются сравнительно слабо.

В последние десятилетия стандарты проектирования, имеющие отношение к тепловой защите зданий, претерпевали существенные

изменения. В наибольшей степени эти изменения были обусловлены необходимостью уменьшения антропогенного влияния на климат и последовавшего ужесточения требований к энергоэффективности зданий.

В работе Г. И. Гринфельда (2012) представлена последовательная смена декларируемых целей тепловой защиты, начиная с 1920-х годов. На начальном этапе методология нормирования теплозащитных свойств ограждающих конструкций базировалась на принципе минимизации затрат на строительство при обеспечении комфортности пребывания в помещении. В это время, вплоть до 1995 г., в качестве основного климатического параметра региона строительства, определяющего теплотехнические свойства ограждающих конструкций, использовалась температура наиболее холодной пятидневки (или суток — в зависимости от назначения и тепловой инерции здания). В 2003 г., с введением СНиП «Тепловая защита зданий», задачей проектирования тепловой защиты становится минимизации расхода энергии на отопление зданий (точнее, на поддержание требуемых параметров микроклимата при обеспечении комфортности пребывания в них). При этом основным расчетным климатическим параметром региона строительства становится величина градусо-суток отопительного периода.

В 2013 г. введена в действие актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий», призванная повысить энергоэффективность проектируемых зданий. Актуализация была нацелена на достижение гармонизации действующих российских требований с зарубежными нормами проектирования. Как отмечается авторами разработки (Гагарин, Козлов, 2011), структура требований российского документа аналогична структуре норм Дании. Однако, как показывают (Ватин и др., 2012), потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания, построенного по минимальным требованиям действующего СНиП 23-02-2003, более чем в два раза превысят соответствующие потери для здания, построенного согласно минимальным требованиям строительных норм Финляндии.

Вопросы дальнейшего развития и совершенствования норм тепловой защиты зданий в современных условиях, предполагающих смягчение изменений климата и адаптацию к ним, являются предметом широких дискуссий (Котин, 2012; Самарин, 2012). В работе (Аверьянов и др., 2012) представлена региональная концепция обеспечения энергоэффективности зданий, реализуемая в Санкт-Петербурге, которая основана на комплексном учете всех видов потребляемых зданиями энергетических ресурсов. Обращается внимание на то, что в СНиП 23-02-2003 «требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций были значительно увеличены, а требования к уровню инженерного обеспечения зданий и к сокращению затрат энергии на вентиляцию помещений были проигнорированы». Авторами справедливо утверждается, что для реального уменьшения потребляемой зданиями тепловой энергии в условиях потепления необходима соответствующая инженерная поддержка (Дацюк, 2009) — внедрение систем автоматического регулирования параметров теплоносителя и пр. Отмечается также, что уже сейчас имеются здания, в которых энергия, потребляемая на кондиционирование воздуха, сопоставима с годовыми затратами тепловой энергии на отопление.

Анализ срока окупаемости различных энергосберегающих мероприятий в зависимости от фактического значения градусо-суток отопительного периода (Самарин, 2009) продемонстрировал влияние «рассогласования» расчетных и фактических значений климатических параметров, которое затрудняет корректное технико-экономическое обоснование планируемых мероприятий. Обращается внимание на целесообразность более оперативной корректировки нормативных и справочных документов (СНиП), а также важность учета прогнозов изменения климатических и стоимостных факторов для оптимизации решений.

Еще один комплекс проблем в строительном секторе, связанных с воздействием климатических изменений, — обеспечение долговечности ограждающих конструкций зданий.

В последние десятилетия наблюдается тенденция к ускоренному старению и уменьшению долговечности ограждающих конструкций зданий и сооружений, определяемой «сроком их службы без потери эксплуатационных качеств в данных климатических условиях при заданном режиме эксплуатации» (СНиП 11-В.6-62). Требуемая степень долговечности обеспечивается «применением материалов, имеющих надлежащую стойкость (морозостойкость, влагостойкость, биостойкость, стойкость против коррозии, высокой температуры, циклических температурных колебаний и против других разрушающих воздействий окружающей среды)».

Наиболее распространенным видом разрушающего воздействия являются температурно-влажностные деформации. Материалы ограждающих конструкций под переменным воздействием тепла и холода разрушаются, и это разрушение происходит интенсивнее при быстрой смене температур и особенно при перепадах температуры, связанных с переходами через 0 °С. Увеличение количества жидких осадков, сопровождающих оттепели, является дополнительным фактором, усиливающим процесс старения. Увлажнение стен зданий, особенно интенсивное при сильном ветре, и последующее охлаждение приводит к замерзанию воды в порах материалов, и оказывает разрушительное воздействие на конструкции (рис. 2). Наибольшую опасность представляют кристаллы льда и солей, оказывающие расклинивающее воздействие на стеновой материал.

В настоящее время цокольная часть кирпичных зданий Якутска, построенных 40—50 лет назад, в значительной степени разрушена из-за конденсации влаги в стенах, и эти здания часто находятся в аварийном состоянии (Уваров, 2012). Но как отмечается в монографии С. В. Александровского (2004), необходимы специальные исследования долговечности зданий, эксплуатирующихся не только в условиях северной строительно-климатической зоны, но и в районах с частыми периодическими оттепелями и заморозками без значительного понижения температуры воздуха.



Рис. 2. Влияние циклов замораживания и оттаивания на температурно-влажностные деформации, приводящие к разрушению ограждающих конструкций.

Долговечность напрямую зависит от количества циклов замораживания и оттаивания стенового материала (Ельчищева, Ельчищев, 2012). Тенденция к увеличению числа переходов температуры воздуха через 0°C , наблюдаемая в последние десятилетия на Европейской части России (ЕЧР) и в южных регионах Сибири (рис. 3), свидетельствует об усилении разрушающего воздействия среды, которое приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий, автодорог и других сооружений.

Важно обратить внимание на взаимосвязь проблем тепловой защиты зданий и их долговечности. Необходимость смягчения изменений климата и усиление внимания к вопросам энергоэффективности зданий привели в 1990-х годах к существенному повышению (в 2,5—3 раза) требований к сопротивлению теплопередаче стен зданий. Выполнение этих требований стало возможным лишь в многослойных конструкциях с применением

эффективных теплоизоляционных материалов. При этом применение многослойных конструкций стало настолько стремительным, а разнообразие материалов столь обширным, что научное сопровождение не успевало за этими объемами (Куприянов, Иванцов, 2011). Десятки зданий оказались аварийными после 7—9 лет эксплуатации вследствие разрушения фасадных систем (Лобов, Ананьев, 2009).

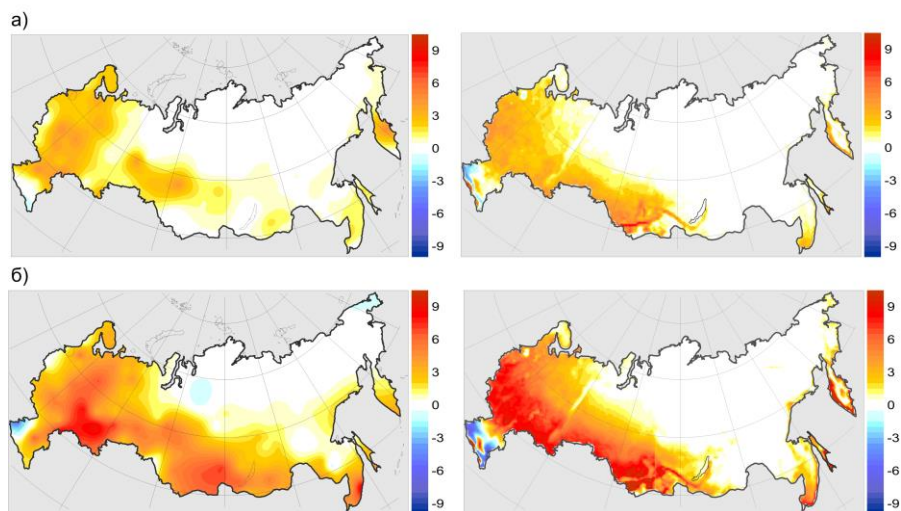


Рис. 3. Изменение климатических факторов долговечности сооружений по данным наблюдений (слева) и результатам расчетов с помощью РКМ ГГО³ (справа): а) число переходов средней суточной температуры воздуха через 0 °С (ноябрь — март); б) число внутрисуточных переходов температуры воздуха через 0 °С (ноябрь — март).

Изменение оценивалось: по данным наблюдений — для периода 1981—2000 гг. по отношению к 1951—1980 гг.; по результатам моделирования — для периода 2041—2060 гг. по отношению к 1981—2000 гг.

³ Здесь и далее РКМ ГГО означает Региональную климатическую модель Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

Особенно острая ситуация сложилась при строительстве капитальных объектов в северной строительной-климатической зоне. При большой амплитуде колебаний температуры воздуха и при постоянном перемещении точки росы в утеплителе в зависимости от температуры наружного воздуха происходило ускоренное разрушения клея, минераловатных утеплителей и структуры пенополистирола, что привело к ухудшению потребительских качеств объектов и сокращению сроков их службы. При совершенствовании строительных норм по тепловой защите зданий необходимо в полном объеме учитывать особенности климатических условий в различных регионах страны и отрегулировать разработку региональных строительных правил (Уваров, 2012). В северных регионах рекомендуется использование долговечных строительных материалов с большой теплоемкостью и большим коэффициентом теплопроводности.

Взаимосвязь тепловой защиты зданий и их долговечности имеет вполне определенное экономическое содержание. С применением эффективных теплоизоляционных конструкций снижаются расходы на отопление зданий, однако при проведении расчетов энергоэффективности зданий не учитываются расходы на капитальный ремонт наружного ограждения в процессе эксплуатации. В работе (Кнатко и др., 2008) отмечается, что «при долговечности материалов и конструкций менее 50 лет затраты на ремонт многослойных стеновых конструкций ... превышают ожидаемую экономию средств от снижения расходов на отопление при эксплуатации». С этой точки зрения сроку службы наружного ограждения и долговечности используемых материалов следует уделять не меньше внимания, чем обеспечению его теплозащиты (Куприянов, Иванцов, 2011). В работе (Уваров, 2012) предлагается отнести к числу главных требований, предъявляемых к проектам тепловой защиты капитальных зданий, обеспечение соответствия долговечности ограждающих конструкций срокам эксплуатации таких зданий — 50, 100 и 150 лет.

Задача обеспечения долговечности ограждающих конструкций на стадии их проектирования является актуальной, но современная нормативная база не в состоянии ее решить. Целесообразно продолжение работ по нормированию долговечности ограждающих конструкций, которые в 1972 г. были приостановлены более чем на 30 лет. В последние годы в нормативных документах наметился возврат к проблеме долговечности ограждающих конструкций (Технические рекомендации ..., 2005). Однако произошло видоизменение понятия «долговечность»: исчезла ориентация на режим эксплуатации ограждений и климатические условия. Это ставит под сомнение адекватность предложенных методов по оценке долговечности. Необходимо развитие методологии оценки долговечности и создание базы данных по долговечности материалов ограждений. При этом режимы испытаний материалов на старение (долговечность) должны адекватно моделировать эксплуатационные воздействия в различных климатических условиях (Куприянов, Иванцов, 2012). Такой подход в принципе позволит учесть влияние изменений климатических воздействий на материалы ограждений, соответствующих сценарным прогнозам климата будущего.

В ОД_РФ-1 обращалось внимание на снеговые нагрузки как на основную причину разрушительного воздействия на здания в последние десятилетия. Следует заметить, что такие случаи происходили, в основном, со зданиями, имеющими легкие покрытия, собственный вес которых меньше, чем нормативная снеговая нагрузка. Для таких сооружений особое значение имеют кратковременные снеговые нагрузки, возникающие при сильных снегопадах. Происходящие изменения климата, характеризующиеся ростом интенсивности осадков (в особенности зимних), являются дополнительным фактором риска. Необходимо, однако, заметить, что в 2011 г. при актуализации СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» требования к значениям снеговых нагрузок были существенно повышены.

Имеющиеся данные не дают оснований говорить об увеличении ветровых нагрузок. Ряды наблюдений за скоростью ветра на

метеорологических станциях (однородность которых вызывает определенные сомнения) обнаруживают даже слабо выраженную отрицательную тенденцию (Булыгина и др., 2013). Однако при сохранении средних значений скоростей ветра в некоторых регионах возможна трансформация их вероятностных распределений к виду распределений с «тяжелыми» хвостами за счет увеличения вклада штормовых скоростей (Gastineau, Soden, 2009). В этом отношении требуются дополнительные региональные исследования. В связи с ростом экстремально высоких температур и увеличением количества осадков можно ожидать также усиления эффектов, обусловленных совместным воздействием ветровых нагрузок, температурных деформаций и коррозионного разрушения.

В глобальном масштабе объем исследований, посвященных проблеме влияния ожидаемых изменений климата на здания и сооружения, быстро растет. Оценка последствий изменений климата для конкретных объектов строительства предполагает задание климатических условий будущего (сценарий климатических изменений и контрольные параметры), выбор исследуемого объекта (здание или его подсистемы), определение измеряемого показателя функционирования. С точки зрения строителей изменения условий окружающей среды, связанные с глобальными изменениями климата, в той или иной местности варьируют весьма значительно: от сравнительно медленных изменений средней температуры воздуха до высокой вероятности экстремальных событий (например, затоплений), которые могут полностью уничтожить строительный объект (de Wilde, Coley, 2012). Поэтому разработка методологии учета неопределенностей региональных и локальных сценарных прогнозов является чрезвычайно важной в контексте строительного проектирования капитальных сооружений (de Wilde, Tian, 2001, 2009; Tian, de Wilde, 2011).

подавляющее большинство импактных исследований в области строительства посвящено проблеме энергоэффективности зданий. При этом в качестве измеряемых показателей функционирования зданий рассматриваются, в основном, такие как потребление энергии на

отопление, потребление энергии на охлаждение, число часов с перегревом зданий, т. е. с температурой внутри зданий выше порогового значения (+26 °C). Большое внимание уделяется функционированию систем вентиляции и кондиционирования (Lomas, Ji, 2009; Delfani, 2010). В работе (Barclay et al., 2012) к анализу влияния климатических изменений на вентиляцию зданий дополнительно привлекается информация об ожидаемых изменениях ветрового режима.

Детальные исследования энергоэффективности зданий базируются на применении физических моделей тепло-влажнопереноса и соответствующих программных средств, которые настроены на использование в качестве входных данных информации о совокупности метеорологических параметров внешней среды с высоким временным разрешением (см., например, (Гагарин и др., 2013)). В специальной литературе уделяется много внимания разработке методов построения таких многомерных рядов данных (так называемого «типового года») для будущего климата. Различают две группы подходов (Guan, 2009): эмпирические методы, базирующиеся на исторических данных (Crawley, 2008), и методы, основанные на результатах физико-математического моделирования. В настоящее время наиболее обоснованными являются, по-видимому, те, которые сочетают в себе применение глобальных МОЦАО и встроенных региональных моделей высокого разрешения с широким использованием вероятностного подхода и привлечением стохастических моделей (Mylona, 2012; Nik et al., 2012; Eames et al., 2011; Kershaw et al., 2011; Jenkins et al., 2011).

Анализ возможностей создания оптимального микроклимата в условиях потепления климата представлен в многочисленных работах по отношению к различным типам зданий, расположенным в разных регионах Европы, Азии, Австралии, Америки и Африки. В частности, в работе (Du, 2012) в методологическом контексте рассматривается широкая база типов зданий и сооружений. Она включает аэропорты, отели, музеи, школы, тюрьмы, архивы, театры, библиотеки, больницы, а также жилые дома и офисы. Проблема рассматривается в условиях

сценариев изменений климата для Великобритании для периода времени до 2080 г. Ясно, что в этом направлении необходимо дальнейшее продвижение и для России.

Гораздо менее исследованным является вопрос о воздействии изменений режима увлажнения на здания и сооружения. Вопросы проектирования дренажных систем в условиях изменений режима увлажнения, рассматриваемые в (Jack, Kelly, 2012), а также обустройства канализационных сетей (Васильев, Чистяков, 2011), представляются чрезвычайно важными для России, где наблюдается увеличение интенсивности осадков и ожидается усиление этой тенденции. В (Huijbregts et al., 2012) обращается также внимание на увеличение относительной влажности, которая влияет на рост плесени и приводит к повреждениям музейных объектов; предлагается метод для оценки таких рисков в условиях изменения климата.

В работе (Steenbergen et al., 2012) обсуждается возможность оценки изменений экстремальных ветровых нагрузок по результатам моделирования с помощью современных глобальных и региональных климатических моделей. Предлагается метод статистической интерпретации результатов моделирования для определения возможных изменений требуемых нормативных параметров ветрового режима. Сделан методологически важный вывод о необходимости учета особенностей естественной изменчивости для корректной интерпретации модельных данных с целью определения нормируемых климатических характеристик экстремумов.

На территории России к середине XXI в. ожидается дальнейшее сокращение продолжительности и повышение средней температуры отопительного периода, создающие условия для сокращения потребления тепловой энергии, но при этом будет становиться все более актуальной проблема борьбы с перегревом зданий. Предпосылкой к этому является ожидаемое увеличение вероятности экстремально теплых летних сезонов (Оценка..., 2011.). Для создания оптимального микроклимата внутри зданий — как в зимнее, так и в летнее время — необходимы разработка и внедрение эффективных систем отопления, вентиляции и кондиционирования,

обеспечивающих соблюдение необходимых стандартов на энергопотребление зданий (Аверьянов и др., 2012).

Ожидаемое увеличение температуры наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (Оценка..., 2011), которое наиболее заметно проявляется в ЕЧР, приведет к повышению тепловой эффективности существующих зданий. При этом, однако, необходимо иметь в виду высокую степень неопределенности локальных оценок экстремальных характеристик, рассчитываемых по отдельным климатическим реализациям. Как показали эксперименты с региональной климатической моделью (рис. 4), изменения температурных экстремумов редкой повторяемости на значительной части территории России характеризуются большой внутриансамблевой изменчивостью. Для повышения достоверности оценок изменений и их адекватного применения необходимо дальнейшее развитие методов интерпретации результатов моделирования на основе комбинирования динамических и статистических методов. Это утверждение согласуется с выводами, которые сделаны в отношении анализа экстремальных характеристик ветровых нагрузок (Steenbergen et al., 2012).

Повышение уровня потребления энергии может привести к критическим нагрузкам и связанным с этим сбоям в электрических сетях и функционировании всей городской инфраструктуры (водоснабжении и пр.). Многие из этих проблем должны рассматриваться в терминах риска. Примером такого анализа является работа (Aerts, Botzen, 2011), посвященная вопросу страхования от наводнений в Нидерландах. Направление исследований, связанное с оценкой рисков по отношению к зданиям и сооружениям (риски разрушений, уязвимость и пр.), несомненно, заслуживает внимания, но пока еще развито недостаточно (Liso, 2006; Тамразян, 2012; Кокодеева и др., 2012).

Как показывают результаты проведенных модельных экспериментов (см. рис. 3), которые хорошо согласуются с данными наблюдений, к середине XXI в. ожидается сохранение и даже некоторое усиление тенденции к увеличению числа переходов

температуры воздуха через 0°C , приводящей к ускоренному разрушению конструкций (Хлебникова и др., 2012б). Это потребует серьезного увеличения эксплуатационных расходов существующих объектов и должно учитываться при проектировании новых сооружений.

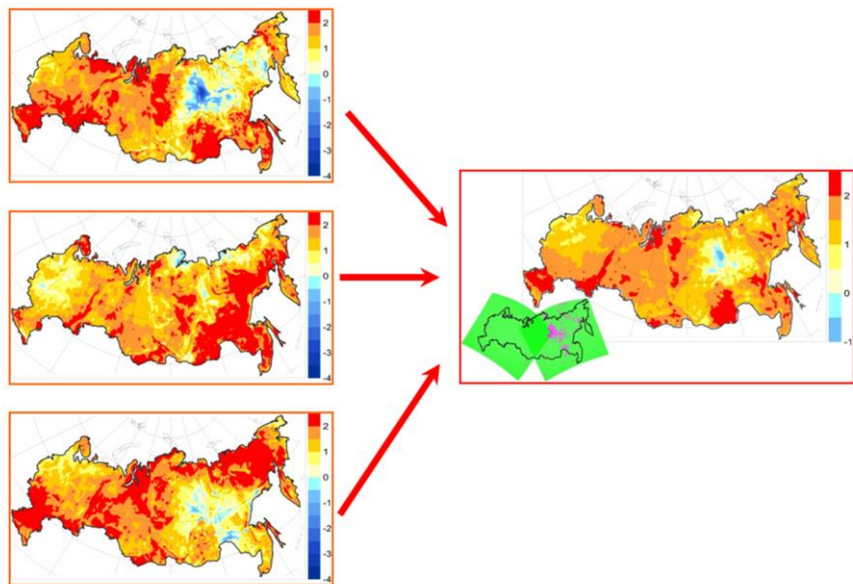


Рис. 4. Изменения экстремальных характеристик средней суточной температуры воздуха летнего сезона к середине XX в. по отношению к 1981—2000 гг.: слева — оценки изменений среднего годового максимума в отдельных экспериментах; справа — оценки изменений, осредненные по всем экспериментам.

Розовым цветом на врезке выделены области с вариацией знака изменений в различных экспериментах.

Важным аспектом обеспечения надежности и долговечности зданий и сооружений является учет атмосферных нагрузок, к которым относятся и температурные климатические воздействия (СНиП «Нагрузки и воздействия»). Расчет температурных климатических воздействий предполагает определение возможных перепадов

температуры по сечению элементов используемых конструкций на основе задания внутригодовых изменений характеристик среды — в первую очередь, температуры наружного воздуха. При этом диапазон колебаний температуры воздуха в зимний и летний сезоны описывается с помощью таких параметров как средние месячные значения температуры воздуха в январе и июле, а также отклонения температуры воздуха наиболее холодных (жарких) суток от средних месячных значений.

В зимний сезон на значительной части территории России (ЕЧР, Западная и Средняя Сибирь) ожидается уменьшение абсолютных значений отклонений средних январских минимумов от средних месячных значений (рис. 5). В то же время на территории России выявляются регионы, где потепление может сопровождаться увеличением отклонений экстремально низких температур от средних значений зимой и, что особенно важно, экстремально высоких температур от средних значений — летом. Однако для повышения достоверности оценок целесообразно дальнейшее проведение модельных экспериментов с применением ансамблевого подхода и привлечением статистических методов интерпретации.

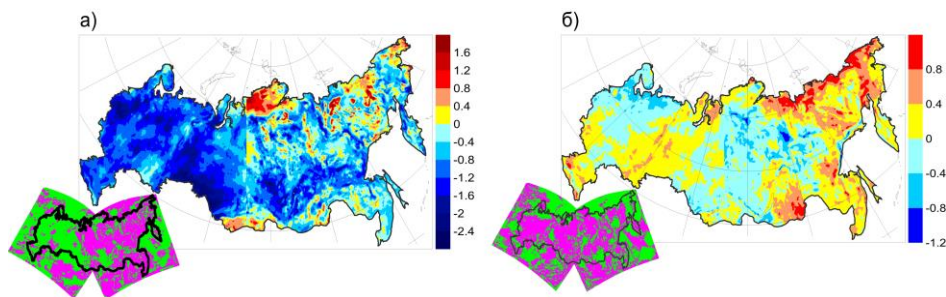


Рис. 5. Изменение параметров атмосферных нагрузок, характеризующих температурные климатические воздействия, к середине XXI в. по отношению к 1981—2000 гг.: абсолютные отклонения среднего годового минимума (а) и среднего годового максимума (б) средней суточной температуры воздуха (°C) от средней месячной температуры воздуха и индикаторы неопределенности оценок (пояснения — см. рис. 4).

