

Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. Воейкова

Выпуск

573

*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](mailto: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 обсерватория им. А.И. Воейкова»,  
2014

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>И. Л. Кароль, А. И. Решетников.</i> Парниковые газы, аэрозоли и климат.....	5
<i>Э. Г. Богданова, С. Ю. Гаврилова, Б. М. Ильин.</i> Атмосферные осадки.....	39
<i>Е. И. Хлебникова, Е. Л. Махоткина, И. А. Салль.</i> Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения.....	65
<i>И. М. Школьник, В. П. Мелешко, В. В. Стадник, Е. И. Хлебникова, Е. М. Акентьева, Е. Л. Генихович, А. А. Киселев.</i> Влияние изменений климата на производство и потребление энергии в России.....	92

## CONTENTS

<i>I. L. Karol, A. I. Reshetnikov</i> . Greenhouse gases, aerosol and climate.....	5
<i>E. G. Bogdanova, S. J. Gavrilova, B. M. Ilyin</i> . Precipitation.....	39
<i>E. I. Khlebnikova, E. L. Makhotkina, I. A. Sall</i> . Cloud cover and solar radiation regime over Russia: observed climatic changes.....	65
<i>I. M. Shkolnik, V. P. Meleshko, E. I. Khlebnikova, E. M. Akentieva, E. L. Genikhovich, A. A. Kiselev</i> . Impact of climate change on energy production and consumption in Russia.....	92

## ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ, АЭРОЗОЛИ И КЛИМАТ

*И. Л. Кароль, А. И. Решетников*

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

Поступила в редакцию 8.09.2014  
Поступила после доработки 13.10.2014

### **Введение**

Данная статья является продолжением и развитием представленной в Первом Оценочном докладе (ОД\_РФ-1) главы 4 «Изменения содержания парниковых газов и аэрозоля в атмосфере и их влияние на климат». Она представляет новые сведения о появившихся и исследованных после 2007 г. изменениях содержания в атмосфере различных примесей, влияющих на радиационные и температурные характеристики климата, а также их вклада в изменения характеристик подстилающей поверхности и облачности. В ней не повторяются общие положения о составе атмосферы, потоках радиации в атмосфере и воздействии на них разных естественных и антропогенных факторов, об атмосферных циклах различных климатообразующих примесей, приведенных в ОД\_РФ-1.

Если состав атмосферы, источники эмиссии и эффект основных долгоживущих парниковых газов не претерпели серьезных изменений после 2007 г., то существенно расширились сведения об атмосферных циклах короткоживущих факторов, более динамично воздействующих на радиационный режим и на климатические характеристики, прежде всего, на аэрозоль в виде «черного углерода» (ЧУ), влияние которого на климат практически не было освещено в ОД\_РФ-1. Эти «новые» примеси достаточно интенсивно изучаются и обсуждаются ныне

в научных (и не только) публикациях, формируются научные программы.

Мировая сеть мониторинга парниковых газов за период с 2007 по 2012 гг. продолжала развиваться и совершенствоваться: увеличилось число станций и используемых на них аналитических систем наблюдений, технические и организационные возможности многих стран были направлены на обеспечение высокого качества наблюдений, в частности, были организованы Калибровочные центры стандартов для SF<sub>6</sub>, а также для стабильных изотопов <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>, <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> и <sup>18</sup>O<sub>2</sub>. Это — лаборатория NOAA/ESRL (США) и Биохимический институт Макса Планка (Германия). Для H<sub>2</sub> был организован Мировой центр аудита данных наблюдений на базе Федеральной лаборатории по Тестированию материалов и их исследованию в Швейцарии. На станциях Глобальной Службы Атмосферы (ГСА) для обеспечения прецизионных измерений концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> начала внедряться новая измерительная техника, на основе использования резонаторной (с очень большим числом отражений лазерного луча) лазерной спектроскопии CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy (GAW/WMO report № 194, 2011)). В 2009 г. получила статус «содействующей» сеть станций дистанционных наблюдений за общим содержанием парниковых и ряда реактивных газов в столбе атмосферы (TCCON), работающая на базе фурье-спектрометров высокого разрешения — IFS125M, работающих в ИК диапазоне спектра электромагнитного излучения Солнца, используемого в качестве источника излучения (GCOSSC-XIX Doc.7.2a (01.IX.2011))