Более полная оценка изменения климатического воздействия на объекты строительства требует расширения круга анализируемых климатических переменных, возможности воспроизведения которых современными климатическими моделями не вполне ясны. Вместе с тем, изменение многих прикладных характеристик проявляется достаточно отчетливо и свидетельствует об актуальности принятия адаптационных мер, которые имеют слабую чувствительность по отношению к скорости антропогенного потепления. К числу наиболее заметных климатических эффектов, проявляющихся на территории России, которые необходимо принимать во внимание, следует отнести: увеличение тепловой эффективности зданий, ухудшение внутреннего микроклимата помещений в летнее время, рост увлажненности ограждающих конструкций, ускоренное старение зданий и сооружений, увеличение кратковременных снеговых нагрузок и др.

В различных статьях, посвященных проблеме влияния меняющегося климата на здания и сооружения, отражены некоторые общие положения (de Wilde, Coley, 2012), которые хорошо согласуются с представлениями, сформировавшимися в среде российских специалистов:

- многие из существующих нормативных и регламентирующих документов основаны на климатических данных прошлого и требуют переосмысления;

- техническая эксплуатация зданий, их ремонт и реновация играют важную роль в обеспечении эффективности зданий в долгосрочной перспективе, и тем самым оказывают значительное влияние на адаптацию зданий к изменениям климата;

- создание эффективных систем отопления, вентиляции, кондиционирования и другого инженерного оборудования зданий является одной из первоочередных задач адаптации;

- понимание и управление эффектом городского «острова тепла» должны стать важным элементом градостроительной политики.

С точки зрения представителей строительной науки необходимо расширить круг исследований с привлечением климатических сценариев для разных регионов и рассмотрением разнообразных типов зданий. Стратегической целью таких исследований должна стать разработка концепции гибкого и надежного проекта зданий, объединяющего представление о долговечности с высоким адаптационным потенциалом.

В обзоре (de Wilde, Coley, 2012) отмечается необходимость развития работ, способствующих повышению информативности климатических сценариев — в первую очередь, в отношении экстремальных событий. В связи с недостаточностью имеющихся знаний важно соблюдать баланс усилий, направленных на развитие методологии оценки климатических воздействий и реальными практическими действиями.

2. Наземный транспорт

Климат и его изменения оказывают значительное воздействие на состояние наземной транспортной инфраструктуры (автомобильные и железные дороги, мосты, тоннели, портовая инфраструктура, взлетно-посадочные полосы и т. д.), а также обеспечение организации движения и эффективность функционирования транспорта (расходы на содержание объектов, безопасность движения, скорость транспортных потоков и т. д.).

Сокращение продолжительности периода с отрицательными температурами воздуха, является фактором, благоприятствующим работе транспорта. Однако в целом наблюдаемые и ожидаемые климатические изменения температуры воздуха и режима увлажнения оказывают негативное воздействие на состояние и функционирование наземной транспортной инфраструктуры (Chapman, 2007; Koetse, Rietveld, 2009; Jaroswski et al., 2010; Самодурова, 2008; Хлебникова, Салль, 2012). Основные виды неблагоприятных воздействий, обусловленных происходящими изменениями климата, проявляются

уже в настоящее время. К середине XXI в. ожидается усиление этих тенденций.

Повышение температуры воздуха в холодный период года в России сопровождается частыми перепадами температуры, которые способствуют ускоренному разрушению покрытия автомобильных дорог. Особенно интенсивно процесс разрушения материалов происходит при частых переходах температуры воздуха через 0 °С. Увеличение количества жидких осадков, сопровождающих оттепели, является дополнительным фактором, усиливающим процесс разрушения. Влияние этих эффектов наглядно проявляется в состоянии автодорог в стране уже в настоящее время. При этом увеличиваются расходы на локальный ремонт поврежденных участков («ямочный» ремонт).

Возможный рост температуры воздуха в летний сезон приведет к большему числу дней с экстремально высокими температурами воздуха, что отрицательно скажется на состоянии автомобильных дорог. В таких условиях происходит размягчение асфальтового покрытия и быстрое ухудшение эксплуатационных качеств автодорог. Это может оказаться особенно существенным для дорог местного значения, не рассчитанных на большую нагрузку, покрытие которых обладает более низкой температурой плавления.

При экстремально высоких температурах воздуха происходит значительный перегрев рельсов и последующая деформация железнодорожных путей, приводящая к уменьшению скорости передвижения и увеличивающая риск схода с рельсов. В работе (Charman et al., 2008) отмечается высокая чувствительность числа случаев изгиба рельсов к повышению летней температуры, что дает возможность установить соответствующую регрессионную зависимость. В экстремально жаркое европейское лето 2003 г. на территории Великобритании число аварийных ситуаций такого рода почти в три раза превысило среднее значение.

Состояние и функционирование транспортной инфраструктуры в большой степени зависит от количества осадков и режима их выпадения.

Возможный рост количества осадков в зимний сезон и увеличение их суточных максимумов (рис. 6) повлечет за собой необходимость принятия дополнительных мер по организации движения и обеспечения безопасности на дорогах и приведет к увеличению эксплуатационных расходов на зимнее содержание дорог (Самодурова, 2008). Более частые переходы через нулевую отметку, продолжительные снегопады, выпадение жидких осадков в холодное время года также негативно отразятся на безопасности дорожного движения и потребуют принятия специальных мер по уменьшению скользкости на дорогах (Псаломщикова и др., 2009).

К середине XXI в. на территории России ожидается преимущественно увеличение суммы осадков в теплый сезон (рис. 6). Важным фактором является сопутствующий этому увеличению рост суточной интенсивности осадков. Лишь в южных районах ЕЧР, Средней Сибири, в Забайкалье и Приморье (Дальний Восток) степень неопределенности оценок, обусловленная влиянием внутренней климатической изменчивости, не позволяет говорить о наличии выраженной тенденции.

Сильные дожди негативно сказываются на скорости транспортных потоков и безопасности дорожного движения. Существующие дренажные системы могут не соответствовать ожидаемому увеличению интенсивности осадков, что может повлечь разрушение грунтовых зон автомобильных и железнодорожных магистралей и других объектов. Рост количества и интенсивности осадков в теплое время года увеличит риски возникновения опасных последствий, связанных с потерей устойчивости склонов, — оползней, лавин. Такие риски особенно возрастают в случаях, когда сухие периоды чередуются с периодами интенсивных ливней. Неоднократные факты разрушения новой автодороги, построенной в Приморье к саммиту АТЭС в 2012 г., привели к большому материальному ущербу и наглядно продемонстрировали важность и экономическую

целесообразность учета климатических факторов на этапе проектирования и строительства инженерных сооружений.

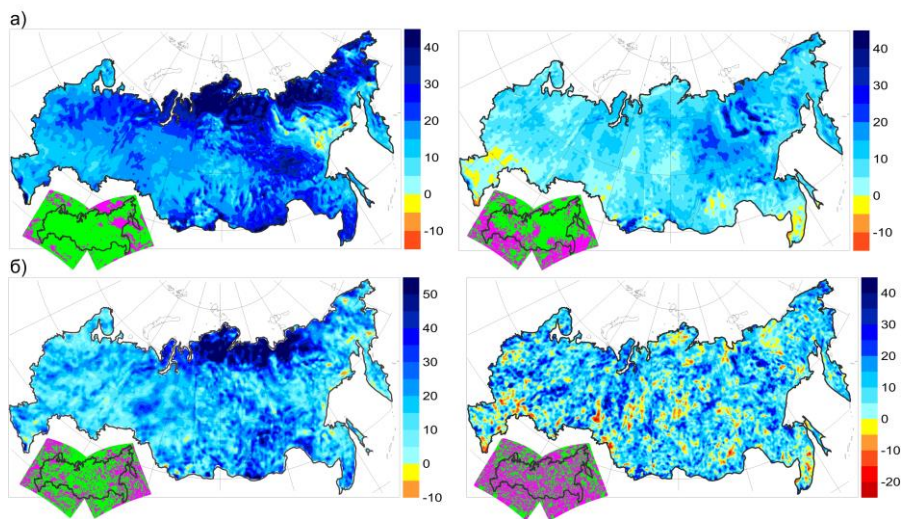


Рис. 6. Изменение характеристик увлажнения для холодного (слева) и теплого (справа) сезонов к середине XXI в. по сравнению с 1981—2000 гг. и индикаторы неопределенности оценок (пояснение – см. рис. 4): а) средние сезонные суммы осадков (в процентах от нормы 1981—2000 гг.); б) средние сезонные максимумы суточных сумм осадков (в процентах от нормы 1981—2000 гг.).

Рост интенсивности ливневых осадков представляет особую опасность, так как при этом повышается вероятность речных ливневых наводнений, которые могут вызвать затопление и разрушение всей прибрежной инфраструктуры. В горных районах в случае выпадения сильных дождей большой интенсивности наблюдается процесс забивания почвенных пор мелкодисперсными частицами почвы, резко увеличивается коэффициент поверхностного стока, и паводки принимают характер катастрофических наводнений, особенно в случае охвата большими осадками значительной площади

речного бассейна (Борщ и др., 2012). При этом от момента выпадения осадков до начала интенсивного подъема уровня воды в реке может проходить менее 1—3 ч. При отсутствии превентивных адаптационных мероприятий такие наводнения могут иметь тяжелые последствия. Известный пример — Крымск, июль 2012 г.

Особое внимание в отечественной и зарубежной литературе уделяется вопросу о влиянии климатических изменений на состояние трубопроводного транспорта (Власова, 2009; Власова, Ракитина, 2011). Наиболее опасные последствия связаны, несомненно, с деградацией многолетней мерзлоты. В зоне сезонного промерзания грунтов аварийные разрушения трубопроводов часто происходят в районах со сложными гидрогеологическими условиями, для которых характерен высокий риск возникновения оползневых и селевых процессов (Казаков, Генсиоровский, 2008). Важнейшим фактором, определяющим степень развития этих процессов, является количество и интенсивность осадков. В таких условиях ожидаемое увеличение сезонных сумм осадков и особенно их интенсивности в теплый сезон (рис. 6) является серьезным дополнительным фактором риска, который необходимо принимать во внимание при эксплуатации существующих и проектировании новых трубопроводов.

3. Топливо-энергетический комплекс

Топливо-энергетический комплекс России включает в себя объекты добычи первичных энергоресурсов, а также объекты энергетики, осуществляющие генерацию энергии, ее транспортировку и доведение до потребителей.

Как отмечается в докладе (Оценка ..., 2011), климатические условия и их изменения — во всем их многообразии — оказывают существенное воздействие на работы по разведке, добыче и транспортировке углеводородного топлива. В наибольшей степени происходящие изменения затрагивают объекты нефтегазодобычи, расположенные в районах с суровыми климатическими условиями.

Влияние температуры воздуха отражается на выборе материалов конструкций, смазочных масел, уплотнительных материалов и при подготовке верхних строений объектов добычи к эксплуатации в зимних условиях. Несмотря на то, что используемое оборудование рассчитано на работу в широком диапазоне температур, приближение температуры воздуха к критическим значениям влияет на износ оборудования и уменьшает надежность конструкций.

Происходящее потепление климата сопровождается сокращением продолжительности периода года с отрицательными температурами воздуха и приводит к уменьшению числа дней с экстремально низкими температурами.

На протяжении XXI в. ожидается сохранение этой тенденции. Сокращение зимнего периода и числа дней с температурой воздуха ниже -30°C (рис. 7) приведет к уменьшению простоев в работе, положительно отразится на работоспособности оборудования и величине эксплуатационных расходов.

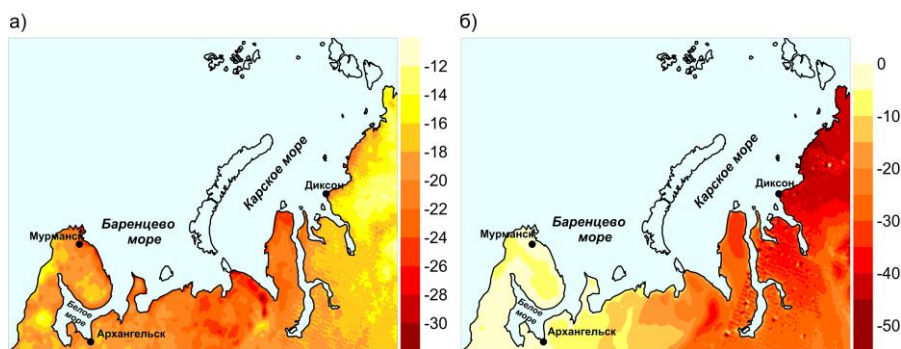


Рис. 7. Изменение продолжительности периода с температурой ниже 0°C (а) и числа суток с минимальной температурой воздуха ниже -30°C (б) к середине XXI в. по сравнению с 1981—2000 гг. по результатам расчетов с использованием РКМ ГТО в условиях сценария A2 (Special Report on Emission Scenarios, 2000).

На фоне смягчения температурного режима в зимний период уже в настоящее время происходят изменения климата, являющиеся, с точки зрения функционирования нефтегазового сектора в регионе, неблагоприятными. Эти изменения касаются осадков и режима их выпадения. На большей части территории страны в зимний сезон наблюдается рост экстремально сильных осадков.

На протяжении XXI в. ожидается усиление отмеченных тенденций. Увеличение зимних осадков и их интенсивности (рис. 6) окажет отрицательное воздействие на сооружения нефтегазодобычи и машинное оборудование.

Изменения климата влияют на производство энергии, ее передачу и потребление, оказывая тем самым существенное воздействие на функционирование всего энергетического комплекса. Поэтому учет климатических изменений должен быть обязательной составляющей прогнозирования балансов в энергетике.

Происходящее сокращение продолжительности периода с отрицательными температурами воздуха и уменьшение частоты экстремально низких температур приводит, в том числе, к уменьшению коррозии и повышению работоспособности энергетического оборудования, улучшению условий доставки и хранения топлива (угля) на ТЭС (меньше смерзаемость угля).

Однако в теплое время года воздействие потепления оказывается негативным. Увеличение температуры воздуха снижает эффективность теплового преобразования, что приводит к сокращению производства энергии на электростанциях.

В ЕЧР в настоящее время отмечается еще одна неблагоприятная климатическая тенденция, наиболее выраженная на юге территории. В этом регионе наряду с ростом числа дней с экстремально высокими температурами воздуха одновременно наблюдается увеличение продолжительности «сухих» периодов (Хлебникова и др., 2012а).

К середине XXI в. ожидается усиление отмеченных тенденций (рис. 8 и 9). Рост температуры воздуха в летнее время, сопровождаемый увеличением дефицита осадков, может привести к уменьшению доступности воды для охлаждения и понижению

порогового уровня отключения, что также отразится на совокупной генерируемой мощности. Для территории России влияние отмеченных факторов может оказаться особенно существенным для электростанций южного региона, в частности, для Ростовской АЭС.

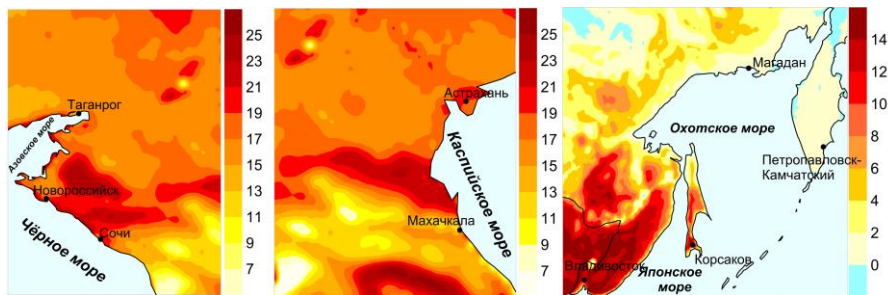


Рис. 8. Изменение числа дней за год с максимальной температурой воздуха выше +25 °С к середине XXI в. по сравнению с 1981—2000 гг.

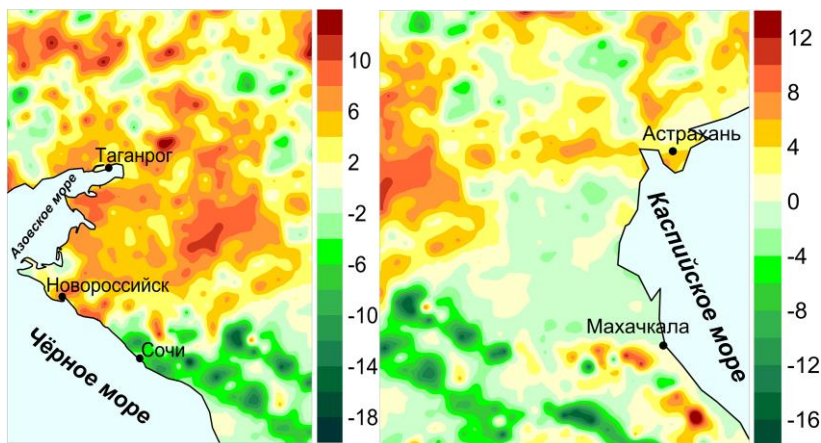


Рис. 9. Изменение максимальной продолжительности периода с отсутствием эффективных осадков ($P < 5$ мм/сут) в течение теплого сезона к середине XXI в. по сравнению с 1981—2000 гг.

Точные оценки уменьшения производства энергии под влиянием потепления зависят от технологических особенностей конкретных энергетических объектов. Вместе с тем, для ориентировочной характеристики ожидаемых потерь мощности на территории России полезно учитывать результаты, полученные для зарубежных стран Европы и Северной Америки. Согласно результатам исследований (Mideksa, Kallbekken, 2010; Linnerud et al., 2011), потеря генерируемой мощности в условиях потепления оценивается в 1—2 % на каждый градус потепления.

Ожидаемое потепление в летний сезон, сопровождаемое увеличением числа суток с экстремально высокими значениями температуры воздуха, негативно повлияет на процесс передачи электроэнергии, приводя к уменьшению исходной передаваемой мощности. При превышении уровня +25 °С передаваемая мощность уменьшается на 2,25 %/1 °С по сравнению со штатным режимом. Дополнительно увеличиваются потери на ЛЭП (на 0,4 %/1 °С). При превышении уровня +35 °С возможно возникновение критических ситуаций, связанное с полным прекращением передачи электроэнергии из-за опасности перегрева линий электропередач (Александров, 2006).

Системы передачи электроэнергии окажутся более уязвимыми вследствие ожидаемого усиления конвективных процессов в атмосфере, связанного с ростом числа таких опасных явлений как грозы, смерчи, шквалы, которые сопровождаются экстремальными ветровыми нагрузками на ЛЭП и приводят к их разрыву. Рост количества зимних осадков и их суточных максимумов, частые повышения температуры воздуха и увеличение числа случаев выпадения жидких осадков в зимний сезон, создает предпосылки для возникновения аварий на ЛЭП, обусловленных высокими гололедно-ветровыми нагрузками (разрыв проводов и разрушение опор).

В отличие от процесса генерации энергии, чувствительного к дефициту осадков, угрозу для нормальной передачи энергии представляют сильные дожди, которые могут привести к замыканиям в цепи. Вероятность таких явлений также имеет тенденцию к

увеличению (см. рис. 6). Наводнения, лавины и оползни, связанные с выпадением интенсивных осадков, могут привести к повреждениям кабеля, подстанций и другого оборудования.

С методологической точки зрения представляет интерес работа (McColl et al., 2012), в которой на примере Великобритании выполнено исследование ожидаемого воздействия изменений климата на электрические сети. На основе углубленного статистического анализа информации о погодо-зависимых сетевых аварийных ситуациях, сопутствующих метеорологических данных и перспективных оценок климата, полученных с применением региональной климатической модели, дана количественная оценка возможных изменений частоты различных отказов в будущем. При этом рассматривались ситуации, связанные с метелями, грозами, перегревом линий и др. Как отмечается в работе, это исследование могло быть выполнено только при тесном сотрудничестве специалистов-климатологов и экспертов из области энергетики, которые имеют ясное представление о конкретных пороговых значениях различных метеорологических величин, а также о совокупности управленческих действий, которые могут быть приняты в тех или иных критических ситуациях.

Изменение уровня потребления энергии для создания оптимальных условий внутри зданий различного назначения (обогрева или охлаждения помещений) обоснованно считается одним из существенных проявлений изменений климата. Наиболее распространенными климатическими показателями потребления энергии на обогрев и охлаждение помещений (индексами потребления энергии) являются характеристики дефицита тепла (HDD) или дефицита холода (CDD), которые рассчитываются для года в целом или определенного периода года путем суммирования абсолютных отклонений средней суточной температуры воздуха от выбранной базовой температуры. При расчете дефицита тепла рассматриваются только те сутки, когда температура воздуха была ниже базовой, а при расчете дефицита холода — только сутки с превышением базовой температуры.

Вопрос о выборе базовой температуры, а также методики расчета индексов потребления энергии (в частности, масштаба временного осреднения температуры) для последующего использования при оптимизации потребления энергии обсуждается в (Day et al., 2003; Krese et al., 2012) и других работах. В Великобритании при расчете величины HDD в качестве базовой температуры используется величина $+15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при расчете CDD — значение $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как отмечается в работе (Isaac, van Vuuren, 2009), оптимальным является выбор в качестве базовой температуры значения, при котором достигается минимум потребления энергии в годовом ходе. В этом случае обеспечивается наилучшая связь между рассчитываемыми характеристиками дефицита тепла и холода и соответствующим потреблением энергии. Такое значение базовой температуры может быть определено эмпирически для каждой местности.

Наиболее распространенным является выбор в качестве базовой температуры значения $18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, рассматриваемого как порог комфортности. В России, являющейся в целом очень холодной страной, основное внимание уделяется оценке дефицита тепла, рассчитываемого с использованием базовой температуры $18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ для отопительного периода⁴ (Оценочный доклад..., 2008). Аналогично характеристике дефицита тепла HDD за отопительный период при использовании базовой температуры $+18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ для года в целом рассчитывается характеристика дефицита холода CDD.

Анализ данных наблюдений за 1971—2010 гг. показывает, что отрицательная тенденция в изменении дефицита тепла проявляется на всей территории России. Среднее значение дефицита тепла за 1991—2010 гг. оказалось меньше соответствующего значения для интервала 1971—1990 гг. в среднем на 200—400 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сутки}$. Хорошо

⁴ По существу эта величина совпадает с величиной градусо-суток отопительного периода, применяемой в строительном проектировании, где в качестве нормативных параметров используются упрощенные оценки, основанные на средних многолетних значениях продолжительности и средней температуры отопительного периода, а базовая температура выбирается в зависимости от назначения здания (жилое, общественное, детское учреждение и т. д.).

выраженной является и тенденция к увеличению дефицита холода (рис. 10).