## 1. Диоксид углерода

Среднее глобальное значение концентрации парниковых газов формируется на основании данных шести глобальных станций мониторинга парниковых газов, из которых две расположены в Южном полушарии: Южный полюс, Американское Самоа и четыре станции в Северном: Мауна-Лоа, Тринидад (Калифорния), Барроу (Аляска) и Саммит (Гренландия). На рис. 1 представлены графики изменения глобальной среднемесячной концентрации углекислого

газа  $\text{CO}_2$  и сглаженный тренд в приземном слое воздуха, полученный на основе данных этих станций (НУОА США).

Как следует из рисунка, продолжился рост концентрации  $\text{CO}_2$ , несмотря на ограничения выбросов парниковых газов, введенных Киотским протоколом для промышленно развитых стран, взявших на себя обязательства по их снижению. Согласно данным НУОА за период с 2010 по 2014 г. глобальная среднегодовая концентрация диоксида углерода возросла с 387,3 до 396,5  $\text{млн}^{-1}$  (NOAA/ESRL, 2014).

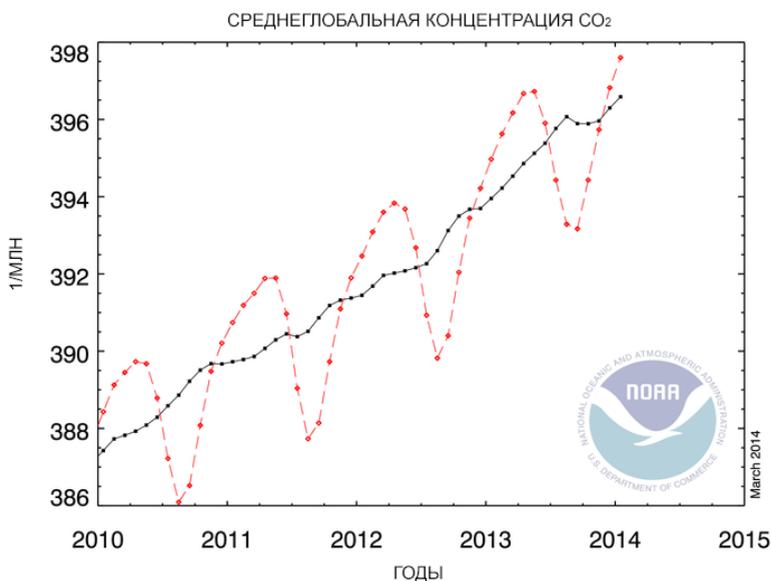


Рис. 1. Глобальный тренд (черная кривая) и сезонный ход концентрации  $\text{CO}_2$  за период 2010—2014 гг.

Среднее значение ежегодного прироста концентрации составило  $2,0 \text{ млн}^{-1}$ , что выше его межгодового прироста за предыдущие 10 лет, который равнялся  $1,9 \text{ млн}^{-1}$  (ОД\_РФ-1, 2008). Этот рост, несмотря на некоторое снижение выбросов  $\text{CO}_2$  в промышленно развитых странах