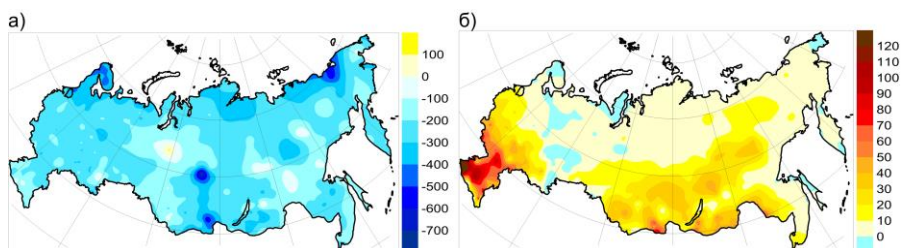


Рис. 10. Изменение дефицита тепла (слева) и дефицита холода (справа) по данным наблюдений за 1991—2010 гг. по сравнению с 1971—1990 гг.

Особенно заметным оказался рост дефицита холода на юге ЕЧР. При этом важно подчеркнуть, что изменение абсолютной величины «мягких» экстремумов (наблюдаемых примерно 1 раз в 5 лет), которые предъявляют повышенные требования к системе энергоснабжения, в значительной степени определяется именно трендовой составляющей (рис. 11).

Перспективные оценки изменений дефицита тепла и дефицита холода на территории России (рис. 12) отвечают современным возможностям моделирования климата и рекомендованным сценариям антропогенного воздействия (Taylor et al., 2011). Оценки основаны на использовании результатов численных экспериментов суточного разрешения в условиях сценария RCP 4.5 для 10 моделей CMIP5, см. (Хлебникова, Салль, 2013). Осредненные по совокупности моделей значения ожидаемых к середине XXI в. изменений индексов потребления энергии (по сравнению с базовым периодом 1981—2000 гг.) варьируют по территории России весьма значительно, однако знак изменений рассматриваемых характеристик не меняется по всей территории. Значимые изменения дефицита холода (по сравнению с базовым периодом 1991—2010 гг.) выявляются и на интервале 2021—2040 гг.

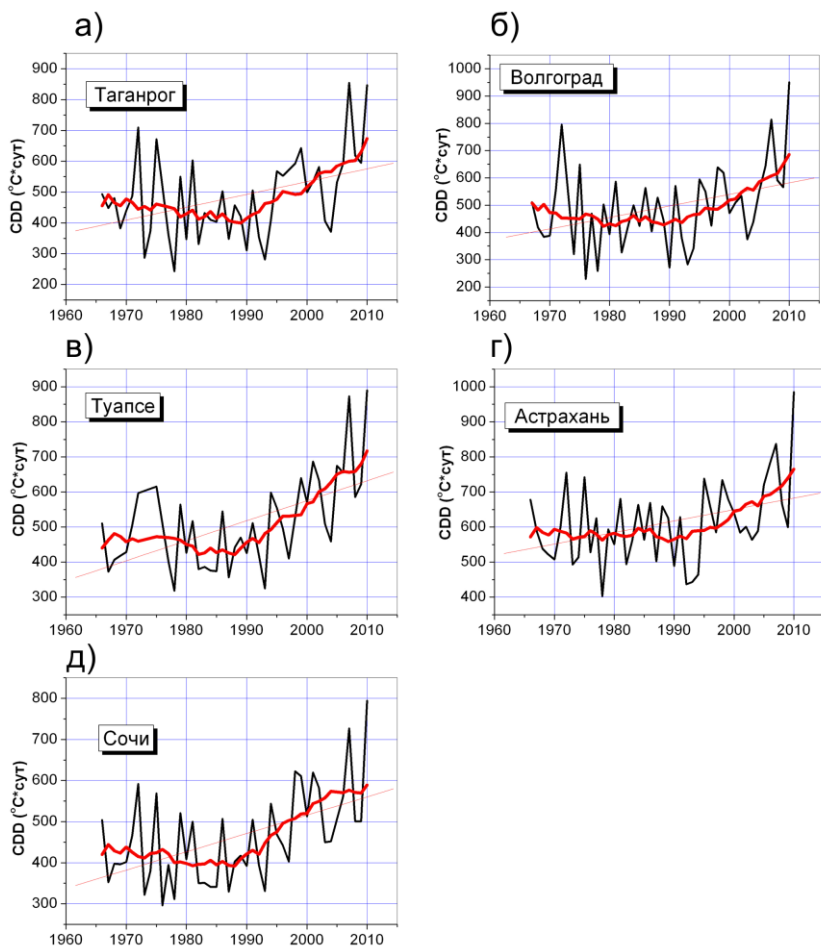


Рис. 11. Межгодовые изменения дефицита холода на юге ЕЧР.
1966—2010 гг.

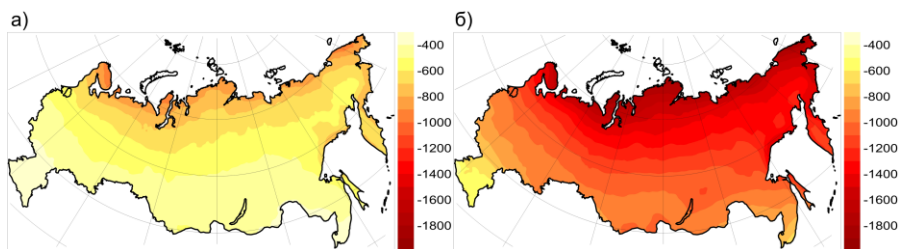


Рис. 12. Изменения индекса теплопотребления за отопительный период (HDD, °C·сут) в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) (а) и в середине XXI века (2041—2060 гг.) (б).

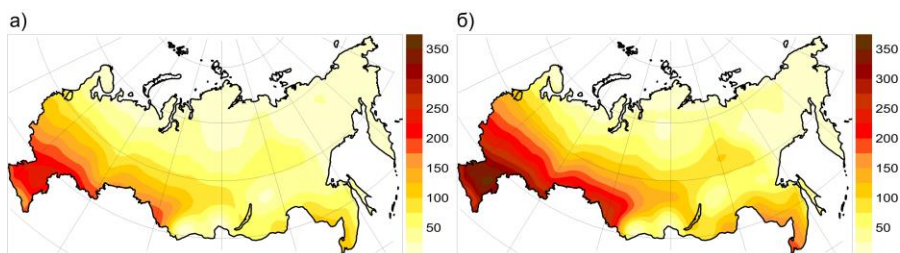


Рис. 13. Изменения индекса энергопотребления в теплый сезон (CDD, °C·сут) в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) (а) и к середине XXI века (2041—2060 гг.) (б).

Заметим, что население распределено по территории России крайне неравномерно, и наибольшее сокращение дефицита тепла ожидается именно в малонаселенных районах с суровыми климатическими условиями, где характерное значения дефицита тепла в течение отопительного периода приближается к величине 10000 °C·сут. При этом осредненное по территории России — с учетом плотности населения — значение дефицита тепла для конца XX в. составляет менее 5000 °C·сут, см., например, (Isaac, van Vuuren, 2009).

Для получения более полного представления о влиянии климатических факторов на изменение структуры энергопотребления полезны взвешенные по численности населения оценки изменения индексов потребления энергии. Относительные изменения величины теплопотребления для крупных регионов России (см. табл. 1) показывают, что в наибольшей степени эффект зимнего потепления отразится на совокупном теплопотреблении в Северо-Западном ФО.

Таблица 1

Мультимодельные вероятностные оценки региональных изменений индексов энергопотребления на отопление (HDD) и охлаждение зданий (CDD) в 2041—2060 гг. по отношению к 1981—2000 гг., рассчитанные с учетом численности населения

Федеральный округ	Квартили межмодельного распределения					
	HDD (%)			CDD (°C·сут)		
	0,25	Медиана, 0,50	0,75	0,25	Медиана, 0,50	0,75
Северо-Западный	–27	–24	–20	31	100	169
Центральный	–24	–22	–19	130	155	253
Южный	–25	–22	–17	261	318	381
Приволжский	–23	–21	–17	170	192	258
Уральский	–20	–19	–16	124	154	220
Сибирский	–18	–17	–14	130	164	226
Дальневосточный	–17	–16	–14	95	132	171
Россия в целом	–22	–20	–18	160	175	264

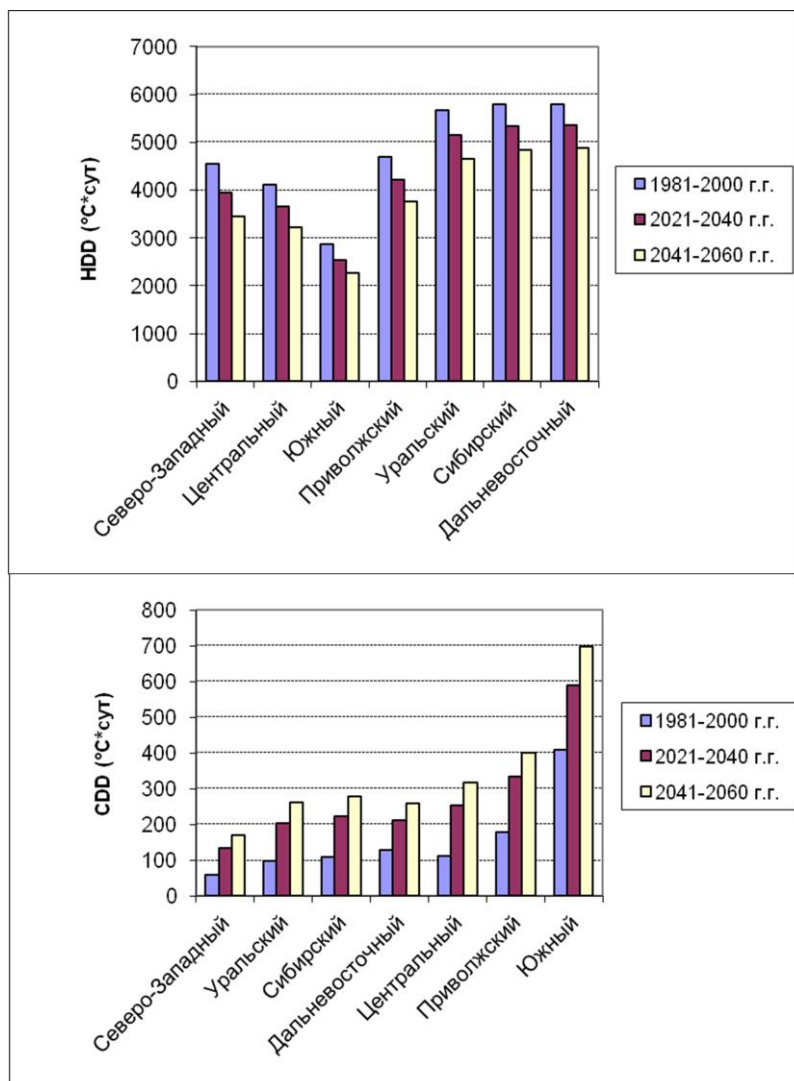


Рис. 14. Региональные оценки индексов энергопотребления в холодный (HDD, °C·сут) и теплый (CDD, °C·сут) сезоны, рассчитанные с учетом численности населения, для различных 30-летних интервалов.

В то же время существенно изменится потребность в кондиционировании помещений на юге страны. На территории Южного ФО (в границах 2009 г.) к середине XXI в. в среднем ожидается увеличение индекса CDD до 700 °С·сут при возможном уменьшении индекса HDD до величины 2200—2300 °С·сут (рис. 14).

Соотношение между величинами HDD и CDD (рис. 15) не дает возможности точно судить о соответствующих расходах первичных энергоресурсов и связанной с ними эмиссии парниковых газов, так как это определяется техническими характеристиками различного оборудования. Заметим, что согласно (Wilbanks, 2007 а, б), значение $HDD = 2200$ °С·сут близко к пороговому: в области превышения этого значения потепление климата связано с уменьшением энергопотребления, а в зоне, где HDD меньше этой величины, дополнительные расходы на кондиционирование, скорее всего, превысят их сокращение на обогрев помещений.

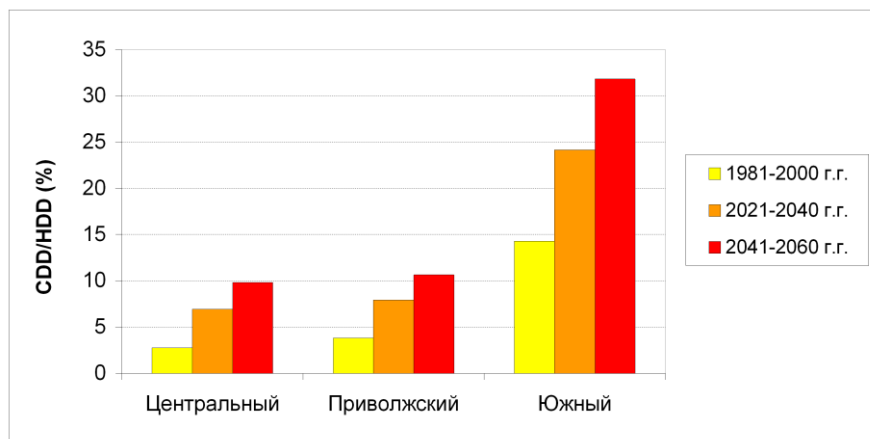


Рис. 15. Изменение соотношения между климатически обусловленным энергопотреблением на обогрев (HDD) и охлаждение (CDD) зданий в регионах с высокой подверженностью риску перегрева зданий и большой плотностью населения.

Влияние изменений климатических индексов энергопотребления на ожидаемое реальное потребление рассматривается, как правило, с помощью построения эконометрических многомерных регрессионных моделей, в которые, кроме климатических индексов, включаются многие экономические показатели, характеризующие уровень развития страны. В работе (Pilli-Sihvola et al., 2010) на основе таких моделей и привлечения региональных перспективных оценок климата показано, что в странах Северной и Центральной Европы (Финляндии, Германии, Франции) доминирующим фактором, влияющим на потребление и стоимость электрической энергии в середине XXI в., будет уменьшение потребления энергии на отопление, в то время как в Южной Европе потребность в электроэнергии и ее стоимость будут возрастать (например, в Испании на 2,5—4 %).

В глобальном контексте вопрос о влиянии изменений климата на энергопотребление в жилом секторе обсуждается в работе (Isaac, van Vuuren, 2009). Для 11 крупных регионов — стран или частей континентов, являющихся крупными потребителями энергии — даны оценки изменения уровня энергопотребления на обогрев и кондиционирование жилых помещений к середине и концу XXI в. В число рассматриваемых регионов включена и Россия. Эти результаты основаны на использовании интегрированного подхода к оценке глобальных изменений окружающей среды (van Vuuren et al., 2006). К совокупности влияющих факторов отнесены такие как численность населения, жилая площадь на душу населения, интенсивность энергопотребления (зависящая от доходов), энергоэффективность оборудования и др. В качестве климатических факторов задаются индексы HDD и CDD. К середине XXI в. прогнозируется уменьшение потребления энергии на отопление на 3 %, а энергопотребление на кондиционирование по модельным оценкам должно увеличиться более чем в 40 раз (при этом, однако, не учитывалось лимитирующее воздействие доступных электрических мощностей).

4. Адаптации

Строительство. Одной из первоочередных задач адаптации является повышение эффективности систем отопления, вентиляции, кондиционирования и другого инженерного оборудования зданий. Для реального уменьшения потребляемой зданиями тепловой энергии необходимым является не только установка приборов учета, но и модернизация индивидуальных тепловых пунктов и качественное регулирование параметров теплоносителя в зависимости от метеорологических условий.

В рамках дальнейшего развития норм тепловой защиты целесообразно исходить из повышения уровня инженерного обеспечения зданий с учетом увеличения экстремальных летних температур и роста летнего энергопотребления. Желательно предусмотреть учет особенностей климатических условий и их изменений в различных регионах страны на основе разработки региональных строительных правил.

С целью соблюдения требований по долговечности зданий при строительстве новых объектов необходимо обеспечить использование материалов, имеющих надлежащую стойкость в отношении циклов замораживания и оттаивания, повышенную коррозионную устойчивость различных элементов, а также конструктивные решения, исключающие повышение влагосодержания строительных конструкций за счет атмосферных воздействий.

Актуально развитие методологии оценки и создание базы данных по долговечности материалов ограждений на основе моделирования эксплуатационных воздействий в различных климатических условиях. Полученная информация даст основу для оптимизации выбора материалов ограждений, соответствующих сценарным прогнозам климата будущего.

При оценке рисков, связанных с ветровыми и снеговыми нагрузками, целесообразно устанавливать нормативные нагрузки на основе принятия достаточно высокой вероятности их непревышения в течение всего расчетного периода эксплуатации. Для минимизации рисков аварий, связанных с некорректным установлением

нормативных значений атмосферных нагрузок, полезно проведение региональных исследований на основе существующих данных наблюдений с целью перехода от схематического районирования территории России к получению детализированной картины пространственных вариаций нагрузок в различных регионах страны.

Нормативные и регламентирующие документы (СНиП и др.), которые являются информационной основой адаптации строительной индустрии к изменениям климата, должны быть гармонизированы с действующими международными нормами. Необходимо регулярное обновление нормативных параметров с учетом данных метеорологических наблюдений за последние годы. Представляется целесообразным расширение перечня рассматриваемых показателей, отражающее особенности происходящих климатических изменений.

Наземный транспорт. Комплекс мер, направленных на адаптацию к изменениям климата наземной транспортной системы, может быть разделен на две группы.

Первая группа включает в себя меры, предотвращающие ускоренное разрушение дорог и транспортной инфраструктуры под воздействием неблагоприятных погодных условий (участвовавшие переходы температуры воздуха через нулевую отметку в сочетании с увлажненностью поверхности, высокие температуры дорожного покрытия летом и др.). Для предотвращения негативных последствий в настоящее время при строительстве новых объектов целесообразно использование материалов, имеющих надлежащую стойкость по отношению к высоким температурам воздуха и рассчитанных на большее число циклов замораживания и оттаивания.

Вторая группа мероприятий направлена на обеспечение безопасности дорожного движения в условиях неблагоприятных погодных-климатических условий (обильные снегопады, гололедица и др.). С этой целью целесообразна организация системы мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения об ожидаемых неблагоприятных погодных условиях, а также принятие специальных мер по уменьшению скользкости на дорогах. Следует также обратить внимание на необходимость принятия адаптационных мер по

обеспечению комфортных условий для пассажиров общественного транспорта, включая железнодорожный и автомобильный транспорт, а также метрополитен, в условиях повышенных летних температур, в том числе внедрение систем кондиционирования воздуха.

Топливо-энергетический комплекс. К мерам адаптации, прежде всего, следует отнести диверсификацию и децентрализацию энергетики с максимально полным использованием возможностей источников энергии, альтернативных ископаемому топливу. В свете растущего спроса на электроэнергию, в том числе и в контексте воздействия изменений климата, для обеспечения устойчивого функционирования энергетики оптимальным является сочетание крупных и локальных источников мощности.

Для адаптации традиционного сегмента электроэнергетики — ТЭС, АЭС — необходима разработка и внедрение технологических решений, повышающих их устойчивость в условиях неблагоприятных погодно-климатических воздействий. Актуальным является создание эффективных систем охлаждения на электростанциях, способных функционировать в условиях экстремально высоких температур.

Оптимальное сочетание крупных и локальных источников мощности предполагает опережающее развитие сетевой инфраструктуры. В свете этого важной мерой адаптации является включение в Правила установки электрооборудования (ПУЭ) научно-обоснованных стандартов по атмосферным нагрузкам, разработанных на базе региональных исследований гололедных и других видов нагрузок.

Учитывая состояние энергообеспечения в России, в основе которого лежит раздельное производство электрической и тепловой энергии, и постоянный рост потребления электроэнергии, для полноценного извлечения выгод, связанных с потеплением, требуется широкое внедрение современных технологий производства энергии в сочетании с комплексной модернизацией системы теплоснабжения и тепловых сетей.

Заключение

Сравнительный анализ оценок наблюдаемых и ожидаемых изменений климата и его воздействия на объекты строительства, наземный транспорт и топливно-энергетический комплекс позволил выявить определенные тенденции, которые в той или иной степени наблюдаются уже в настоящее время, а в перспективе — согласно расчетным оценкам — будут усиливаться.

Многие изменения проявляются достаточно отчетливо и свидетельствуют о необходимости принятия адаптационных мер, направленных на минимизацию крупных потерь и/или обеспечивающих создание условий для извлечения потенциальных выгод.

Строительство. К числу наиболее заметных последствий происходящего потепления климата для объектов строительства — зданий и технических сооружений — относится изменение характеристик отопительного периода, которое создает предпосылки для сокращения расходов на отопление зданий при сохранении теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Анализ данных метеорологических наблюдений за два предшествующих десятилетия показал, что тенденция уменьшения продолжительности отопительного периода (до 5 сут/10 лет на севере ЕЧР) и повышения его средней температуры является хорошо выраженной практически на всей территории России.

В меньшей степени изменение продолжительности отопительного периода проявляется в районах АЧР с суровыми климатическими условиями. Однако в этих же районах регистрируется наибольшее увеличение средней температуры отопительного периода (до +1,5 °C за 20 лет). Уменьшение продолжительности и рост средней температуры отопительного периода способствует повышению тепловой эффективности существующих зданий и приводит к снижению требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций проектируемых объектов.

Несмотря на выраженный положительный тренд в рядах годовых минимумов температуры воздуха, изменение некоторых параметров

(например, температуры наиболее холодной пятидневки заданной обеспеченности), используемых при теплотехнических расчетах, по данным наблюдений проявляется сравнительно слабо. Это связано с тем, что в зимний сезон по-прежнему наблюдаются экстремально низкие температуры воздуха, что препятствует заметному повышению расчетных зимних температур, оцениваемых на практике по всей совокупности наблюдений за многолетний период, и незначительно отражается на проектируемой мощности систем отопления.

К середине XXI в. ожидается дальнейшее сокращение продолжительности и повышение температуры отопительного периода. Это создает условия для сокращения потребления тепловой энергии в существующих зданиях. Однако при этом будет становиться все более актуальной проблема борьбы с перегревом зданий в теплый период года.

Повышение температуры в летний сезон и значительное увеличение повторяемости экстремально высоких температур уже в настоящее время приводит к нарушению соответствующих санитарно-гигиенических показателей в домах старой постройки. В перспективе — при отсутствии адаптации — проблема борьбы с перегревом зданий значительно обострится. Ожидаемый рост летних температурных экстремумов повысит требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций, а также к инженерному оборудованию зданий.

Обеспечение долговечности ограждающих конструкций зданий является одной из современных проблем, связанных с прямым и косвенным воздействием изменений климата.

В последние десятилетия отмечается тенденция к ускоренному старению и уменьшению долговечности ограждающих конструкций зданий, определяемой сроком их службы без потери эксплуатационных качеств. Наблюдаемое усиление разрушающего воздействия температурно-влажностных деформаций связано с такими особенностями происходящих изменений климата, как рост количества жидких и смешанных осадков в зимний сезон, увеличение числа циклов замораживания и оттаивания, повышенное увлажнение

стен зданий с последующим охлаждением. Эти особенности не были учтены при выборе соответствующих материалов ограждающих конструкций. По этой причине находятся в аварийном состоянии многие здания 1960-х годов постройки (например, в Якутске).