ЕС, США и Канаде, обусловлен существенно возросшими выбросами в атмосферу  $\text{CO}_2$  такими крупными развивающимися странами, как Китай и Индия (IEA, 2012, 2013). Усиленный экономический рост в странах с так называемой переходной экономикой, особенно в последние годы нового тысячелетия, привел к тому, что, несмотря на выполнение промышленно развитыми странами рекомендаций Киотского протокола, скорость роста концентрации парниковых газов сохранилась в целом примерно на том же уровне, что и за предыдущие шесть лет. Экономический годовой прирост внутреннего валового продукта (ВВП) в Китае, составивший 4 % в 2002 г., вырос до 11 % к 2008 г. Антропогенная эмиссия  $\text{CO}_2$  за этот период возросла в Китае на 150 %, а в Индии на 75 %, и это, несмотря на мировой экономический кризис, последствия которого в Китае были существенно смягчены из-за больших инвестиций в инфраструктуру развивающихся автомобилестроения и сталелитейной промышленности. В результате среднегодовой выброс  $\text{CO}_2$  в Китае к 2011 г. возрос до 9,7 млрд т, и он вышел на 1-е место в мире по объемам эмиссии  $\text{CO}_2$ , превысив даже выброс  $\text{CO}_2$  США (World Energy Outlook, 2012a, b). Суммарный выброс стран ЕС (EU27) снизился в 2011 г. на 3 % по сравнению с предыдущим годом и составил 3,8 млрд т (в США эмиссия  $\text{CO}_2$  в 2011 г. составила 5,4 млрд т). Россия же после резкого спада эмиссии в начале 90-х годов прошлого века в последующие годы увеличивала использование ископаемого топлива. Тем не менее, выброс  $\text{CO}_2$  в период с 1998 по 2007 г. не увеличился, а даже снизился в 2007 г. по сравнению с 1998 г. на 6 % (Пятое Национальное сообщение РФ, 2010).

В течение последнего десятилетия объемы антропогенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в глобальном масштабе, вследствие сжигания угля и углеводородов, а также производства цемента, возросли с  $8,3 \pm 0,7$  млрд т С/год в 2002 г. до  $9,4 \pm 0,8$  млрд т С/год к 2011 г, что соответствовало ее среднему ежегодному приросту 1,2 %/год. Ежегодная эмиссия углерода, обусловленная обработкой земли и лесопользованием, составила за период 2002—2011 гг.  $0,9 \pm 0,8$  млрд т С/год. Основной вклад в эту оценку давала эмиссия углерода, вызванная вырубкой лесов, составлявшая около

3 млрд т CO<sub>2</sub>/год. Она частично компенсировалась подрастанием молодых лесов на заброшенных сельскохозяйственных землях, ежегодный сток углерода за счет которых оценивался в 2,0 млрд т CO<sub>2</sub>/год (FAO, 2010).

Таблица 1

**Тренд среднегодовой эмиссии CO<sub>2</sub> (млрд т в год) за период с 1990 до 2011 гг. в основных промышленно развитых странах и странах с переходной экономикой**

Страна	1990	1995	2000	2006	2010	2011	2011/1990 (%)
США	4,99	5,26	5,87	5,84	5,53	5,42	9
ЕС (27)	4,32	4,08	4,06	4,21	3,91	3,79	-12
Китай	2,51	3,52	3,56	6,51	8,90	9,20	287
Индия	0,66	0,87	1,06	1,38	1,86	1,97	198
Россия	2,44	1,75	1,66	1,79	1,78	1,83	-25
Япония	1,16	1,25	1,28	1,30	1,26	1,24	7
Азиатские страны*	0,71	1,07	1,31	1,61	1,81	1,84	159
Другие страны**	1,83	2,24	2,69	3,37	3,93	4,10	124
Все страны	22,7	23,6	23,4	30,3	33,0	33,9	49

*Примечания.*

\*Азиатские тигры (Индонезия, Сингапур, Таиланд, Южная Корея и Тайвань).

\*\* Другие крупные развивающиеся страны (Бразилия, Мексика, Южная Африка, Саудовская Аравия, Индия и Иран).

Поскольку в таблицу годовой эмиссии включены только основные страны — источники CO<sub>2</sub>, то итоговая сумма эмиссии всех стран мира (последняя строка таблицы) существенно больше годовой эмиссии стран, представленных в таблице.

**Для справки:** общий выброс углерода в атмосферу в мире с учетом всех антропогенных источников составил в 2006 г. 9,22 млрд т, в 2007 г. 9,31 млрд т, в 2008 г. 9,45 млрд т, в 2009 г. 9,28 млрд т, в 2010 г. 9,50 млрд т (IEA, 2012), а в 2011 г. 8,54 млрд т (IEA, 2013);

Andres et al., 2013). Среди стран, вносящих основной вклад в прирост концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере на 2011 г. отметим: Китай — 29 %, США — 16 %, Евросоюз (EU27) — 11 %, Индия — 6 %, Россия — 5 %, Япония — 4 %.

В таблице 1 приведены данные по объемам выбросов стран мира, обеспечивающих основной вклад в эмиссию  $\text{CO}_2$  на 2011 г. (Olivier, 2012; GCP, 2011, 2012), а также динамика этих изменений с 1990 г. В последнем столбце таблицы приведены значения относительного прироста или снижения (знак минус) годовых объемов эмиссии  $\text{CO}_2$  за соответствующие годы.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что ситуация с ростом концентрации  $\text{CO}_2$  в мире остается по-прежнему опасной, хотя решения Киотского протокола в большинстве промышленно развитых стран к 2012 г. (время окончания действия его первого этапа) были выполнены, что проявилось в ежегодном снижении объемов эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу в странах ЕС в среднем примерно на 1,2 %. Однако рост промышленного производства в Китае и Индии и промышленно развитых странах Азии, а также в развивающихся странах Латинской Америки не привел к снижению глобального выброса  $\text{CO}_2$  в атмосферу к 2012 г., о чем свидетельствуют данные ежегодного глобального прироста концентрации  $\text{CO}_2$  за последние 6 лет, который происходил приблизительно с той же средней скоростью, что и за предыдущие 6 лет (см. рис. 1).

## 2. Метан

Концентрация атмосферного метана с начала индустриальной эры возросла более, чем в 2,5 раза в основном за счет антропогенной эмиссии. Глобальное значение концентрации  $\text{CH}_4$  в 2011 г. составило 1813 млрд<sup>-1</sup> (Бюллетень ВМО, 2012). Необходимо отметить, что для  $\text{CH}_4$  характерен сильный широтный ход концентрации (возрастание ее на  $\approx 100$  млрд<sup>-1</sup> при переходе от высоких южных широт к высоким северным), что как считается (Dlugokencky et al., 2009), обусловлено эмиссией болот северной Азии, таянием многолетней мерзлоты,

осадка в дельтах рек и возможной эмиссией гидратов метана. Глобальный бюджет  $\text{CH}_4$ , обусловленный а) естественными источниками, включает: эмиссию с болот и заболоченных земель 177—284 млн т  $\text{CH}_4$ /год, эмиссии, вызванные геологическими процессами 46—185 млн т  $\text{CH}_4$ /год; б) антропогенными: сельским хозяйством (выращивание риса и разведение крупного рогатого скота) 195—263 млн т  $\text{CH}_4$ /год, сжиганием ископаемого топлива 85—116 млн т  $\text{CH}_4$ /год, сжиганием биомассы 16—20 млн т  $\text{CH}_4$ /год, а также утечками при добыче природного газа и угля. Как следует из приведенных оценок, диапазон неопределенностей в оценке среднегодовых объемов эмиссии метана по-прежнему остается значительным. Следует отметить, что в готовящейся IPCC-AR5 по сравнению с предыдущей версией (IPCC-4, Ch 4 2007) добавлена эмиссия вследствие геологических источников, а диапазон неопределенностей оценок объемов эмиссии, обусловленной сгоранием ископаемого топлива и биомассы, значительно сужен. Также должно быть улучшено качество оценок межгодовых вариаций химического стока  $\text{CH}_4$ . Однако вопрос о причинах стабилизации бюджета метана в 90-х годах предыдущего столетия и в первые шесть лет нынешнего остается дискуссионным, также как и причины роста его эмиссии после 2007 г. Если в период с 1992 по 2006 г. ежегодный прирост концентрации  $\text{CH}_4$  составлял  $0,5 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ , то с 2007 по 2011 г. включительно он вырос до  $6 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ .

### 3. Закись азота

Содержание закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) в атмосфере в период с 2006 по 2011 гг. продолжало расти. Рост концентрации  $\text{N}_2\text{O}$  в атмосфере обусловлен в основном интенсификацией сельскохозяйственного производства, что связано с ростом населения земного шара. Рост объемов минеральных и органических удобрений, выделение продуктов жизнедеятельности домашних животных, полигонов захоронения отходов, а также нитрификация и денитрификация способствуют увеличению эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$  из почвы.