Негативное влияние роста числа циклов замораживания и оттаивания наиболее выражено на территории ЕЧР. В сочетании с увеличением количества жидких осадков в холодное время года это приводит к ускоренному старению зданий и сооружений. Согласно модельным оценкам в ближайшие десятилетия эта тенденция сохранится и потребует серьезного увеличения эксплуатационных расходов.

Еще одна причина уменьшения долговечности существующих зданий в значительной мере связана с принятием в 1990-х годах регламентирующих мер по повышению энергоэффективности зданий. Выполнение соответствующих требований привело к использованию многослойных конструкций и широкому применению теплоизоляционных материалов, долговечность которых — при условии их эксплуатации в разнообразных климатических условиях России — не была должным образом изучена. В результате десятки зданий оказались аварийными после 7—9 лет эксплуатации вследствие разрушения фасадных систем. Особенно острая ситуация сложилась при строительстве капитальных объектов в северной строительно-климатической зоне (в Центральной Якутии и прилегающих районах).

Важным аспектом обеспечения надежности, безопасности и долговечности сооружений является учет атмосферных нагрузок. Имеющиеся данные наблюдений не дают оснований говорить о заметном увеличении ветровых нагрузок. Ряды наблюдений за скоростью ветра на метеорологических станциях (однородность которых вызывает, правда, определенные сомнения) обнаруживают даже слабо выраженную отрицательную тенденцию. Однако при сохранении или слабом изменении средних значений скоростей ветра в некоторых регионах возможна трансформация их вероятностных распределений за счет увеличения вклада штормовых скоростей. В

этом отношении требуются дополнительные региональные исследования. В связи с ростом экстремально высоких температур и увеличением количества осадков можно ожидать также усиления эффектов, обусловленных совместным воздействием ветровых нагрузок, температурных деформаций и коррозионного разрушения.

Вопрос о нормировании снеговых нагрузок вызывает широкие дискуссии среди специалистов. За последние десятилетия нормативные значения этого вида нагрузок, определяемые по данным о годовых максимумах веса снежного покрова, неоднократно менялись в сторону повышения. В условиях изменений климата, когда наблюдается увеличение интенсивности зимних осадков, особое значение для объектов строительства приобретают кратковременные снеговые нагрузки, возникающие при сильных снегопадах. Ожидаемые изменения, характеризующиеся усилением этой тенденции, являются дополнительным фактором риска для зданий и сооружений с легкими покрытиями.

Наземный транспорт. В последние годы наземная транспортная инфраструктура (автомобильные и железные дороги, мосты, тоннели, портовая инфраструктура, взлетно-посадочные полосы и пр.) в России испытывает преимущественно негативное воздействие происходящих климатических изменений, связанных с повышением температуры воздуха и изменением режима увлажнения.

Общее сокращение продолжительности периода с отрицательными температурами воздуха является фактором, благоприятствующим работе транспорта. Однако на большей части территории России (ЕЧР, южные районы Сибири и Дальнего Востока) повышение температуры воздуха в холодный период года сопровождалось увеличением числа переходов температуры воздуха через 0 °С, что способствовало ускоренному разрушению покрытия автомобильных дорог.

Увеличение количества жидких осадков усиливает разрушающее воздействие температурно-влажностных деформаций. Согласно расчетным оценкам на протяжении первой половины XXI в. эта

тенденция сохранится, что потребует увеличения расходов на содержание существующих автодорог.

Наблюдаемое увеличение числа суток с экстремально высокими температурами в летний сезон является фактором, способствующим быстрому ухудшению эксплуатационных качеств автодорог из-за происходящего размягчения асфальтового покрытия. Этот эффект хорошо проявляется на дорогах местного значения, не рассчитанных на большую нагрузку, покрытие которых обладает низкой температурой плавления.

Экстремально высокие летние температуры, повторяемость которых в последние десятилетия значительно увеличилась на большей части территории страны, способствовали повышению риска аварий железнодорожных составов, вследствие значительного перегрева рельсов и последующей деформации железнодорожных путей. Предотвращение аварий требовало снижения скорости передвижения и приводило к увеличению транспортных издержек.

Ожидаемое усиление тенденции роста количества осадков в зимний сезон и их суточных максимумов потребует принятия специальных мер по уменьшению скользкости на дорогах, приведет к увеличению эксплуатационных расходов на зимнее содержание дорог. Это повлечет за собой необходимость принятия дополнительных мер по организации движения и обеспечения безопасности на дорогах.

Наиболее высокие риски связаны с ростом интенсивности осадков в теплый сезон. Существующие дренажные системы могут не соответствовать ожидаемому увеличению интенсивности осадков, что может привести к разрушению грунтовых зон автомобильных и железнодорожных магистралей и других объектов. Рост количества и интенсивности осадков в теплое время года увеличивает риски, связанные с потерей устойчивости склонов, — возникновение оползней, лавин (пример: неоднократные факты разрушения новой автодороги, построенной в Приморье к саммиту АТЭС в 2012 г.).

Рост интенсивности ливневых осадков представляет особую опасность, так как при этом повышается вероятность речных ливневых наводнений, которые могут вызвать затопление и

разрушение прибрежной инфраструктуры. В горных районах паводки принимают характер катастрофических наводнений (пример: Крымск, 2012 г.).

В районах со сложными гидрогеологическими условиями, где проложены магистральные трубопроводы, повышенный риск возникновения оползневых и селевых процессов создает угрозу опасных экологических последствий. Ожидаемое увеличение сезонных сумм осадков, и особенно их интенсивности в теплый сезон, является серьезным дополнительным фактором риска, который необходимо принимать во внимание при эксплуатации существующих и проектировании новых трубопроводов.

Топливо-энергетический комплекс Происходящее сокращение продолжительности периода с отрицательными температурами воздуха, уменьшение частоты экстремально низких температур приводит к уменьшению коррозии и повышению работоспособности энергетического оборудования, улучшению условий доставки и хранения топлива на тепловых электростанциях.

В теплое время года потепление оказывает негативное воздействие. Увеличение температуры воздуха снижает эффективность теплового преобразования и приводит к сокращению производства энергии на электростанциях. Ориентировочная оценка потери генерируемой мощности в условиях потепления составляет 1—2 % на каждый градус потепления.

На территории ЕЧР уже в настоящее время рост температуры воздуха в летний сезон сопровождается увеличением максимальной длины периода без осадков. Усиление этой тенденции может привести к уменьшению доступности воды для охлаждения и понижению порогового уровня отключения, что также отразится на совокупной генерируемой мощности. Влияние отмеченных факторов может оказаться особенно существенным для электростанций юга России, в частности, для Ростовской АЭС.

Ожидаемое потепление в летний сезон, сопровождаемое увеличением числа дней с экстремально высокими значениями температуры воздуха, негативно повлияет также на процесс передачи

электроэнергии, приводя к уменьшению исходной передаваемой мощности. При превышении уровня $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ передаваемая мощность уменьшается на $2,25\text{ } \%/1\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению со штатным режимом. Дополнительно увеличиваются потери на ЛЭП (на $0,4\text{ } \%/1\text{ }^{\circ}\text{C}$). При превышении уровня $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ возможно возникновение критических ситуаций, связанных с полным прекращением передачи электроэнергии из-за опасности перегрева линий электропередач.

Системы передачи электроэнергии окажутся более уязвимыми вследствие ожидаемого усиления конвективных процессов в атмосфере, сопровождаемого ростом числа таких опасных явлений как грозы, смерчи, шквалы, и экстремальными ветровыми нагрузками на ЛЭП, которые приводят к их разрыву. В перспективе рост суточной интенсивности зимних осадков, частые повышения температуры воздуха и увеличение числа случаев выпадения жидких осадков в зимний сезон создает предпосылки для возникновения аварий на ЛЭП, обусловленных высокими гололедно-ветровыми нагрузками (разрыв проводов и разрушение опор).

В отличие от процесса генерации энергии, чувствительного к дефициту осадков, угрозу для нормальной передачи энергии представляют сильные дожди, приводящие к замыканиям в цепи. Согласно расчетным оценкам к середине XXI в. вероятность таких явлений увеличится. Наводнения, лавины и оползни, связанные с выпадением интенсивных осадков, могут привести к повреждениям кабеля, подстанций и другого оборудования.

Изменение уровня потребления энергии на обогрев зданий обоснованно считается одним из значимых проявлений изменений климата. Анализ данных наблюдений за 1971—2010 гг. показал, что отрицательная тенденция в изменении индекса теплопотребления (дефицита тепла) проявляется на всей территории России. Среднее значение дефицита тепла за 1991—2010 гг. оказалось меньше соответствующего значения для интервала 1971—1990 гг. в среднем на $200\text{—}400\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$.

Согласно расчетным оценкам к середине XXI в. отрицательная тенденция в изменении индекса теплопотребления проявится на всей

территории России. Пространственное обобщение оценок, выполненное с учетом неравномерности распределения населения, показывает, что по сравнению с существующим уровнем наибольшее потенциально достижимое относительное сокращение энергопотребления на отопление зданий ожидается в Северо-Западном регионе (ориентировочно на 20 %).

В летнее время на протяжении последних 20 лет зафиксирован значительный рост климатически обусловленной потребности в электроэнергии на юге страны (около 150 °С·сут/10 лет). В настоящее время рост реального потребления электроэнергии в летнее время сдерживается недостаточно высокими доходами населения, однако ситуация постепенно меняется. К середине XXI в. ожидается увеличение индекса энергопотребления в теплый сезон в среднем до 700 °С·сут. Это приведет к заметному изменению внутригодовой структуры энергопотребления, которое необходимо учитывать при развитии региональных энергетических систем.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант 14-05-00753).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аверьянов В. К., Байкова С. А., Гориков А. С. и др. (2012). Региональная концепция обеспечения энергетической эффективности жилых и общественных зданий // Жилищное строительство. № 3. С. 2—4.

Александров Г. Н. (2006). Режимы работы воздушных линий электропередач. — Центр подготовки кадров энергетики. СПб. 139 с.

Александровский С. В. (2004). Долговечность наружных ограждающих конструкций. — М.: НИИСФ РААСН. 332 с.

Анапольская Л. Е., Гандин Л. С. (1973). Метеорологические факторы теплового режима зданий. — Л.: Гидрометеониздат. 239 с.

Борщ С. В., Асарин А. Е., Болгов М. В., Полунин А. Я. (2012). Наводнения / В кн.: Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем / Под ред. С. М. Семенова. — Росгидромет. С. 87—125.

Булзгина О. Н., Коришнова Н. Н., Разуваев В. Н. (2013). Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия // Труды ГГО. Вып. 568. С. 156—172.

Васильев Ю. Э., Чистяков И. В. (2011). Сток ливневых вод с территорий населенных пунктов // Жилищное строительство. № 9. С. 50—51.

Ватин Н. И., Немова Д. В., Рымкевич П. П., Горшков А. С. (2012). Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал. № 8. С. 4—14.

Власова Л. В. (2009). Природные факторы при аварийности газопроводов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 3. С. 264—270.

Власова Л. В., Ракитина Г. С. (2010). Результаты статистической обработки информации в целях идентификации природных рисков для газотранспортной системы России и роль климатической информации при управлении рисками в условиях глобального изменения климата // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып. 174. http://meteo.ru/publish_tr/trudy174/st19.htm

Гагарин В. Г., Иванов Д. С., Малявина Е. Г. (2013). Разработка климатической информации в форме специализированного «типового года» // Вестник ВолгГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». Вып. 31 (50). Ч. 1: «Города России. Проблемы проектирования и реализации». С. 343—349.

Гагарин В. Г., Козлов В. В. (2011). Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. № 8. С. 2—6.

Гринфельд Г. И. (2012). Диалектика нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций // Жилищное строительство. № 1. С. 22—24.

Дацюк Т. А. (2009). Инженерные аспекты энергосбережения зданий // Academia. Архитектура и строительство. № 5. С. 326—328.

Ельчищева Т. Ф., Ельчищев М. М. (2012). Влияние режима заморозков на долговечность наружных ограждающих конструкций в Центрально-Черноземном регионе // Жилищное строительство. № 6. С. 32—34.

Заварина М. В. (1976). Строительная климатология. — Гидрометеиздат. 312 с.

Казаков Н. А., Генсировский Ю. В. (2008). Экзогенные геодинамические и русловые процессы в низкорыбе о. Сахалин как факторы риска для нефтегазопроводов «Сахалин-2» // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 6. С. 483—496.

Катцов В. М., Говоркова В. А. (2013). Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. Вып. 569. С. 75—97.

Кнатъко М. В., Ефименко М. Н., Горшков А. С. (2008). К вопросу о долговечности и энергоэффективности современных ограждающих стеновых конструкций жилых, административных и производственных зданий // Инженерно-строительный журнал. № 2. С. 50—53.

Кокодеева Н. Е., Талалай В. В., Аржанухина С. П., Янковский Л. В. (2012). Стандарты долговечного строительства // Жилищное строительство. № 1. С. 14—18.

Котин В. Я. (2012). Каким быть СНИПу по тепловой защите зданий. Развитие и совершенствование норм тепловой защиты зданий // Жилищное строительство. № 3. С. 5—8.

Куприянов В. Н., Иванцов А. И. (2011). К вопросу о долговечности многослойных ограждающих конструкций // Известия КГАСУ. № 3 (17). С. 63—70.

Куприянов В. Н., Иванцов А. И. (2012). Обеспечение долговечности ограждающих конструкций на стадии их проектирования // Жилищное строительство. № 6. С. 35—36.

Лобов О. И., Ананьев А. И. (2008). Долговечность облицовочных слоев наружных стен многоэтажных зданий с повышенным уровнем теплоизоляции // Строительные материалы. № 4. С. 56—59.

Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Под ред. Катцова В. М., Порфирьева Б. Н. (2011). — М.: Росгидромет. 251 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008). Т. 1, 2. — М.: Росгидромет.

Псаломщикова Л. М., Салль И. А., Стадник В. В., Трофимова О. В. (2009). Использование метеорологической информации в целях содержания автомобильных дорог в зимний период // Труды ГГО. Вып. 565.

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики (2008). — СПб: Росгидромет. 336 с.

Самарин О. Д. (2009). Влияние изменения параметров наружного климата на окупаемость энергосберегающих мероприятий // Известия вузов. Строительство. № 6. С. 43—48.

Самарин О. Д. (2012). Предложения по совершенствованию актуализированной редакции СНИП 23-02 // Жилищное строительство. № 6. С. 13—15.

Самодурова Т. В. (2008). Физико-статистические модели для прогноза образования зимней скользкости на дорожных покрытиях // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. № 1. С. 126—129.

Тамразян А. Г. (2012). Анализ риска как инструмент принятия решений строительства подземных сооружений // Жилищное строительство. № 2. С. 6—7.

Технические рекомендации по установлению долговечности (срока службы) строительных материалов и изделий (ТР 165-05) (2005). — М.: ГУП «НИИМОССТРОЙ». 10 с.

Уваров П. П. (2012). Актуальные проблемы тепловой защиты зданий на Севере // Жилищное строительство. № 1. С. 25—27.

Хлебникова Е. И., Салль И. А. (2012). Климатические воздействия на инфраструктуру прибрежных территорий России в первой половине 21 века // Труды ГГО. Вып. 567. С. 83—126.

Хлебникова Е. И., Салль И. А. (2013). Климатические факторы энергопотребления в России: тенденции, вариабельность, неопределенность оценок // Труды ГГО. Вып. 569. С. 7—19.

Хлебникова Е. И., Павлова Т. В., Сперанская Н. А. (2012а). Засухи / В кн.: Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем / Под ред. С. М. Семенова. — Росгидромет. С. 126—164.

Хлебникова Е. И., Салль И. А., Школьник И. М. (2012б). Региональные климатические изменения как факторы влияния на объекты строительства и инфраструктуры // Метеорология и гидрология. № 12. С. 19—34.

Aerts J. C. J. H., Botzen W. J. W. (2011). Climate change impacts on pricing long-term flood insurance: a comprehensive study for the Netherlands // Glob. Environ. Change. V. 21. № 3. P. 1045—1060.

Barclay M., Sharples S., Kang J., Watkins R. (2012). The natural ventilation performance of buildings under alternative future weather projections // Building Serv. Eng. Res. Technol. Sage Publications, Ltd. V. 33. P. 35—50.

Chapman L. (2007). Climate Change and Transport: A Review // Journal of Transport Geography. V. 15. P. 354—367.

Chapman L., Thornes J. E., Huang Y., Cai X., Sanderson V. L. and White S. P. (2008). Modelling of rail surface temperatures: a preliminary study // Theor. Appl. Climatol. V. 92. P. 121—131.

Crawley D. B. (2008). Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance // J. Building Perform Simulation. V. 1. P. 91—115.

Day A. R., Knight I., Gunn D. and Gaddas R. (2003). Improved methods for evaluating base temperature for use in building energy performance lines // Build. Serv. Eng. Res. Technol. V. 24. № 4. P. 221—228.

De Wilde P., Tian W. (2001). Towards probabilistic performance indicators for climate change impact studies // Energ. Buildings. V. 43. P. 3013—3018.

De Wilde P., Tian W. (2009). Identification of key factors for uncertainty in the prediction of the thermal performance of an office building under climate change // Building Simulation. V. 2. № 3. P. 157—174.

De Wilde P., Coley D. (2012). The implications of a changing climate for buildings // Building Environ. V. 55. P. 1—7.

Delfani S., Karami M., Pasdarshahri H. (2010). The effects of climate change on energy consumption of cooling systems in Tehran // Energ. Buildings. V. 42. P. 1952—7195.

Du H., Underwood C. P., Edge J. S. (2012). Generating design reference years from the UKCP09 projections and their application to future air-conditioning loads // Building Serv. Eng. Res. Technol. Sage Publications, Ltd. V. 33. P. 63—79.

Eames M., Kershaw T., Coley D. (2011). The appropriate spatial resolution of future weather files for building simulation // J. Building Perform Simulation. P. 1—12.

Gastineau G. and Soden B. J. (2009). Model projected changes of extreme wind events in response to global warming // Geophys. Res. Lett. V. 36. L10810.

Guan L. (2009). Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings // Building Environ. V. 44. P. 793—800.

Huijbregts Z., Kramer R. P., Martens M. H. J., van Schijndel A. W. M., Schellen H. L. (2012). A proposed method to assess the damage risk of future climate change to museum objects in historic buildings // Building Environ. V. 55. P. 43—56.

Isaac M., van Vuuren D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change // Energy Policy. V. 37. № 2. P. 507—521.

Jack L. B., Kelly D. A. (2012). Property-based rainwater drainage design and the impacts of climate change // Building Serv. Eng. Res. Technol. Sage Publications, Ltd. V. 33. P. 19—33.

Jaroszweski D., Chapman L. and Petts J. (2010). Assessing the potential impact of climate change on transportation: The need for an interdisciplinary approach // Journal of Transport Geography. V. 18. P. 331—335.

Jenkins D. P., Patidar S., Banfill P. F. G., Gibson G. J. (2011). Probabilistic climate projections with dynamic building simulation: predicting overheating in dwellings // Energ. Buildings. V. 43. P. 1723—1731.

Kershaw T., Eames M., Coley D. (2011). Assessing the risk of climate change for buildings: a comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations // Building Environ. V. 46. P. 1303—1308.

Koetse M. J. and Rietveld P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings // Transportation Research. Part D 14. P. 205—221.

Krese G., Prek M., Butala V. (2012). Analysis of Building Electric Energy Consumption Data Using an Improved Cooling Degree Day Method // Journal of Mechanical Engineering. V. 58. № 2. P. 107—114.

Lazo J. K., Lawson M., Larsen P. H. and Waldman D. M. (2011). US economic sensitivity to weather variability // Bulletin of the American Meteorological Society. V. 92. P. 709—720.

Linnerud K., Mideksa T. K. and Eskeland G. S. (2011). The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply // The Energy Journal. V. 32. Issue 1. P. 149—168.

Lisø K. R. (2006). Integrated approach to risk management of future climate change impacts // Building Research & Information: Routledge. P. 1—10.

Lomas K. J., Ji Y. (2009). Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: advanced natural ventilation and hospital wards // Energ. Buildings. V. 41. P. 629—653.

McColl L., Palin E. J., Thornton H. E., Sexton D. M. N., Betts R., Mylne K. (2012). Assessing the potential impact of climate change on the UK's electricity network // Climatic Change. May. P. 821—835. DOI: 10.1007/s10584-012-0469-6012.

Meehl G. A., Covey C., McAvaney B., Latif M. and Stouffer R. J. (2005). Overview of the coupled model intercomparison project // Bull. Am. Meteorol. Soc. V. 86. P. 89—93.

Mideksa T., Kallbekken S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review // Energy Policy. V. 38. № 7. P. 3579—3585.

Mylona A. (2012). The use of UKCP09 to produce weather files for building simulation // Building Serv. Eng. Res. Technol. Sage Publications, Ltd. V. 33. P. 51—62.

Nik V., Sasic Kalagasidis A., Kjellström E. (2012). Statistical methods for assessing and analysing the building performance in respect to the future climate // Building Environ. V. 53. P. 107—118.

Pilli-Sihvola K., Aatola P., Ollikainen M., Tuomenvirta H. (2010). Climate change and electricity consumption — Witnessing increasing or decreasing use and costs? // Energy Policy. V. 38. № 5. P. 2409—2419.

Special Report on Emission Scenarios (2000). A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / N. Nakićenović et al., eds. — Cambridge University Press. 599 p.

Steenbergen R. D. J. M., Koster T., Geurts C. P. W. (2012). The effect of climate change and natural variability on wind loading values for buildings // Building Environ. V. 55. P. 178—186.

Taylor K. E., Stouffer R. J. and Meehl G. A. (2011). A Summary of the CMIP5 Experiment Design (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI)) // Available at http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf.

Tian W., de Wilde P. (2011). Thermal building simulation using the UKCP09 probabilistic climate projections // J. Building Perform Simulation. V. 4. P. 105—124.

Van Vuuren D. P., van Ruijven B., Hoogwijk M. M., Isaac M., de Vries H. J. M. (2006). TIMER 2: model description and application / In: Bouwman A. F., Kram T., Klein

Goldewijk K. (eds.). Integrated Modelling of Global Environmental Change. An Overview of IMAGE 2.4. — Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP). Bilthoven. The Netherlands. P. 39—59.

Wilbanks T., Romero-Lankao P., Bao M., Berkhout F., Cairncross S., Ceron J.-P., Kapshe M., Muir-Wood R., Zapata-Marti R. (2007a). Industry, Settlement and Society / In: Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., Linden P. J. V. D., Hanson C. E. (eds.) // Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge University Press. Cambridge. UK. P. 357—390.

Wilbanks T., Bhatt V., Bilello D. E. (2007b). Final review draft: effects of climate change on energy production and use in the United States, Synthesis and assessment product 4.5. US Climate Change Science Program.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

В. В. Стадник¹, В. В. Елистратов²

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

²Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет
195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
E-mail: elistratov@cef.spbstu.ru

Поступила в редакцию 8.09.2014
Поступила после доработки 22.10.2014

Введение

Возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) считаются те, доступность которых не меняется или же быстро возобновляется при их использовании, изъятии человеком. Речь идет о малой гидроэнергетике (т. е. без учета крупных гидроэлектростанций — ГЭС), солнечной, геотермальной, ветровой, волновой, приливной энергии, а также о тепловой энергии, выделяющейся при горении биомассы. В противоположность ВИЭ, энергия, запасенная в ископаемом топливе — угле, нефти, газе — возобновляется медленно, за геологические времена. Такие источники энергии к возобновляемым — с точки зрения современного потребителя — не относятся.

Интерес к ВИЭ стал увеличиваться во второй половине XX века по двум причинам:

- интенсивное потребление угля, нефти и газа, зависимость современного мирового хозяйства от этих энергоносителей и заметный процесс исчерпания их запасов в перспективе столетий;
- существенное смягчение антропогенного воздействия на климатическую систему при переходе на ВИЭ вследствие того, что их ис-

пользование не связано с эмиссией парниковых газов в атмосферу (ведь даже при сжигании дров в атмосферу выделяется ровно столько углерода, сколько было поглощено и связано в биомассе в процессе роста дерева).

1. Общая характеристика

В 2011 г. Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) был подготовлен «Специальный доклад по возобновляемым источникам энергии и смягчению воздействий на изменение климата» (СДВИЭ), в англоязычной оригинальной версии SRREN — «IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation» (2011). Он приобрел особую важность, поскольку правительства многих стран рассматривают вопрос о роли возобновляемых источников энергии в контексте своих усилий по смягчению воздействий на изменения климата путем уменьшения выброса парниковых газов при использовании ископаемого топлива.

На начало XXI века доля возобновляемой энергетики без крупных гидроэлектростанций в мировом потреблении составляла около 10—11 %. К 2020 г. ожидается удвоение мирового рынка экологически чистых технологий и увеличение вклада «зеленой» экономики в мировой ВВП до 6—7 %. В частности, к 2019 г. только в трех секторах энергетики, использующей в качестве источников биотопливо, ветер и солнце, прогнозируется увеличение производства до 343 млрд долл., количества занятых — до 3,3 млн человек, что, соответственно, почти в 2,4 и 4 раза больше, чем в 2009 г. (Hoogwijk, 2009).

В России за период с 2000 по 2003 г. выработка электрической энергии всеми видами электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии, увеличилась с 4,2 млрд кВт·ч до 5,4 млрд кВт·ч, что составляет 0,6 % от общей выработки электроэнергии (Безруких, Стребков, 2005). В 2012 году доля ВИЭ в общей выработке электроэнергии составила 1,1 % (Безруких, 2012; Елистратов, 2013).

По данным Госкомстата в России на 2007 год общая доля ВИЭ всех видов в суммарной выработке тепловой энергии составила около

5 %, а электрической (без крупных ГЭС) около 0,9 % (Статистический сборник, 2007).

Согласно государственной программе Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики», откорректированной и утвержденной распоряжением Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 512-р, доля ВИЭ в выработке электрической энергии к 2020 г. должна составить 2,5 %.

Практически в любом российском регионе уже сегодня можно использовать тот или иной вид возобновляемых источников энергии. Так, наиболее перспективными для развития гелиоэнергетики являются южные районы Европейской части России (ЕЧР), а также юг Сибири и Дальнего Востока. Побережья Северного Ледовитого океана и дальневосточных морей обладают высоким потенциалом ветровой энергии. Что касается малой гидроэнергетики и производства биотоплива, то природные условия для развития этих отраслей существуют почти на всей территории страны (табл. 1).

Таблица 1

**Ресурсы возобновляемых источников энергии России, ТВт·ч/год
(Бальзаминов, Елистратов, 2008)**

Вид источника энергии	Потенциал		
	теоретический	технический	экономический
Вода (малая гидроэнергетика*)	2930	1017	529
Солнце (гелиоэнергетика)	18700000	18720	102
Ветер (ветроэнергетика)	212000	16280	81
Биомасса	81400	431	285
Недра Земли (геотермальная энергетика)	180	20	936
Итого по ВИЭ	18996510	36468	1933

Примечание.

* — без крупных гидроэлектростанций.

Несмотря на наличие в России больших ресурсов различных видов ВИЭ, масштабного использования возобновляемых источников энергии пока нет. Однако в настоящее время придается определенный импульс их развитию.

В ближайшие десятилетия использование возобновляемых источников энергии согласно «Энергетической стратегии России на 2030 г.» (2009) будет развиваться в Южном федеральном округе, на севере Сибирского федерального округа, в Прибайкалье и других районах децентрализованного энергообеспечения. В Дальневосточном федеральном округе преодоление дефицита тепло- и электроэнергии будет происходить как за счет дальнейшего развития традиционной гидроэнергетики, так и за счет стимулирования развития возобновляемых источников энергии.

К стратегическим целям России по расширению использования ВИЭ и местных видов топлива следует отнести:

- обеспечение устойчивого тепло- и электроснабжения населения и производства в зонах децентрализованного энергоснабжения, в первую очередь, в районах Крайнего Севера и на приравненных к ним территориях;

- создание в этих регионах независимых энергопроизводителей, что позволит повысить надежность энергоснабжения, предотвратить ущерб от аварийных и ограничительных отключений, который сейчас оценивается миллиардами долларов США в год;

- снижение вредных выбросов от традиционных энергетических установок в отдельных городах и населенных пунктах со сложной экологической обстановкой, а также в местах массового отдыха населения;

- создание дополнительных рабочих мест на всех стадиях реализации проектов по возобновляемой энергетике.

Развитию возобновляемой энергетики в России пока препятствует целый комплекс барьеров психологического, экономического, законодательного, информационного и технического характера. При этом приоритет принадлежит психологическому аспекту, связанному, в

первую очередь, с привычкой к централизованным поставкам топлива, тепла и электричества, а также с традиционными представлениями об обеспеченности России большими запасами всех видов органического топлива на обозримый период.

Доступность ВИЭ во многом зависит от климата, глобальное изменение которого будет воздействовать на их ресурсную базу, но точная природа и масштаб таких последствий пока не оценены. Вопросу чувствительности ВИЭ к изменению климата посвящено много исследований, но они находятся на начальном этапе. Во многих работах отмечается, что климатообусловленное изменение ресурсного потенциала солнечной, ветровой и биоэнергии будет носить преимущественно региональный характер, а на объем и географическое распределение геотермальных и океанических энергетических ресурсов изменение климата не окажет значительного воздействия (Елистратов, Кобышева, Сидоренко (ред.), 2010; Чернокульский, 2012; Pryor, Schoof, 2010; Breslow, Sailor, 2002; Martínez et al., 2007; Burnett, Harrison, 2009; Crook, 2011).

2. Солнечная энергия

2.1. *Оценки ресурсов солнечной энергии*

Солнце является основным источником энергии на Земле. Поток солнечной энергии, проходящей в виде излучения в единицу времени через площадку в 1 м^2 , перпендикулярную прямой, проведенной через центры Земли и Солнца, на входе в атмосферу Земли составляет 1367 Вт/м^2 — «солнечная постоянная». Поток солнечной энергии, поступающий на верхнюю границу атмосферы, составляет в среднем 341 Вт/м^2 , на земную поверхность 184 Вт/м^2 (Trenberth et al., 2009). Это излучение, в основном, в диапазоне длин волн $0,3\text{—}2,5 \text{ мкм}$, называется коротковолновым; этот диапазон включает видимую часть спектра.

Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, составляет $(7,5\text{—}10) \cdot 10^{17} \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$ и превышает энер-

гию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана (Виссарионов и др., 2008).

Основными характеристиками солнечных энергетических ресурсов в заданном пункте или районе являются продолжительность солнечного сияния и количество суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность.

Продолжительность солнечного сияния (суммарное число часов, когда светит солнце) определяется широтой места, долготой дня и количеством облаков.

На территории России в целом за год наибольшее — более 2400—2600 — число часов солнечного сияния характерно для Забайкалья, Амурской области и юга Приморского края, а наименьшее — 1200 часов и менее — для северных прибрежных районов Камчатки и Курильских островов (рис. 1) (Кобышева и др. 2001). Территории, где годовая продолжительность солнечного сияния ≥ 2000 часов считаются благоприятными для практического использования солнечной энергии (Стребков, 1993).

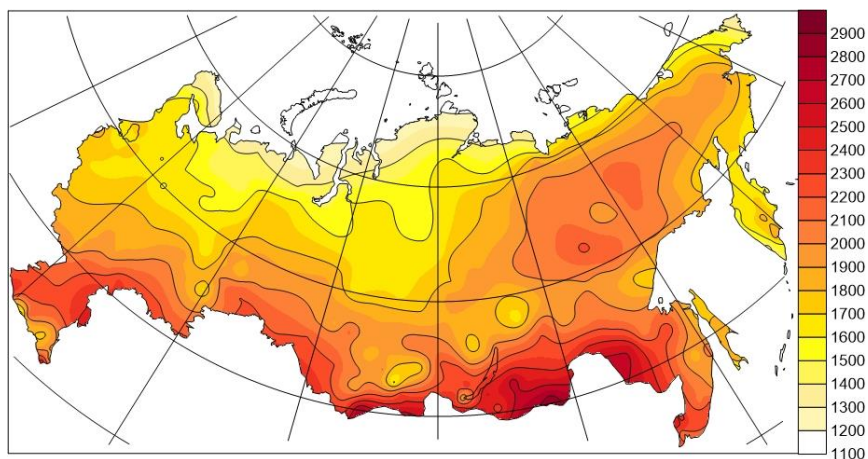


Рис. 1. Продолжительность солнечного сияния за год (часы).

Суммарная солнечная радиация, представляет собой сумму потока прямого солнечного излучения S , поступающего непосредственно от

Солнца, и потока рассеянного солнечного излучения, приходящего от толщи атмосферы D . Последний возникает вследствие молекулярного и аэрозольного рассеяния солнечного излучения и его диффузного отражения от облаков.

Под валовым потенциалом солнечной энергии в заданной точке земной поверхности обычно понимается среднемноголетняя величина солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность площадью один квадратный метр за период, равный одному календарному году.

При безоблачном небе прямая и суммарная солнечная радиация увеличивается с севера на юг. Из-за различий в прозрачности атмосферы приход солнечной радиации в целом на Азиатской части России (АЧР) больше, чем на ЕЧР (Пивоварова, 1977; Пивоварова, Стадник, 1988).

Облачность снижает реальный месячный и годовой приход суммарной радиации. Самые большие отклонения суммарной радиации при реальной облачности от возможной характерны для северо-запада ЕЧР, где сильно влияние влажных атлантических воздушных масс, и Дальнего Востока. Летом в дальневосточном регионе в условиях муссонной циркуляции фактический приход суммарного потока солнечной радиации на 40—60 % меньше возможного при безоблачном небе.

При оценке гелиоэнергетических ресурсов для проектирования солнечных энергетических установок, в том числе с концентраторами солнечного излучения, важно знать долю прямой и рассеянной радиации в суммарном приходе (в устройствах с концентраторами усиливается лишь прямая составляющая солнечной радиации, сконцентрировать рассеянную составляющую практически невозможно).

При действительных условиях облачности в России вклад прямой радиации в суммарный приход достигает максимума в летние месяцы и составляет в среднем 50—60 %, за исключением районов Приморского края, где наибольший вклад прямой радиации в суммарную приходится на осенние и зимние месяцы (60—65 %). Доля рассеянной радиации самая большая на побережье северных морей (60—70 %). В

умеренных широтах и на юге Дальнего Востока рассеянная радиация составляет около половины суммарной.

Обеспеченность солнечными ресурсами территории России иллюстрирует рис. 2, на котором приведена современная карта годовых сумм суммарной радиации. Она построена по данным актинометрической сети за период с 1981 по 2000 год (Стадник и др., 2013). Как видно из представленной карты, практически вся южная часть России обладает достаточно высокими солнечными ресурсами, которые могут быть использованы для выработки электрической и тепловой энергии.

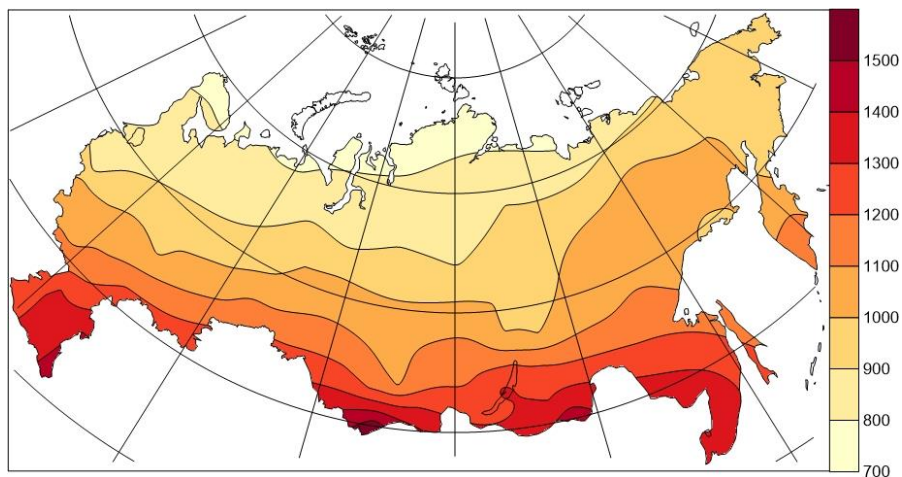


Рис. 2. Годовая сумма суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$).

Годовой приход суммарной солнечной радиации возрастает в целом с севера на юг в соответствии с астрономическим фактором — ростом высоты Солнца. Однако влияние циркуляционного фактора, проявляющееся через облачность, и прозрачности атмосферы нарушают строгое широтное распределение. В результате этого количество приходящей к земной поверхности радиации в южной половине ЕЧР и на северо-востоке АЧР практически одинаково. Такой характер распределения приходящей радиации еще более резко выражен в ве-

сенне-летний период, особенно в апреле и мае, когда месячные суммы суммарной радиации в северных районах Якутии так же высоки, как на северном Кавказе и в Астраханской области — более $165 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ($600 \text{ МДж}/\text{м}^2$).

Наибольшая изменчивость годового прихода суммарной радиации характерна для северных и северо-западных районов ЕЧР, а наименьшая — для южной половины АЧР (коэффициент вариации годовых сумм соответственно 12 и 4—6 %).

Подробный анализ климатических изменений солнечной радиации и определяемых эти изменения характеристик облачности и прозрачности атмосферы по данным актинометрической сети России на временном интервале 1961—2010 гг. приводятся в статье Хлебниковой в настоящем сборнике.

2.2. Технологические особенности использования солнечной энергии

Существует три основных направления использования солнечной энергии: преобразование в тепло на установках для отопления и горячего водоснабжения с помощью солнечных коллекторов, прямое преобразование в электрическую (фотоэлектричество) и преобразование солнечной энергии в электрическую по термодинамическому циклу (*солнечные термодинамические электрические станции*). При термодинамическом способе происходит последовательное преобразование солнечной энергии в теплоту, а затем и в электроэнергию. Наиболее наукоемким и технологичным направлением солнечной энергетики в конце XX века признано фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. В производстве солнечных фотоэлектрических модулей в мире и снижении их удельной стоимости отмечается колоссальный прогресс (Geyer, Quaschnig, 2000).

В настоящее время в мире установлено свыше 250 тысяч фотоэлектрических систем различной мощности, обеспечивающих энергией более 1,5 миллионов жителей планеты. Пиковая мощность таких систем достигла 1400 МВт, а выработка энергии — около 2,3 млрд

кВт·ч. Лидерами в производстве фотоэлектрических модулей являются Япония, США, Германия, Индия.

Объем производства фотоэлектрических модулей в России пока очень мал — ниже 1 МВт в год (Тарнижевский и др., 2001).

Согласно выполненному в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) районированию территории России по потенциалу солнечных ресурсов (Пивоварова, Стадник, 1988; Борисенко, Стадник, 1997) наиболее благоприятными условиями для использования фотоэлектрических модулей обладают южные районы Хабаровского края, Амурская область, Приморский край, Забайкалье и юг Алтайского края. В этих районах с 1 м² приемной поверхности фотоэлектрической установки, оптимально ориентированной к солнечным лучам и имеющей КПД 15 %, можно получить около 200 кВт·ч/м² электроэнергии за год (Стадник, Разгоняев, 2008) (рис. 3).

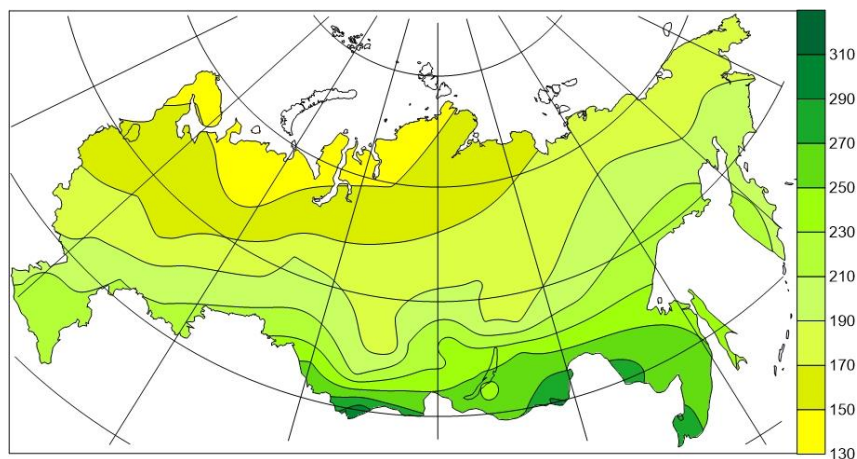


Рис. 3. Удельная годовая выработка электрической энергии фотогенератором при КПД 15 % (кВт·ч/м²).

Высокая стоимость производства солнечных фотоэлектрических модулей и низкий КПД являются главным препятствием на пути их использования в России для электроснабжения в быту и промышлен-

ности. Их широкое внедрение рассматривается пока лишь в долгосрочной перспективе.

Тем не менее, в России уже имеются отдельные реализованные проекты по вводу в эксплуатацию солнечных электростанций (СЭС). В 2010 г. введена первая в стране солнечная электростанция (100 кВт) в Белгородской области (стоимость 1 кВт·ч составляет 9 руб.). В 2011 г. в Якутии в Кобяйском районе установлена СЭС мощностью 10 кВт, в 2012 г. на «полюсе холода» — в Оймяконском районе — была запущена вторая СЭС.

В настоящее время и в близкой перспективе в России наиболее реальным направлением использования солнечной энергии является теплоснабжение. Солнечные водонагревательные установки на базе солнечных коллекторов имеют небольшие сроки окупаемости и хорошие экологические показатели (Тарнижевский, 1996).

Существующие методики позволили оценить возможную удельную выработку тепловой энергии в разных регионах страны с использованием отечественных солнечных коллекторов (Бекман и др., 1982) (рис. 4).

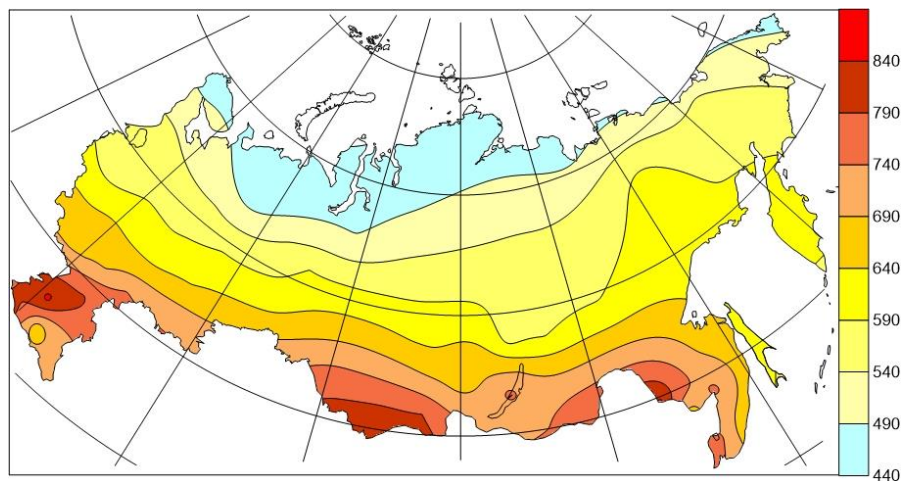


Рис. 4. Удельная годовая выработка тепловой энергии плоским солнечным коллектором ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$).

В Южном и Северо-Кавказском федеральных округах, обладающих высоким солнечным потенциалом, удельная выработка тепловой энергии солнечным коллектором с жидким теплоносителем за безморозный период достигает $800\text{—}850 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. В более северных густонаселенных промышленных областях России (до 60° с. ш.), где весьма актуальным является вопрос об энергосбережении, удельная выработка тепловой энергии составляет $550\text{—}700 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Это позволяет применять солнечные коллекторы при коттеджном строительстве для разработок новых современных проектов «гелиоархитектуры», а также в качестве приставок для котельных и тепловых электростанций (ТЭЦ).

Показателем развития солнечной тепловой энергетики является суммарная площадь солнечных коллекторов. На 2000 г. в мире эксплуатировалось 70 млн м^2 солнечных коллекторов. В России солнечные коллекторы пока не получили столь широкого применения. В настоящее время работает около 15 тыс. м^2 гелиоустановок, что на порядок меньше, чем было в СССР в 1990 г. (150 тыс. м^2). Российские солнечные коллекторы сосредоточены, в основном, в Краснодарском крае и Бурятии.

В Краснодарском крае в летнее время 200 МВт установленной мощности местных электростанций используется на электронагрев. Эту мощность могут обеспечить и гелиоустановки. Для этого потребуются построить 100 тыс. м^2 солнечных коллекторов. В последние годы в Краснодарском крае было введено в эксплуатацию более 100 гелиоустановок с общей площадью солнечных коллекторов, превышающей 6000 м^2 . Половина из них применяется для горячего водоснабжения санаториев и пансионатов. В Бурятии действует 70 установок площадью 3000 м^2 (Бутузов, Шетов, 2008).

Как показали расчеты (Елистратов, Кобышева, Сидоренко (ред.), 2010), коэффициент замещения нагрузки горячего водоснабжения за счет энергии солнца (доля солнечной энергии в покрытии нагрузки горячего водоснабжения) в южных широтах России составляет более 75 %, а в средних — 55—60 %.

Недостаточное использование гелиоустановок обусловлено в значительной мере экономическими причинами. Стоимость установок находится в пределах 30—90 тыс. руб. Срок окупаемости солнечных коллекторов небольшой — около 5—7 лет, реальный срок их службы 25—30 лет. При существующих и постоянно растущих ценах на органическое топливо перспективы использования энергии Солнца в России связываются именно с выработкой тепловой энергии на базе плоских солнечных коллекторов.

2.3. Влияние изменений климата на гелиоэнергетические ресурсы

Для эффективного планирования развития солнечной энергетики в России необходимо иметь оценки не только естественной изменчивости потока солнечной радиации как источника энергии на Земле (Пивоварова, Стадник, 1988), но и оценить солнечные ресурсы в XXI веке в связи с глобальными климатическими изменениями.

Согласно (IPCC, 2011, стр. 341—343), в настоящее время нет убедительных оценок, указывающих на существенное влияние глобального потепления на региональные солнечные ресурсы Земли.

Как, например, отмечено в работе (Burnett, Harrison, 2009), в Великобритании к 2050 г. суммарный годовой приход солнечной радиации возрастет в среднем на 2,6 % (диапазон изменения по территории будет в пределах от –1,1 % до + 6,5 %) по отношению к базовому периоду 1961—1990 гг. В отдельные месяцы прогнозируемое изменение солнечной радиации будет характеризоваться большей неопределенностью — оценки находятся в более широких пределах, но не более ± 25 % от значения базового периода.

Аналогичные выводы были получены для Мексики. Оценки, выполненные с помощью тринадцати моделей общей циркуляции, показали, что изменение месячного потенциала солнечной энергии к 2050 г. по отношению к базовому периоду 1971—2000 гг. также не выйдет за пределы ± 20 % (Martínez et al., 2007).

Рассмотрим теперь возможные изменения суммарных ресурсов солнечной энергии, оцененные как средние для ансамбля 31 модели

СМIP5 (здесь и далее эта группа моделей обозначением AN_31). Расчеты проводились в условиях сценария RCP 4.5 антропогенного воздействия на климатическую систему для трех периодов времени: 2011—2030 гг., 2041—2060 гг. и 2080—2099 гг. В качестве базового периода был принят 1981—2000 гг. (Мелешко, Говоркова, 2013).

В начале XXI века (2011—2030 гг.) ожидается рост годового прихода суммарной солнечной радиации (до 2 %) на ЕЧР, за исключением крайних северо-восточных районов, а также южной части Уральского и Сибирского Федеральных Округов (рис. 5).

В южной части Северо-западного федерального округа, в Центральном, Южном и Северо-Кавказском федеральных округах ожидается рост ресурсов солнечной энергии до 4 %. Практически на всей АЧР ожидается их снижение, причем интенсивность снижения будет возрастать в восточном направлении от 2 до 4 %, а на островах северных морей и на Чукотке годовой приход суммарной радиации уменьшится до 6 %. Уменьшение суммарного прихода солнечной радиации в восточной части страны будет происходить практически в течение всего года, а в западной части только в зимние месяцы (декабрь, январь, февраль), но на общем годовом приходе суммарной радиации в этом регионе это не скажется.

Аналогичная картина в годовом приходе солнечной радиации будет наблюдаться и в середине века (2041—2060 гг.), однако летом рост потока солнечной радиации будет более интенсивным, чем в первые десятилетия XXI века. Летний очаг положительной аномалии (2—4 %) распространится практически на всю Россию, за исключением северных и северо-восточных районов АЧР, где аномалия будет слабо отрицательной (не ниже –2 %). На ЕЧР, в южных районах Северо-западного федерального округа и севере Центрального федерального округа ожидаемый рост составит 6 %. В зимние месяцы приход радиации будет понижен по сравнению с базовым периодом на большей части страны на 4 %, а в центральных областях ЕЧР ожидаемая отрицательная аномалия будет более глубокой (до –6 %).

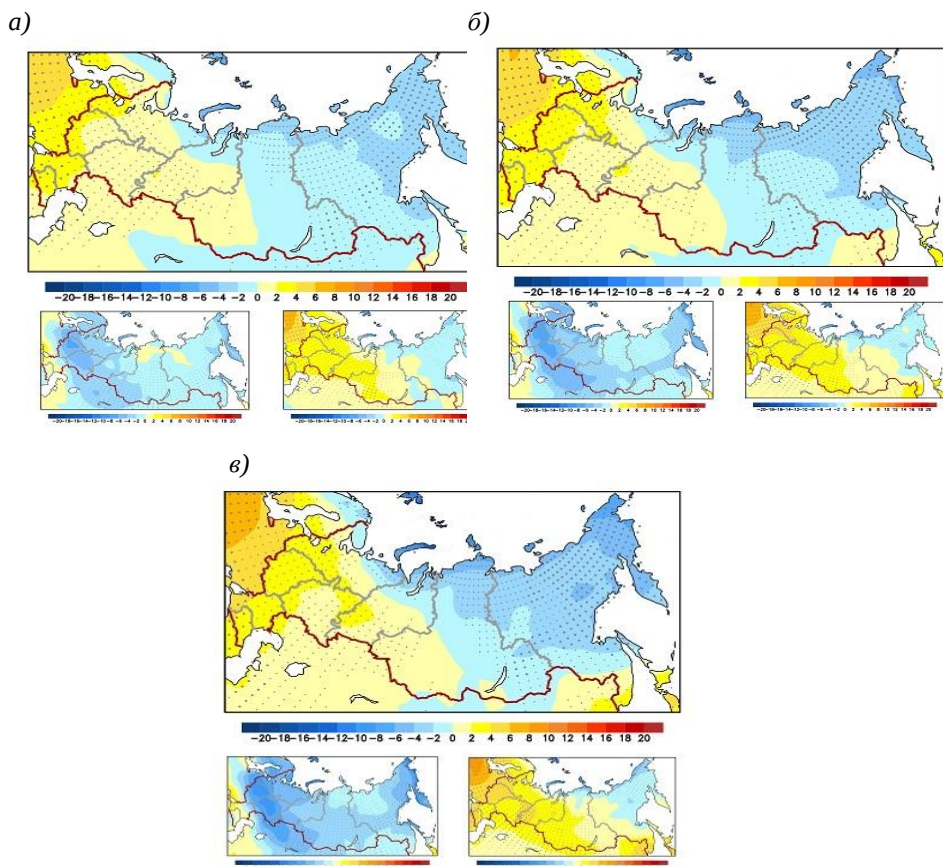


Рис. 5. Изменения (%) годового и сезонных потоков суммарной солнечной радиации, рассчитанные по ансамблю AN 31 в условиях сценария RCP 4.5 для 2011—2030 гг. (а), 2041—2060 гг. (б) и 2081—2099 гг. (в) по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг.

Не произойдет существенных изменений в годовом приходе солнечной радиации и к концу XXI века (2081—2099 гг.). По-прежнему практически вся территория ЕЧР, южная половина Уральского и Сибирского федеральных округов будут в зоне довольно слабой положительной аномалии (2—4 %), а восточные регионы — в зоне отрица-

тельной. В Дальневосточном федеральном округе ожидается более глубокая аномалия (до $-4\ldots-6\%$).

Проиллюстрируем влияние происходящих климатических изменений в приходе суммарной солнечной радиации на примере изменения удельной выработки тепловой энергии солнечными коллекторами, которая напрямую зависит не только от количества солнечной радиации, поступающей на его приемную поверхность, но и температуры окружающего воздуха (Бекман и др., 1982; Тарнижевский, 1996).

На приведенном выше рис. 4 удельная выработка тепловой энергии солнечным коллектором рассчитана для базового периода 1981—2000 гг. Ожидаемое изменение поступления солнечной радиации на земную поверхность может повлиять на эффективность работы солнечных коллекторов (рис. 6).

Во всех трех упомянутых периодах времени изменение эффективности выработки энергии тепловыми коллекторами будет происходить, главным образом, в соответствии с изменением потока поступающей на приемную поверхность солнечной радиации, о которых говорилось выше. В первые десятилетия XXI века возможно небольшое увеличение удельной выработки тепловой энергии на ЕЧР и в Западной Сибири (от 20 до 40 кВт·ч/м²), а на побережье Охотского моря и на Чукотке применение солнечных коллекторов станет нерентабельным — удельная выработка может снизиться на 10 кВт·ч с квадратного метра установки. Прогнозируемый рост температуры воздуха не сможет перекрыть эффекта уменьшения потока солнечной радиации.

К середине XXI столетия и особенно к его концу, согласно модельному прогнозу, рост температуры будет более интенсивный, что положительно скажется на работе солнечных коллекторов даже в Дальневосточном федеральном округе, где приход солнечной радиации уменьшится. В западных и южных районах ЕЧР производительность работы солнечного коллектора увеличится более, чем на 50—60 кВт·ч с каждого квадратного метра установки.

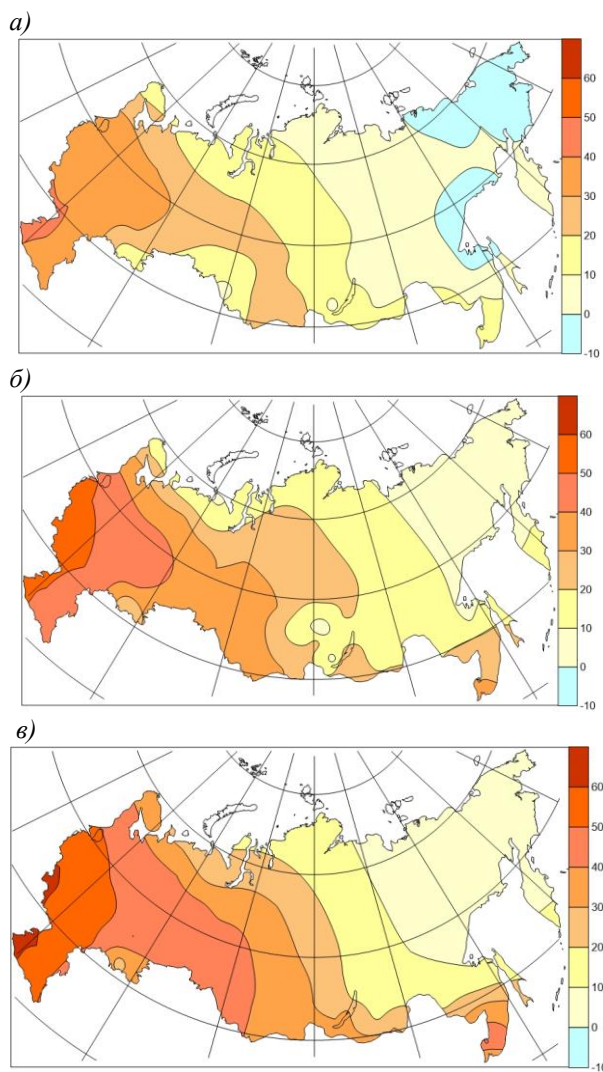


Рис. 6. Изменения ($\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$) удельной выработки тепловой энергии солнечным коллектором для периодов 2011—2030 гг. (а), 2041—2060 гг. (б) и 2080—2099 гг. (в) по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг.

Приведенные оценки выполнены с использованием современных технических параметров коллекторов. Они могут измениться при достижении прогресса в технологиях создания приемных поверхностей солнечных установок.

3. Ветровая энергия

Ветер является одним из источников энергии, которая может быть утилизирована в значительных масштабах. Ветровая энергия наиболее дешевая из возобновляемых видов энергии. В местах с хорошими ветровыми условиями ветроэнергетика успешно конкурирует с традиционными топливными и атомными электростанциями.

Согласно оценкам, полученным исходя из средних многолетних значений скорости ветра, мировой технический потенциал ветровой энергии на суше и в прибрежных акваториях составляет $10 \cdot 10^{20}$ Дж/год (Доклад Консультативного совета Германии по глобальным проблемам (WBGU), 2003).

Большая доля в мировом ветропотенциале приходится на морские ветроэнергетические ресурсы, активно осваиваемые за рубежом. Для оффшорных ветровых электростанций — ВЭС (станции морского базирования) может быть использовано до $150\,000 \text{ км}^2$ шельфовых акваторий с глубиной до 35 м. Их суммарный ветровой потенциал достаточен для покрытия электропотребления, например, всей Европы (Snyder, Kaiser, 2009).

Согласно программе «Wind Force 12» (European wind association and Greenpeace) производство электроэнергии за счет энергии ветра в 2020 г. должно достичь 13 % от общего производства электроэнергии в мире.

В 2009 г. на ВЭС в мире было выработано около 340 ТВт·ч электроэнергии, что составило около 2 % общей суммы произведенной электроэнергии. В отдельных странах это соотношение значительно больше. Например, в Дании около 20 % электроэнергии вырабатывается ВЭС, в Португалии — 15 %, Испании — 14 %, Германии — 9 %.

Россия в развитии ветроэнергетики занимает пока очень низкие позиции.

Оценка технического ветроэнергетического потенциала России (Николаев и др., 2009), основывается на многолетних метеорологических и аэрологических данных, исходит из минимального расстояния между ветроэнергетическими установками, равного $10 \cdot D$ (D — диаметр ветроколеса ВЭУ (Vestas V90), $D_{v90} = 90$ м) и допустимой площади отвода земли под ВЭУ (12 % от общей площади территории страны). Эта оценка показала, что технический потенциал ветроэнергетических ресурсов РФ почти в 14 раз превышает сегодняшнюю годовую выработку энергии всеми электростанциями страны — приблизительно 1000 ТВт·ч/год). Суммарная выработка установленных в России ВЭУ составляет около 180—200 ТВт·ч/год, что примерно в 70 раз меньше полученной оценки технического потенциала ветроэнергетических ресурсов.

В таблице 2, построенной по данным работы Старкова, Ландберга и др. (2000), приведены оценки технического потенциала федеральных округов России.

Таблица 2

**Технический потенциал ветроэнергетических ресурсов
по федеральным округам России**

Федеральный Округ	Технический потенциал, млрд. кВт·ч/год
Центральный	735
Северо-западный	1785
Южный	705
Приволжский	1092
Уральский	1971
Сибирский	3442
Дальневосточный	4611
Итого	16 500

Как видно из таблицы, хорошо обеспечены ветроэнергетическими ресурсами окраинные федеральные округа (Северо-Западный, Сибирский, Дальневосточный). Округа с развитой индустрией и большой плотностью населения (Центральный, Южный) обладают относительно меньшим техническим ветропотенциалом, что во многом обусловлено относительно малыми площадями их территорий.

Богатый ветроэнергетический потенциал во многих районах России создает все предпосылки к ускоренному развитию и внедрению ветроэнергетических станций.

Несмотря на то, что успехи в освоении ветроэнергетических установок в России до сих пор невелики, следует отметить положительные тенденции в решении этой проблемы. Ниже (табл. 3) приведены действующие ветроэнергетические станции и их мощности (Николаев и др., 2008).

Энергия ветра, которая может быть использована системой ветроэнергетических установок (ВЭУ), характеризуется средней годовой удельной мощностью горизонтальной составляющей ветрового потока и имеет размерность Вт/м². Мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра (Николаев и др., 2009).

Таблица 3

Основные действующие ветроэнергетические станции (ВЭС) в России

ВЭС	Мощность	Оборудование
Воркутинская	1,25 МВт	250кВт×5
Калмыцкая	2 МВт	1МВт×2
Куликовская	5,1 МВт	21ВЭУ(225 кВт ×20, 600 кВт× 1)
Анадырская	2,5 МВт	250 кВт ×10
Башкирская	2,2 МВт	550 кВт ×4
о. Беринга	0,5 МВт	250 кВт ×2
Ростовская	0,3 МВт	30 кВт ×10

На рис. 7 представлена карта фоновое районирования территории России по удельной мощности ветрового потока на высоте 100 м.

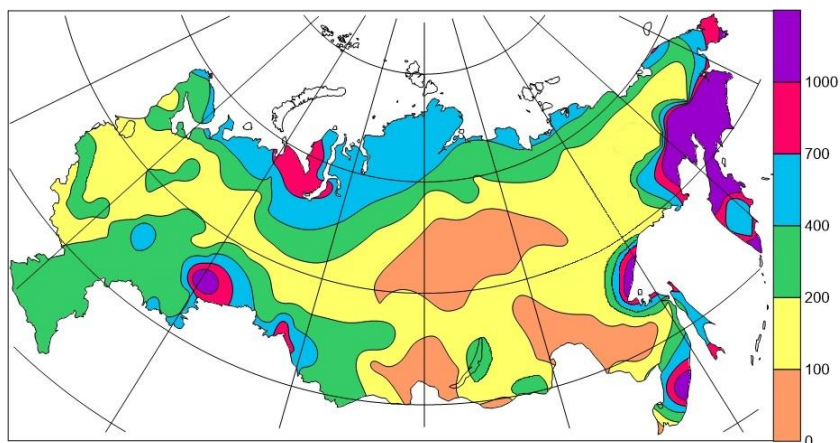


Рис. 7. Фоновое районирование территории России по значениям удельной мощности ветрового потока (Вт/м^2) на уровне 100 м над земной поверхностью.

В связи с созданием и внедрением, как в настоящее время, так и в перспективе, ВЭУ мегаваттного класса мощности $\approx 2\text{—}5$ МВт с высотой башен 80—130 и более метров, наибольший практический интерес представляет расчет удельной мощности ветрового потока на высоте именно 100 м. Существенным основанием для выбора высоты 100 м является также то, что эта высота является нижней границей планетарного пограничного слоя атмосферы и наличием для нее многолетних данных аэрологических измерений.

Как видно из представленной карты, наибольшим ветроэнергетическим потенциалом обладают районы вдоль берегов Карского, Берингова и Охотского морей. Значительные ресурсы находятся в районах Среднего и Нижнего Поволжья, в степных районах Западной Сибири.

Эффективность работы ветроэнергетических установок напрямую зависит от скорости ветра, которая обладает выраженной временной

изменчивостью. Исследование временной изменчивости скорости ветра за период 1960—2000 гг. показало, что в последние 15—20 лет этого периода произошло усиление ветровой активности в южной половине Восточной Сибири, особенно в Иркутской области и на севере Читинской области, на юго-западе Якутии, а также на обширных участках прибрежных зон Северного Ледовитого океана и Охотского моря. В перечисленных районах скорость ветра возросла в среднем на 15—20 % (Белокрылова, 1989; Борисенко и др., 2008). Заметное уменьшение скорости ветра (от 10 до 20 %) отмечалось на большей части ЕЧР (исключая ее крайний юг), в южных районах Западной Сибири, на севере Иркутской области, на большей части Республики Саха — Якутия, в Хабаровском и Приморском краях.

Особо следует отметить, что падение средней скорости ветра сочеталось с увеличением повторяемости слабых ветров (так называемых «энергетических» штилей) и уменьшением повторяемости «буревых» скоростей; исключения наблюдались лишь в некоторых прибрежных зонах (побережья Камчатки и Приморского края, о. Сахалин).

Также не отмечалось уменьшение повторяемости сильных ветров (со скоростью ≥ 20 м/с) на побережьях Ладоги и Финского залива. Над северной Европой повторяемость сильных ветров во второй половине XX века даже возросла, особенно в зимний сезон (Pryor et al., 2005).

Повторяемость «энергоактивных» скоростей ветра (≥ 5 м/с), то есть ветров умеренных, при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, в последние 20 лет XX столетия в России мало изменилась по сравнению с предшествующими десятилетиями.

Были выполнены расчетные оценки (рис. 8) изменения среднегодовой скорости ветра у земной поверхности ($h = 10$ м), рассчитанные на ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) и середину XXI века (2041—2060 гг.) как средние по ансамблю 25 МОЦАО CMIP5 в процентах от значения для базового периода 1991—2010 гг.

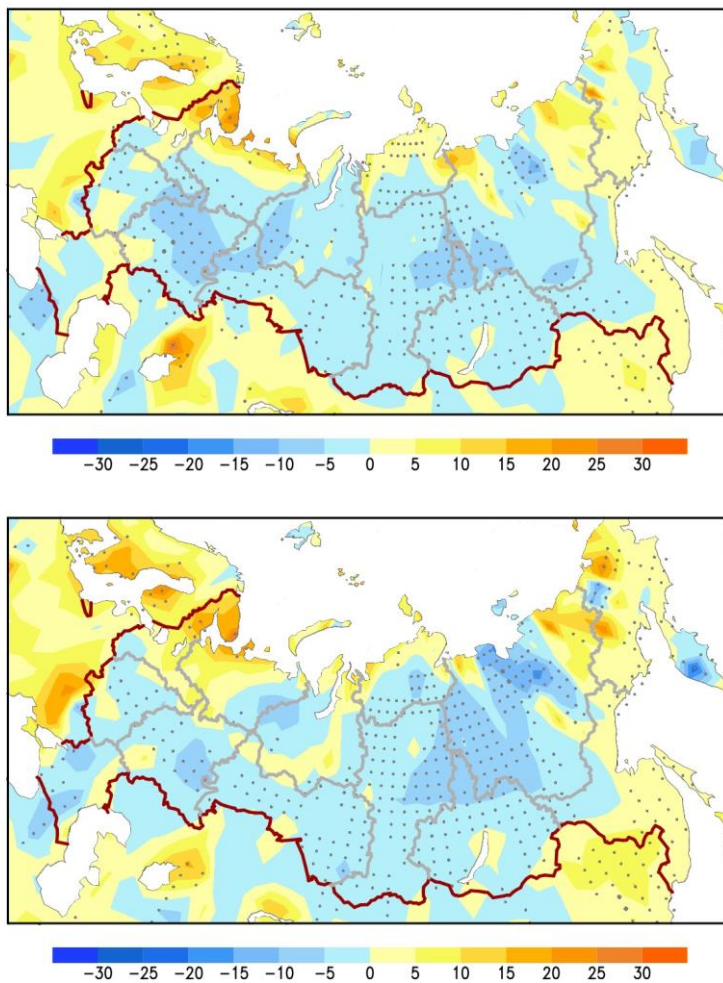


Рис. 8. Изменения среднегодовой скорости ветра у поверхности земли ($h = 10$ м), рассчитанные на период 2021—2040 гг. (наверху) и 2041—2060 гг. (внизу) по ансамблю 25 МОЦАО CMIP5, в процентах по отношению к базовому периоду 1991—2010 гг.

Существенных изменений в приземных скоростях ветра на большей части территории России в ближайшие десятилетия XXI века выявлено не было. По-прежнему ожидается небольшое снижение приземной скорости ветра в континентальной части России, которое составит не более 5 % и только в отдельных областях восточной части Европейской территории России, на Урале и в центре Азиатской территории прогнозируется более значительное снижение, но оно не превысит 10 %.

На побережьях северных морей, в Магаданской области, на Чукотке, на побережье Охотского моря скорости ветра возрастут до 5—10 %. Наибольший рост среднегодовой скорости ветра ожидается в прибрежных северных районах Европейской части до 10—15 %, а на Кольском полуострове до 20 %. Аналогичный характер поля приземного ветра сохранится и к середине XXI века (Мелешко и др., 2008; Мелешко, Говоркова, 2013).

Приведенные результаты достаточно хорошо согласуются с зарубежными данными модельных оценок, согласно которым изменение среднегодовой скорости ветра более, чем на ± 25 % на большей части Европы представляется маловероятным. К концу двадцать первого века прогнозируется небольшое снижение средней скорости ветра по сравнению с контрольным периодом 1961—1990 гг. и возможно увеличение экстремальных скоростей ветра.

Согласно модельным прогнозам, в отличие от осадков и температуры, изменение ветра мало по сравнению с естественной изменчивостью, а неопределенность прогнозируемых изменений ветра остается относительно высокой (Palutikof и др., 1987, 1992; Breslow, Sailor, 2002; Pryor и др., 2005, 2006; Walter и др., 2006; Bloom и др., 2008; Sailor и др., 2008; Pryor, Schoof, 2010).

Среди отрицательных воздействий на окружающую среду выделяют следующие: влияние на птиц и животных, шумовое воздействие, влияние на работу телекоммуникационных устройств, визуальное восприятие в ландшафте, потребность в земле для размещения ВЭУ и эрозия почв (Дмитриев, 2004).

Следует отметить, что никакие аварийные ситуации на ветроэнергетических станциях не могут иметь катастрофических последствий для окружающей среды в отличие от АЭС и крупных ГЭС.

4. Биоэнергия

Биомасса — мощный потенциальный мировой источник энергии и топлива. Первично она образуется, в основном, в процессе фотосинтеза (очень немного – в процессе хемосинтеза), когда растения, используя воду, элементы минерального питания, диоксид углерода CO_2 и энергию солнечных лучей образуют первичную продукцию биомассы. Она впоследствии распределяется по более высоким трофическим уровням в экосистемах, а отмирающие организмы образуют детрит (мертвое органическое вещество), который в процессе деструкции в конце концов превращается в воду, CO_2 и минеральные вещества. Энергия Солнца, запасенная в биомассе в ходе фотосинтеза и последующего перераспределения по трофическим уровням, и есть биоэнергия, которая может быть использована в хозяйственных целях.

Биоэнергия может быть получена из различных видов биологического сырья, в том числе из лесосечных и сельскохозяйственных отходов, а также из отходов животноводства, лесных насаждений с коротким оборотом рубки, «энергетических культур» (специальные виды/сорта растений, выращиваемые с целью последующего получения энергии из биомассы), органического компонента твердых бытовых отходов и других видов органических отходов.

Благодаря целому ряду процессов это сырье может непосредственно использоваться для производства электрической и тепловой энергии, а также для получения газообразного, жидкого или твердого топлива.

Кроме получения различных видов энергии, производство биотоплива предполагает и дополнительные выгоды. Например, уборка отходов лесного хозяйства улучшает условия восстановления древостоев, уменьшает риск лесных пожаров и распространения насекомых-вредителей. В сельском хозяйстве, участвуя в севообороте, «энергети-

ческие посевы» могут улучшить качество почвы. Многолетние травы препятствуют эрозии почвы, регулируют влагооборот, способствуют очищению воды от примесей. Немаловажным является возможность использования «энергетических» трав для освоения бросовых земель и пустошей, неподходящих для производства продуктов питания.

Применение топлива, производимого из биомассы, во временном масштабе столетий не ведет к увеличению содержания CO_2 в системе атмосфера—Мировой океан. Образующийся при горении биомассы диоксид углерода количественно точно соответствует CO_2 , который растения, являющиеся основой топлива, абсорбировали в процессе своего роста (Volk et al., 2004).

В настоящее время общие мировые запасы биомассы на земной поверхности составляют $36 \cdot 10^{21}$ Дж, тогда как ежегодное мировое коммерческое использование всей энергии составляет $3,9 \cdot 10^{20}$ Дж (Елистратов, 2013). Одна тонна биомассы, в среднем, содержит до $2 \cdot 10^{10}$ Дж энергии, что эквивалентно 0,625 т у.т. — тонн условного топлива.

По разным оценкам к 2050 г., в зависимости от сценариев развития мирового хозяйства, мировой потенциал биотоплива может достичь 1500 ЭДж/год (при оптимистическом сценарии — высокотехнологичное сельское хозяйство, см. (Smeets et al., 2007)), а может стать нулевым (при пессимистическом сценарии — неконтролируемый рост населения, экстенсивное развитие сельского хозяйства, см. (Wolf et al., 2003)). Наиболее реалистичная оценка дана в работах (Hoogwijk et al., 2005; Bain, 2007): при учете использования для производства биотоплива бросовых земель и повышения эффективности сельского хозяйства авторы оценили мировой потенциал биотоплива в 2050 г. в 650 ЭДж/год.

В России биоэнергетика находится на начальной стадии развития — доля биотоплива в российской малой энергетике составляет всего 0,5 %. Однако возможности для ее развития в России значительны.

Ежегодно в России по разным отраслям народного хозяйства производится до 300 млн т отходов биомассы (по сухому веществу) из них: 230 млн т в сельскохозяйственном производстве; 130 млн т в жи-

вотноводстве и птицеводстве; 100 млн т в растениеводстве; в городах 70 млн т (60 млн т твердых бытовых отходов и 10 млн т осадков сточных вод). Энергетический потенциал указанного количества отходов составляет 190 млн т у.т.; реально можно получать в год до 45 млн т у.т. Переработка такого количества отходов только по биогазовым технологиям может дать до 80 млрд м³ биогаза, что эквивалентно 56 млрд м³ природного газа.

В настоящее время в России отходы деревообрабатывающей промышленности наряду с другими видами топлива используют около 40 тепловых электростанций, около сотни заводов перерабатывают биомассу и сельскохозяйственные отходы в биогаз. Бытовые и промышленные отходы используются на крупных мусоросжигательных заводах. В городах России ежегодно образуется более 150 млн м³ твердых бытовых отходов (ТБО). В среднем в стране на каждого человека приходится выброс объемом 1 м³ или 200—250 кг отходов, что эквивалентно 50—60 кг угля средней теплотворной способности (Елистратов, 2013).

Первые научные разработки в области биогазовых технологий в России были сделаны более 70 лет назад. Одно из направлений — анаэробная переработка активного ила и осадков городских сточных вод. Этот радикальный метод переработки активного ила и осадков сточных вод был успешно реализован на станциях очистки в ряде городов России.

Второе направление — переработка отходов сельскохозяйственного производства, в первую очередь, животноводства и птицеводства, было начато во Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) (Ковалев, Ножевникова, 1990) и продолжено в ЗАО «Экорос» (Панцхава, Пожарнов, 2003).

Биогазовые установки и станции могут функционировать в любых регионах России круглогодично в любое время суток. Необходимо лишь наличие органических отходов или доступной энергетической биомассы. Реализация и внедрение биогазовых технологий в народное хозяйство требует крупных разовых инвестиций, но они окупаются за очень короткий срок.

Наиболее перспективными источниками получения биотоплива являются отходы лесозаготовок и деревопереработки, а также отходы сельскохозяйственного производства. Так, например, объем сельскохозяйственных отходов при обработке урожая пшеницы составляет около 130 % от объема полученного зерна; при производстве пиломатериалов отходы составляют 15—25 %, фанеры 40—60 %, целлюлозы 50—60 %. В отдельных районах в качестве биотоплива может быть использован торф.

За валовой ресурс древесной биомассы обычно принимается энергия, сосредоточенная в расчетной лесосеке. Экономический потенциал биотоплива на основе отходов сельскохозяйственного производства составляет около 53,3 млн т у.т. (434 млрд кВт·ч или 1,57 ЭДж) в год (Безруких и др., 2007).

Возможности агропромышленного комплекса РФ в производстве биотоплива не ограничиваются использованием продукции традиционного лесного хозяйства или отходов сельского хозяйства. В настоящее время уже доказана рентабельность многих энергетических культур (рапс, ива и т. д.), которые можно возделывать на неудобных для традиционных культур землях. Указанные факторы говорят о необходимости комплексного подхода к выбору сырья для получения биотоплива, наиболее соответствующего конкретным природным и экономическим условиям.

Все источники получения биотоплива в той или иной мере испытывают на себе влияние климата, но наиболее чувствительны к климатическим условиям и их изменениям лесное и сельское хозяйство — основные поставщики сырья для биотоплива в России.

Процесс превращения биомассы в различные виды биотоплива на биоэнергетических заводах, как и любое производство, также подвержен влиянию климатических условий. Например, относительная влажность влияет на процессы коксования древесного угля, так как продолжительность этих процессов пропорциональна количеству древесной влаги. На производство биогаза оказывают влияние температура и влажность воздуха. Низкие температуры уменьшают производство биогаза, а высокие более благоприятны для производства. Высо-

кая влажность может вызвать коррозию материала, а чрезмерная сухость – растрескивание оборудования. Поэтому для того, чтобы в полной мере реализовать потенциал биоэнергетики в России, планирование и проектирование биоэнергетических заводов должно производиться с учетом как современного климата, так и его ожидаемых изменений.

Будущий технический потенциал биоэнергетики может находиться под влиянием изменения климата через воздействие на процесс производства биомассы, например, через изменившиеся почвенные условия, осадки, урожайность сельскохозяйственных культур и другие факторы. Ожидается, что общее влияние на технический потенциал биоэнергии изменения средней глобальной температуры менее чем на 2 °С по отношению к доиндустриальному уровню в глобальном масштабе будет относительно небольшим. Тем не менее, можно ожидать существенных региональных различий и больших неопределенностей, которые труднее оценить по сравнению с другими вариантами ВИЭ из-за большого количества задействованных механизмов обратной связи. Влияние происходящих изменений климата в связи с повышением температуры воздуха, увеличением количества осадков и повторяемости экстремальных явлений на ресурсный потенциал биомассы изучены пока недостаточно и, вероятно, оно в разных регионах будет различным.

Производство биоэнергии подвержено не только влиянию изменения климата. Оно характеризуется также сложным взаимодействием с социальными и экологическими системами. Без должного управления землепользованием возросшее производство биомассы может столкнуться с усиленной конкуренцией за водные ресурсы в критических областях, что является весьма нежелательным, и с проблемами в отношении изменения биоразнообразия.

Существенное расширение производства биоэнергии потребует сложного управления землепользованием и водопользованием, значительного усовершенствования технологий преобразования и более глубокого понимания социальных, энергетических и экологических

взаимодействий, связанных с производством и использованием биоэнергии (Gale, Kaya, 2003).

5. Геотермальная энергия

Выше были рассмотрены наиболее известные виды возобновляемых источников энергии, на которых работают энергоустановки, для которых имеется достаточно отлаженное производство оборудования, что определяет их конкурентоспособность. Вместе с тем, имеются и другие виды возобновляемой энергии, возможные для практического использования. К ним относится, в частности, геотермальная энергия (Hiriart, 2007).

Геотермальная энергия — энергия термальных подземных вод или пароводяной смеси — представляет собой естественное тепло планеты. В аспекте хозяйственного использования тепла Земли можно выделить два вида энергии — высокопотенциальную и низкопотенциальную.

Энергетические установки на основе тепла земли (ГеоТЭС) используют высокую температуру воды или пароводяной смеси. В настоящее время функционируют такие электростанции во многих странах мира. Их общая мощность около 10000 МВт.

В России большие запасы подземных термальных вод находятся в Дагестане, Чечне, Ингушетии, в Ставропольском и Краснодарском краях, на Камчатке, Курильских островах и в ряде других районов (Бутузов и др., 2011).

В последние годы в России создано высокоэффективное энергетическое оборудование, введены в эксплуатацию Паужетская (18 МВт) и Верхне-Мутновская (12 МВт) ГеоТЭС, полностью автоматизированная Мутновская ГеоТЭС мощностью 50 МВт. В Краснодарском крае эксплуатируется 12 геотермальных месторождений. Все это способствовало началу интенсивного развития геотермальной энергетики и вывело Россию в число ведущих стран мира в области использования тепла Земли для производства электроэнергии (Елистратов, 2013).

Геотермальную энергию можно использовать не только для выработки электроэнергии, но для других целей: систем отопления помещений, обогрева теплиц, горячего водоснабжения, полива, сушки древесины и др. Однако использование высокопотенциального тепла Земли ограничено районами с определенными геологическими параметрами.

Геотермальная энергия может играть существенную роль в сокращении выбросов парниковых газов (ПГ) и, следовательно, в смягчении антропогенного воздействия на глобальный климат. На общий потенциал геотермальных ресурсов и эффективность использования геотермальной энергии для изменения климата не будет иметь каких-либо серьезных последствий (IPCC, SRREN, Chapter 4 Geothermal Energy, p. 410, 2011). Однако на местном уровне изменение климата, в части распределения осадков, может оказать влияние на уровни воды в неглубоких геотермально нагреваемых водоносных горизонтах. Кроме того, доступность воды для охлаждения зависит от прихода поверхностных вод, она может быть затронута изменениями в количестве осадков, что вызовет потребность в промышленных конденсатных установках с воздушным охлаждением. Влияние этих эффектов, если они возникнут, может быть компенсировано при внесении корректив в технологию при проектировании ГеоТЭС.

При происходящем в условиях современного потепления климата увеличении повторяемости экстремальных явлений погоды (проливных дождей с сильным ветром, резких изменений температуры и влажности и др.) возможны нарушения в выработке энергии на геотермальных станциях.

Качественное описание возможного влияния на генерацию электроэнергии на ГеоТЭС и необходимых адаптационных мероприятий на примере действующих ГеоТЭС в Мексике приводится в работе (Hiriart, 2007).

В последнее время широкое распространение получило использование низкопотенциального тепла Земли на базе тепловых насосов. Они могут использоваться в различных типах зданий и сооружений для отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования (охла-

ждения) воздуха, обогрева дорожек в зимнее время года, для предотвращения обледенения, подогрева полей на открытых стадионах и т. п. В англоязычной технической литературе такие системы обозначаются как «GHP» — «geothermal heat pumps» (геотермальные тепловые насосы).

Тепловые насосы представляют собой компактные экономичные и экологически чистые энергетические установки, принцип действия которых основан на переносе тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой.

Такие устройства уже более четверти века с успехом используются в быту и промышленности в США и Западной Европе. Причем во многих городах работают сотни крупных сооружений, обладающих значительной мощностью. Сегодня тепловые насосы обеспечивают теплом Стокгольм, используя в качестве низкопотенциального источника тепла Балтийское море с температурой воды всего +8 °С. В Швеции тепловые насосы обеспечивают половину общей потребности в тепловой энергии, в США — 37 %. В России с 1992 года установлено более 700 тепловых насосов, которые обеспечивают менее 0,1 % общей потребности в тепловой энергии (Васильев, Шилкин, 2003).

По прогнозам Мирового энергетического комитета (МИРЭК) (World Energy Committee (WEC)), примерно к 2020 г. большинство развитых стран мира может перейти к теплоснабжению на основе использования тепловых насосов (Елистратов, 2013).

Проектирование, выбор определенного типа теплового насоса, глубины установки грунтовых зондов зависят от температурного режима грунта или водного бассейна. Территория, занятая многолетней мерзлотой, в том числе и «островной», считалась ранее непригодной для использования тепловых насосов. Однако в настоящее время разрабатываются способы использования низкопотенциального тепла и на многолетней мерзлоте.

К числу климатических характеристик, влияющих на условия эффективного использования тепловых насосов в том или ином районе, следует отнести глубину сезонного промерзания почвы и среднюю

годовую температуру воздуха. Кроме того, необходимо знать теплотери зданий, для которых планируется отопление тепловым насосом, температуру воздуха, соответствующую точке баланса, т. е. температуру, для которой теплотери дома равны производительности теплового насоса.

Опыт показывает, что тепловой насос может покрывать 70—90 % общей годовой потребности в энергии для отопления и горячего водоснабжения. Например, тепловой насос при коэффициенте преобразования 3,5—4,0 потребляет электричества 3,0—2,5 кВт, а выделяет 10 кВт тепловой энергии для обогрева батарей или теплых полов, а также для нагрева воды для бытового потребления. При низких температурах зимой тепловой насос применяется с пиковым источником, которым он укомплектован или в сочетании с имеющимся котельным оборудованием (Васильев, 2006).

Использование тепловых насосов позволяет обеспечить потребности в тепловой энергии без загрязнения окружающей среды вредными выбросами и чрезмерного потребления природных ресурсов. Тепловые насосы не выбрасывают в атмосферу ни углекислый газ, ни иные продукты горения. Системы тепловых насосов сегодня считаются более «чистыми» в экологическом плане, чем самые современные высокоэффективные газовые котлы. Это подтверждает сравнительный анализ воздействия на окружающую среду тепловых насосов и газовых котлов по годовым эксплуатационным показателям сгорания, объемам выбросов в атмосферу CO_2 . Так, например, тепловой насос с показателем SEER — 3,0 (коэффициент сезонной производительности) по сравнению с газовым котлом, имеющим коэффициент годовой производительности на уровне 90 % (уровень чрезвычайно высокий и труднодостижимый), выбрасывает в атмосферу CO_2 на 40 % меньше, чем котел той же мощности за аналогичный промежуток времени (Laue, 1999).

По результатам оценок, полученных с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), на большей части территории России (без учета зоны многолетней мерзлоты) при наблюдаемом росте температуры воздуха использование тепловых насосов в

качестве отопительных систем к середине XXI века станет еще более выгодным (Елистратов, Кобышева, Сидоренко (ред.), 2010). Однако в зарубежных исследованиях отмечается, что в некоторых энергетических установках изменение температуры окружающей среды может повлиять на отвод тепла и, возможно, будет неблагоприятно воздействовать на производство энергии (Hiriart, 2007).

6. Адаптации

Возобновляемые источники энергии являются ключевым инструментом в адаптации к изменяющемуся климату планеты. Программы адаптации, направленные на использование возобновляемых источников энергии, должны предусматривать комплекс научно-технических и организационно-управленческих мер.

Для России возобновляемые источники энергии — тема весьма непростая (www.ifc.org/wps/wcm/connect/.../Green+Giant+RUS.pdf?MOD=AJPERE).

С одной стороны, выражена политическая воля увеличивать использование ВИЭ и намечена цель: довести к 2020 году долю производства и потребления электрической энергии, вырабатываемой на основе использования технологий ВИЭ, до 2,5 % от общего объема (цифра скорректирована распоряжением Правительства № 512-р от 3 апреля 2013 г. против 4,5 %, заявленных ранее (Распоряжение Правительства..., 2009)). С другой стороны, конкретные меры поддержки разрабатываются очень медленно. Сегодня, спустя более двух лет после объявления целевых показателей, все еще отсутствует нормативно-правовая база, способная сделать инвестиции в ВИЭ в России экономически эффективными.

Необходимость использования ВИЭ в России в части защиты окружающей среды, экономики и энергетической безопасности очевидна. Любые задержки в принятии мер поддержки ВИЭ приведут к повышению стоимости достижения целевых показателей и к прямым затратам, связанным с упущенной выгодой от использования генерации на основе ВИЭ.

Необходима детальная проработка законодательства по развитию и использованию возобновляемых источников энергии, чтобы адаптировать оптовый рынок электроэнергии под участие объектов ВИЭ. Для повышения конкурентоспособности объектов на базе ВИЭ необходимо подтвердить значимость объектов ВИЭ в Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики. В настоящее время генерирующие объекты ВИЭ неконкурентоспособны на оптовом рынке электроэнергии. Правила торговли электрической энергией и мощностью не адаптированы к особым характеристикам функционирования большинства генерирующих объектов ВИЭ. Федеральный закон «Об электроэнергетике» явным образом не определяет механизм поддержки ВИЭ на розничном рынке.

Есть примеры реализации региональной политики в области ВИЭ на розничном рынке, например, в Белгородской области. Одним из механизмов поддержки ВИЭ на региональном уровне может быть установление минимального уровня тарифов на электрическую энергию по типам объектов ВИЭ, исходя из методики определения экономически обоснованных капитальных затрат. Такие тарифы могут быть с достаточной степенью точности определены и установлены на долгосрочной период.

Заключение

Все возобновляемые источники энергии в той или иной степени основываются на климатическом потенциале региона, в котором предполагается их использование.

Во многих субъектах Российской Федерации имеются два-три вида ВИЭ, при комплексном использовании которых удаленные не электрифицированные потребители могут быть в значительной степени обеспечены энергоресурсами.

Регионы Крайнего севера (от Кольского полуострова до Камчатки), прибрежные зоны Северного Ледовитого и Тихого океанов, Балтийского и Каспийского морей обладают значительными энергоресурсами ветра. Зоны с благоприятными климатическими условиями для

использования солнечной энергии (ежегодный приход солнечной радиации — более 1000 кВт·ч на м²) составляют больше половины территории России, где проживает около 49 млн сельских жителей и производится около 60 % валового объема сельскохозяйственной продукции. Горные районы Сибири, Дальнего Востока, Кавказа обладают значительными гидроэнергетическими ресурсами малых рек (технический потенциал микро- и малых ГЭС мощностью до 200 кВт оцениваются в 86,3 млрд кВт·ч/год). Месторождения термальных вод в районах Северного Кавказа, Камчатки, Сибирского плоскогорья и некоторых районов Дальнего Востока оцениваются в 20 млн м³ в сутки при температуре от 50 до 250 °С. Отходы растениеводства и животноводства, которые частично используются в качестве топлива, составляют около 340 млн т в год.

Несмотря на наличие в России больших ресурсов различных видов ВИЭ, масштабного использования возобновляемых источников энергии пока нет, однако в настоящее время придается определенный импульс их развитию. Так, если общая доля ВИЭ всех видов в суммарной выработке тепловой энергии в России в 2007 году составила около 5 %, а электрической (без крупных ГЭС) — около 0,9 %, то к 2020 г. она должна возрасти до 2,5 %.

Солнечная энергия. Основными характеристиками солнечных энергетических ресурсов в заданном районе являются продолжительность солнечного сияния, количество прямой и суммарной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность.

Вся южная часть России обладает достаточно высокими солнечными ресурсами, которые могут быть использованы для выработки электрической и тепловой энергии. Особо следует отметить высокий солнечный потенциал Якутии, где в апреле и мае месячные суммы суммарной солнечной радиации в ее северных районах так же высоки, как на северном Кавказе и в Астраханской области — более 165 кВт·ч/м² (600 МДж/м²).

При будущем климате, рассчитанном как средний по ансамблю моделей АН_31 в условиях сценария антропогенного воздействия на климатическую систему RCP 4.5 для трех периодов времени —

2011—2030 гг., 2041—2060 гг. и 2080—2099 гг., изменение годового прихода суммарной солнечной радиации во все три периода по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. будет практически одинаковым. Территория ЕЧР, южная половина Уральского и Сибирского федеральных округов будут в зоне довольно слабой положительной аномалии (2—4 %), а восточные регионы — в зоне отрицательной. В Дальневосточном федеральном округе к концу века ожидается более глубокая отрицательная аномалия (до -4...-6 %).

Перспективы использования энергии Солнца в России, в основном, связываются с выработкой тепловой энергии на базе плоских солнечных коллекторов.

В областях Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, обладающих высоким солнечным потенциалом, удельная выработка тепловой энергии солнечным коллектором с жидким теплоносителем за безморозный период составляет 850—900 кВт·ч/м². В более северных густонаселенных промышленных областях России (до 60° с. ш.), где весьма актуальным является вопрос об энергосбережении, удельная выработка тепловой энергии составляет 500—700 кВт·ч/м², и также имеется возможность применять солнечные коллекторы в качестве приставок для котельных и ТЭЦ и для разработок новых современных проектов в строительстве.

Коэффициент замещения нагрузки горячего водоснабжения за счет солнечной энергии в средних широтах России составляет 55—60 %, а в южных — более 75 %.

Происходящие изменения климата могут повлиять на эффективность работы солнечных энергетических установок, в частности, на выработку тепловой энергии солнечными коллекторами, которая напрямую зависит не только от количества солнечной радиации, поступающей на его приемную поверхность, но и температуру окружающего воздуха.

В первые десятилетия XXI века возможно небольшое увеличение удельной выработки тепловой энергии на ЕЧР и в Западной Сибири (от 20 до 40 кВт·ч/м²), а на побережье Охотского моря и на Чукотке применение солнечных коллекторов станет не рентабельным, по-

скольку удельная выработка может снизиться на 10 кВт·ч с квадратного метра установки. Прогнозируемый рост температуры воздуха не сможет компенсировать эффект снижения потока солнечной радиации. К середине XXI столетия и, особенно, к его концу, согласно оценке будущего климата, рост температуры будет более интенсивный, что положительно скажется на работе солнечных коллекторов даже в Дальневосточном федеральном округе. Особенно благоприятные условия для широкого использования тепловых солнечных установок будут в западных и южных районах ЕЧР, где удельная выработка тепловой энергии увеличится более, чем на 50—60 кВт·ч с каждого квадратного метра установки.

Ветровая энергия. Богатый ветроэнергетический потенциал во многих районах России создает все предпосылки к ускоренному развитию и внедрению ветроэнергетических станций и установок.

Хорошо обеспечены ветроэнергетическими ресурсами окраинные округа — Северо-Западный, Сибирский, Дальневосточный. Особенно большим ветроэнергетическим потенциалом обладают районы вдоль берегов Карского, Берингова и Охотского морей. Федеральные округа с развитой индустрией и большой плотностью населения (Центральный, Южный) характеризуются меньшим ветропотенциалом, но районы Среднего и Нижнего Поволжья, степные районы Западной Сибири также богаты ветровыми ресурсами. Исследование временной изменчивости скорости ветра за период 1960—2000 гг. показало, что в последние 15—20 лет этого периода уменьшились скорости ветра на большей части территории России, увеличилась повторяемость слабых ветров (так называемых «энергетических» затиший), уменьшилась повторяемость «буревых» скоростей. Исключения наблюдались в прибрежных зонах (побережья Камчатки и Приморского края, о. Сахалин, побережья Ладоги и Финского залива), где мало изменилась повторяемость диапазона «энергоактивных» скоростей ветра (≥ 5 м/с), т. е. умеренных ветров, при которых происходит выработка основной доли энергии.

Были проведены специальные расчеты изменений среднегодовой скорости ветра у поверхности земли ($h = 10$ м), рассчитанные на бли-

жайшие десятилетия (2021—2040 гг.) и середину XXI века (2041—2060 гг.). Климат рассчитывался как средний по ансамблю из 25 МОЦАО CMIP5, а изменения в среднегодовой скорости ветра — в процентах от значения базового периода 1991—2010 гг. (Мелешко, Говоркова, 2013). Существенных изменений в приземных скоростях ветра на большей части территории России в ближайшие десятилетия XXI века при этих расчетах обнаружено не было.

В первой половине XXI в. снижение приземной скорости ветра в континентальной части России составит не более 5 %, в отдельных областях восточной части ЕЧР, на Урале и в центре АЧР — до 10 %. На побережьях северных морей, в Магаданской области, на Чукотке, на побережье Охотского моря скорости ветра возрастут до 5—10 %. Наибольший рост ожидается в прибрежных северных районах ЕЧР — до 10—15 %, а на Кольском полуострове до 20 %. Аналогичный характер поля приземного ветра сохранится и к середине XXI века.

Для России в области ветроэнергетики наиболее перспективным является развитие малой автономной ветроэнергетики (до 100 кВт на базе ВЭУ с номинальной мощностью порядка 1—30 кВт), автономной ветроэнергетики средней мощности (0,1—1 МВт на базе ВЭУ с номинальной мощностью 100—800 кВт, работающих параллельно с дизельными электростанциями и малыми ГЭС), сетевой ветроэнергетики (2 МВт и выше на базе ВЭУ с мощностью порядка 1 МВт).

Биоэнергия. Биомасса или биоресурсы — мощный потенциальный мировой источник топлива и энергии. В России биоэнергетика находится в начальной стадии развития (доля биотоплива в российской малой энергетике составляет пока всего 0,5 %). Однако возможности для ее развития в РФ значительны. Ежегодно в России по разным отраслям народного хозяйства производится до 300 млн т отходов биомассы (по сухому веществу). Энергетический потенциал указанного количества отходов составляет 190 млн т у.т. Реально можно получать в год до 45 млн т у.т. Переработка такого количества отходов только по биогазовым технологиям может дать до 80 млрд м³ биогаза, что эквивалентно 56 млрд м³ природного газа.

Будущий технический потенциал биоэнергетики может находиться под влиянием изменения климата через воздействие на производство биомассы, например, через изменившиеся почвенные условия, осадки, урожайность сельскохозяйственных культур и другие факторы. Ожидается, что общее влияние изменения средней глобальной температуры менее, чем на 2 °С на технический потенциал биоэнергии в глобальном масштабе будет относительно небольшим. Влияние происходящих изменений климата на ресурсный потенциал биомассы изучено пока недостаточно и, вероятно, оно в разных регионах будет различным. Производство биоэнергии зависимо не только от изменения климата. Оно характеризуется сложным взаимодействием с социальными и экологическими системами.

Геотермальная энергия. Геотермальная энергия представляет собой естественное тепло планеты. При использовании тепла Земли можно выделить два вида энергии — высокопотенциальную и низкопотенциальную. Большие запасы подземных термальных вод находятся в Дагестане, Чечне, Ингушетии, Северной Осетии, Ставропольском и Краснодарском краях, на Камчатке и ряде других районов России.

В последние годы в России создано высокоэффективное энергетическое оборудование, введены в эксплуатацию Паужетская и Мутновская ГеоТЭС. В Краснодарском крае эксплуатируется 12 геотермальных месторождений.

Геотермальную энергию можно использовать не только для выработки электроэнергии, но и других целей: систем отопления помещений, обогрева теплиц, горячего водоснабжения, полива, сушки древесины и др. Однако использование высокопотенциального тепла Земли ограничено районами с определенными геологическими параметрами.

В последнее время широкое распространение получило использование низкопотенциального тепла земли на базе тепловых насосов. Проектирование, выбор определенного типа теплового насоса, глубины установки грунтовых зондов зависят от температурного режима грунта или водного бассейна. На температурный режим верхних слоев грунта и тепловые процессы, определяющие характеристики грунта как источника низкопотенциальной тепловой энергии, оказывает влия-

яние влаги атмосферных осадков, а также грунтовые воды, от которых зависит влажность грунтового массива и миграция влаги в его поровом пространстве.

По результатам оценок, основанных на моделях МОЦАО, на большей части территории России (без учета зоны многолетней мерзлоты) при наблюдаемом росте температуры воздуха использование тепловых насосов в качестве отопительных систем к середине XXI века станет более рентабельным. В зарубежных исследованиях также отмечается, что постепенное повышение температуры окружающей среды, связанное с изменением климата, не окажет существенного влияния на работу тепловых насосов. Однако в некоторых энергетических установках резкие изменения температуры могут повлиять на отвод тепла и, возможно, будут неблагоприятно воздействовать на производство энергии.

Развитие новых энергетических направлений на базе ВИЭ в России, помимо большого энергетического, экономического, экологического эффекта, может оказать позитивное воздействие на возрождение и дальнейшее повышение технологического и индустриального уровня страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас ветрового и солнечного климатов России (1997) / Под ред. М. М. Борисенко, В. В. Стадник. — СПб. 173 с.

Бальзаминов М. И., Елистратов В. В. (2008). Возобновляемые источники энергии: аспекты комплексного использования. — Саратов: Изд. Офорт. 305 с.

Безруких П. П., Стребков Д. С. (2005). Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технология. — М.: ГНУ ВИЭСХ. 264 с.

Безруких П. П. (2012). О роли ВИЭ в устойчивом развитии и энергоэффективности. / В сборнике трудов 9 Международной конференции «Возобновляемая и малая энергетика 2012». — М.: Комитет ВИЭ РосСНИО. С. 166—180.

Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. (1982). Расчет систем солнечного теплоснабжения. — М.: Энергоиздат. 78 с.

Белокрылова Т. А. (1989). Об изменении скоростей ветра на территории СССР // Труды ВНИИГМИ МЦД. Вып. 150. С. 38—47.

Бутузов В. А., Шетов В. Х. (2008). Возобновляемые источники энергии. Региональный опыт Краснодарского края // Энергосбережение. № 6. С. 81—83.

Бутузов В. А., Томаров Г. В., Шетов В. Х. (2011). Модернизация геотермальной системы теплоснабжения // Энергосбережение. № 3. С. 78—81.

Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л. (2008). Оценка ветроэнергетических ресурсов на территории России // Труды ГГО. Вып. 557. С. 53—66.

Васильев Г. П., Шилкин Н. В. (2003). Использование низкопотенциальной тепловой энергии Земли в теплонасосных системах // АВОК. № 2. С. 52—61.

Васильев Г. П. (2006). Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. — М.: Изд. дом «Граница». 176 с.

Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. (2008). Солнечная энергетика. — М.: Изд. дом МЭИ. 276 с.

Дмитриев Г. С. (2004). Что несет с собой развитие ветроэнергетики (экологические аспекты) // Энергия. № 8. С. 11—19.

Доклад Консультативного совета Германии по глобальным проблемам (WBGU) (2003). World in Transition — Towards Sustainable Energy Systems.

Елистратов В. В., Кобышева Н. В. (2010). Климатические факторы возобновляемых источников энергии / Под ред. Г. И. Сидоренко. — СПб: Наука. 235 с.

Елистратов В. В. (2013). Возобновляемая энергетика. — СПб: Наука. 307 с.

Кобышева Н. В. и др. (2001). Климат России. — СПб. 655 с.

Ковалев Ф. Ф., Ножневникова А. Н. (1990). Технологические линии утилизации отходов животноводства в биогаз и удобрения. — М.: Агропромиздат. 241 с.

Мелешко В. П., Говоркова В. А. (2013). Успешность расчета современного регионального климата с помощью ансамбля моделей CMIP3 и CMIP5 // Труды ГГО. Вып. 568. С. 26—50.

Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В. (2008). Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3 // Метеорология и гидрология. № 9. С. 5—19.

Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. И. (2008). Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М.: Изд. «Атмограф». 584 с.

Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. И., Вальтер Р., Виллемс П., Санковский А. Г. (2009). Перспективы развития возобновляемых источников энергии в России. Результаты проекта TACIS Europe Aid/116951/C/SV/RU/. — М.: Изд. «Атмограф». 456 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008). Том 1. Изменения климата. — М.: Росгидромет. 227 с.

Панцхава Е. С., Пожарнов В. А. (2003). Высокорентабельные биогазовые технологии. Перспективы внедрения в России и их роль в экономике сельскохозяйственного производства / В сб. докладов МНТК «Возобновляемая энергетика». — СПб: СПбГПУ. С. 122—128.

Пивоварова З. И. (1977). Радиационные характеристики климата СССР. — Л.: Гидрометеиздат. 335 с.

Пивоварова З. И., Стадник В. В. (1988). Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. — Л.: Гидрометеиздат. 291 с.

Распоряжение Правительства РФ № 1 от 08.01.2009. Об утверждении основных направлений Государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности в электроэнергетике на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.

Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) (2007) / Под ред. П. П. Безруких. — М.: ИАЦ Энергия. 272 с.

Стадник В. В., Разгоняев Ю. В. (2008). Оценка суммарного прихода суммарной радиации, поступающей на наклонные поверхности // Труды ГГО. Вып. 557. С. 67—84.

Стадник В. В., Трофимова О. В., Шанина И. Н. (2013). О возможности совместного использования сумм солнечной радиации, полученных разными способами // Труды ГГО. Вып. 569. С. 148—158.

Старков А. Н., Ландберг Л., Безруких П. П., Борисенко М. М. (2000). Атлас ветров России. — М.: Можайск-Терра. 560 с.

Стребков Д. С. (1993). О развитии солнечной энергетики в России. Труды международного симпозиума «Автономная энергетика сегодня и завтра». — СПб. С. 36—39.

Статистический сборник. Регионы России. Социально-экономические показатели (2007). — М.: Федеральная служба государственной политики. 991 с.

Тарнижевский Б. В. (1996). Оценка эффективности применения солнечного теплоснабжения в России // Теплоэнергетика. № 5. С. 15—18.

Тарнижевский Б. В., Шмидт И. А., Додонов Л. Д. и др. (2001). Методика и результаты расчета выработки энергии солнечными фотоэлектрическими установками // Изв. РАН. Энергетика. № 6. С. 27—37.

Чернокульский А. В. (2012). Гелиоэнергетика и изменение климата // Академия Энергетики. Т. 5. № 49. С. 36—40.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. (2009). — М.: Министерство промышленности и энергетики РФ.

Bain R. L. (2007). World Biofuels Assessment. Worldwide Biomass Potential. Technology Characterizations. National Renewable Energy Laboratory. Golden. CO USA. 140 p.

Bloom A., Kotroni V. and Lagouvardos K. (2008). Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS // Natural Hazards and Earth System Sciences. V. 8. P. 1249—1257.

Breslow P. B. and Sailor D. J. (2002). Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States // Renewable Energy. V. 27. P. 585—598.

Burnett D. and Harrison G. (2009). Climate Change and The UK Solar Energy Resource. Institute for Energy Systems The University of Edinburgh.

Crook J. A. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output // Energy and environmental science. V. 4. P. 3101—3109.

Gale J., Kaya Y. (2003). A life cycle analysis of biomass energy system tanking [sic] sustainable forest management into consideration / In: Greenhouse Gas Control Technologies — 6th International Conference, Kyoto, Japan, 1—4 October 2002. Pergamon. Oxford. P. 1383—1388.

Geyer M., Quaschnig V. (2000). Solar thermal power. Renewable Energy World. July—Aug. 2000. P. 184—191.

Hiriart G. (2007). Impacto del cambio climatico sobre la generaciyn elqctrica con fuente de energia geotermica (Impact of climate change on power generation from geothermal energy source) / In: Escenarios de energias renovables en Mexico bajo cambio climatico. P. 83—105.

Hoogwijk M. et al. (2005). Potential of biomass energy out to 2100 for four IPCC SRES land-use scenarios // Biomass and Bioenergy. 29 (4). P. 225—257.

Hoogwijk M., Supersberger N., von Winterfeld U. and Samadi S. (2009). Role Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply // Climate Change. 18. Federal Environment Agency. Dessau-Rosslau. Germany. 336 p.

IPCC (2011). Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Chapter 3. Direct Solar Energy. P. 341—343.

Martínez A. T. etc. (2007). Scenarios de energias renovable en Mexico bajo cambio climatico // Instituto de ecologia. A. C.

Palutikof J. P., Guo X. and Halliday J. A. (1992). Climate variability and the UK wind resource // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 39. P. 243—249.

Palutikof J. P., Kelly P. M., Davies T. D. and Halliday J. A. (1987). Impacts of spatial and temporal windspeed variability on wind energy output // Journal of Climate and Applied Meteorology. V. 26. P. 1124—1133.

Pryor S. C., Barthelmie R. J. and Kjellström E. (2005). Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model // *Climate Dynamics*. V. 25. P. 815—835.

Pryor S. C., Schoof J. T. and Barthelmie R. J. (2006). Winds of change. Projections of near-surface winds under climate change scenarios // *Geophysical Research Letters*. V. 33. L11702.

Pryor S. C. and Schoof J. T. (2010). Importance of the SRES in projections of climate change impacts on near-surface wind regimes // *Meteorologische Zeitschrift*. V. 19. P. 267—274.

Sailor D. J., Smith M. and Hart M. (2008). Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States // *Renewable Energy*. V. 33. P. 2393—2406.

Smeets E. V. W. et al. (2007). A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050 // *Progress in Energy and Combustion Science*. V. 33. № 1. P. 56—106.

Snyder B. and Kaiser M. J. (2009). A comparison of offshore wind power development in Europe and the US: Patterns and drivers of development // *Applied Energy*. V. 86. P. 1845—1856.

Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J. (2009). Earth's global energy budget // *Bulletin of the American Meteorological Society*. March 2009. P. 311—323.

Walter A., Keuler K., Jacob D., Knoche R., Block A., Kotlarski S., Muller Westermeier G., Rechid D. and Ahrens W. (2006). A high resolution reference dataset of German wind velocity 1951—2001 and comparison with regional climate model results // *Meteorologische Zeitschrift*. V. 15. P. 585—596.

Volk T. A., Tharakan P. J., Abrahamson L. P. and White E. H. (2003). Greater Potential for Renewable Biomass Energy // *BioScience*. V. 53. № 7. P. 600—621.

Wind Force 12. Summare Results in 2020 (2005). GWEC.

Wolf J., Bindraban P. S., Luijten J. C. and Vleeshouwers L. M. (2003). Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy // *Agricultural systems*. V. 76. P. 841—861.

УДК 551.58

Методика экономического обоснования адаптационных мероприятий, связанных с изменением и изменчивостью климата. Кобышева Н. В. Труды ГГО. 2014. Вып. 574. С. 5.

Представлена система методов, позволяющих количественно оценить климатические риски, вызванные опасными метеорологическими явлениями (ОЯ), и обосновать выбор и целесообразность мер адаптации к изменениям и изменчивости климата.

Ключевые слова: климатические риски, опасные явления, меры адаптации, изменения климата.

Табл. 8. Рис. 7. Библ. 17.

Причины наблюдаемых изменений климата. Спорышев П. В., Катцов В. М., Мелешко В. П., Алексеев Г. В., Кароль И. Л., Мирвис В. М. Труды ГГО. 2014. Вып. 574. С. 39.

В статье, состоящей из четырех разделов, дается обзор исследований, касающихся причин наблюдаемых изменений климата. В первом разделе обсуждается эволюция научных представлений о возможных причинах изменений климата от первых работ по влиянию парникового эффекта углекислого газа на климат, выполненных в XIX веке, до сравнительно современных работ, предшествующих Четвертому оценочному докладу МГЭИК. Во второй секции рассматриваются изменения в компонентах климатической системы, которые являются ключевыми для выявления антропогенного влияния на глобальный климат. Обзор в основном опирается на Пятый оценочный доклад МГЭИК с учетом работ, вышедших после его опубликования, а также русскоязычных работ не отраженных в докладе. В третьей секции анализируются региональные аспекты установления причин климатических изменений и оценки степени влияния отдельных внешних воздействий на климат России. Обсуждаются проблемы соответствия модельных расчетов данным наблюдений для разных сезонов и разных регионов применительно к территории России, а также вопросы обнаружения влияния внешних воздействий на климат России при рассмотрении отдельных аномальных климатических явлений. В четвертой секции рассматривается влияние неантропогенных факторов на современный климат. В частности, обсуждаются колебания климата, обусловленные собственной изменчивостью в Мировом океане, влияние на климат изменений в потоке приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы, а также влияние радиационного воздействия, связанного с извержениями крупнейших вулканов.

Ключевые слова: причины изменений климата, парниковый эффект, антропогенное воздействие на климат, влияние внешних воздействий на климат России, влияние неантропогенных факторов на климат.

Табл. 3. Рис. 16. Библ. 139.

УДК 551.588

Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс. Хлебникова Е.И., Дацюк Т.А., Салль И.А. Труды ГГО. 2014. Вып. 574, С. 125.

Обсуждаются современные представления о влиянии изменений климата на ТЭК, строительство и наземный транспорт на территории России. Приведены количественные результаты, отражающие влияние климатических изменений на рассматриваемые виды хозяйственной деятельности, которые получены за последние годы. Оценки климатического воздействия в будущем выполнены на основе результатов расчетов с помощью глобальных климатических моделей поколения CMIP5, а также региональной климатической модели высокого пространственного разрешения.

На основе анализа наблюдаемых и ожидаемых изменений климатического воздействия на рассматриваемые сектора экономики даны рекомендации по их адаптации к изменениям климата. Обращается внимание на необходимость дальнейшего развития работ, способствующих повышению информативности климатических сценариев – в первую очередь, в отношении экстремальных событий.

Ключевые слова: изменения климата, климатические воздействия, климатические модели, климатические экстремумы, продолжительность отопительного периода, градусо-сутки отопительного периода, градусо-сутки периода охлаждения, тепловая защита зданий, долговечность сооружений, атмосферные нагрузки, интенсивность осадков, циклы замораживания и оттаивания, транспортная инфраструктура, энергетическая инфраструктура

Табл. 1. Ил. 15. Библ. 77.

УДК 620.91

Возобновляемые энергетические ресурсы. Стадник В. В., Елистратов В. В. Труды ГГО, 2014. Вып. 574. С. 179.

Рассматриваются результаты использования в России ресурсов основных видов возобновляемых источников энергии (ветровой, солнечной, геотермальной и биоэнергии) и вопрос чувствительности ВИЭ к изменению климата.

Ключевые слова: солнечная энергия, ветровая энергия, геотермальная энергия, биоэнергия, энергетический потенциал, изменение климата

Табл.3. Рис.8.Библ.61.

Method of economical substantiation of adaptation measures related with changes and variability of climate. Kobyisheva N. V. Proceedings of MGO 2014. V.574. P. 5.

In the article there is represented a system of methods, which enable to evaluate in quantitative terms climatological risks, that are caused by dangerous meteorological phenomena, and to substantiate a choice of measures and purposefulness of adaptation to changes and variability of climate.

Keywords: climatological risks, dangerous meteorological phenomena, purposefulness of adaptation, changes of climate.

Tabl. 8. Fig. 7. Ref. 17.

Causes of observed climate change. Sporyshev P. V., Kattsov V. M., Meleshko V. P., Alekseev G. V., Karol I. L., Mirvis V. M. Proceedings of MGO. 2014. V.574. P. 39.

This article provides an overview of research related to the causes of observed climate change. The paper consists of four sections. The first section discusses the evolution of scientific ideas about the possible causes of climate change from the first studies on the impact of the greenhouse effect of carbon dioxide on the climate, made in the XIX century, until relatively modern works prior to the Fourth Assessment Report of the IPCC. The second section discusses the changes in the components of the climate system which are central to identifying human influence on global climate. The overview relies heavily on the Fifth Assessment Report of the IPCC taking into account the papers published after its publication, as well as Russian-language articles which are not reflected in the report. The third section analyzes regional aspects of establishing the causes of climate change, and assesses the impact of variety of external forcing on climate of Russia. It discusses the problems of seasonal correspondence of model simulation and observational data over different regions of Russia, as well as issues of detection of impact of external forcing on climate of Russia when considering anomalous climate phenomena. The fourth and final section examines the impact of non-anthropogenic factors on the current climate. In particular, it discusses internal variability of the atmosphere due to ocean forcing, impact of solar irradiance variation on climate, as well as the impact of radiative forcing associated with eruptions of the largest volcanoes.

Keywords: causes of climate change, greenhouse effect, anthropogenic impact on climate, the impact of external factors on the climate of Russia, the effect of non-anthropogenic factors on climate.

Tabl. 3. Fig. 16. Ref. 139.

Climate change impacts on construction, land transportation, and energy industry. Khlebnikova E.I., Datsyuk T. A., Sall I.A. Proceedings of MGO. 2014. V.574, P. 125.

The current concepts of climate change impact on energy, construction and land transportation in Russia are discussed. The quantitative estimates concerning the influence of climate change on the economic activities, which are obtained in recent years, are given. The assessment of future climate impacts is based on the results of calculations using global climate models CMIP5, as well as the regional climate model of high spatial resolution.

On the background of the analysis of the observed and expected changes in climate impact on the sectors in consideration the recommendations for their adaptation to climate change are discussed. Special attention is paid to the need for further investigations to extend and to improve the information content of the climate scenarios – especially with respect to extreme events.

Key words: climate change, climate impacts, climate models, climatic extremes, duration of heating period, heating degree-days, cooling degree-days, thermal performance of buildings, durability of constructions, atmospheric loads, precipitation intensity, freezing and thawing cycles, transport infrastructure, energy infrastructure

Tabl. 3. Fig. 15. Ref.77.

Renewable Energy Sources. Stadnik V. V., Elistratov V. V. Proceedings of MGO. 2014. V.574, P. 179.

The results of the use of resources of the main types of renewable energy sources (wind, solar, geothermal and bioenergy) in Russia and the sensitivity of renewable energy to climate change are presented.

Keywords: solar energy, wind energy, geothermal energy, bioenergy, energy potential, climate change.

Tabl.3, Fig.8, Ref.61.