Однако рост эмиссии  $N_2O$  обусловлен не только сельскохозяйственным производством, но также ростом кислотности водной среды. Как поверхность почв, так и поверхность океана подвергаются воздействию атмосферных осадков, содержащих азот, поступающий в атмосферу в результате активации человеческой деятельности. Производство сельскохозяйственных продуктов ответственно более чем за 60 % антропогенной эмиссии  $N_2O$  в атмосферу (Park et al., 2012; Syakila, Kroeze, 2011). Оценить в целом как глобальный, так и региональный бюджет  $N_2O$  достаточно сложно, поскольку ее приземная концентрация зависит от многих факторов (определяющих в том числе и ее сток), таких как химическое разрушение в реакции с возбужденным атомарным кислородом  $O^1(D)$  и фотохимическая диссоциация в стратосфере.

Вследствие большого времени жизни  $N_2O$ , оцениваемого в 122—140 лет, стабилизация концентрации  $N_2O$  в атмосфере произойдет только спустя несколько десятилетий после стабилизации ее эмиссии. При этом необходимо подчеркнуть и то, что косвенно  $N_2O$  участвует в стоке тропосферного озона, снижая тем самым его вклад в парниковый эффект.

#### 4. Галогенуглероды и $SF_6$

Бюджет большинства галогенуглеродов, галогеногидроуглеродов, а также фторидов серы определяется почти исключительно человеческой деятельностью. Ниже в таблице 2 приведены среднегодовые концентрации основных галогенуглеродов для южного и северного полушарий в период с 2006 по 2011 г. Производство этих соединений запрещено Монреальским протоколом, но их концентрации в атмосфере, несмотря на прекращение производства, остаются высокими (Atmospheric CFC-11, CFC-12, CFC-113,  $CCl_4$  and  $SF_6$ , 2011).

Концентрация  $SF_6$ , которая стала активно использоваться на электролиниях высокого напряжения, ежегодно возрастает. Как следует из таблицы, содержание всех фреонов и  $SF_6$  в северном полушарии превышает на 1—5 % их содержание в южном, поскольку

производство и использование фреонов осуществляется главным образом в северном полушарии. Меры по ограничению производства фреонов-11, -12 и -113 были приняты одновременно, но снижение их концентрации в атмосфере происходит быстрее, чем у фреона-12 с бóльшим временем жизни в атмосфере.

Поскольку было рекомендовано применять галогеносодержащие соединения с меньшим временем жизни в тропосфере, то в молекулах альтернативных фреонов не все атомы водорода в процессе их производства были замещены атомами галогенов. Один или два атома водорода были сохранены, что позволило на порядок уменьшить время жизни фреонов в тропосфере. В ряде молекул альтернативных фреонов был исключен хлор — каталитический разрушитель озона.

*Таблица 2*

**Изменения среднегодовой глобальной концентрации фреонов: F-11, F-12, F-113, CCl<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub> в северном (N) и южном (S) полушариях земного шара в трлн<sup>-1</sup> (10<sup>-12</sup>) за 2006—2011 гг.**

Годы	F-11 N	F-11 S	F-12 N	F-12 S	F-113 N	F-113	CCl <sub>4</sub> N	CCl <sub>4</sub> S	SF <sub>6</sub> N	SF <sub>6</sub> S
2006	249,55	247,34	543,10	539,8	77,69	77,59	91,30	89,70	6,03	5,76
2006	249,55	247,34	543,10	539,8	77,69	77,59	91,30	89,70	6,03	5,76
2007	247,54	245,03	541,10	538,10	77,99	76,79	90,40	88,90	6,32	6,03
2008	245,63	243,12	538,60	536,20	76,29	76,20	89,30	87,70	6,62	6,29
2009	243,52	240,87	536,64	534,04	75,82	75,46	87,57	86,43	6,88	6,58
2010	241,24	239,00	534,57	532,38	74,82	74,68	86,32	85,69	7,18	6,86
2011	238,97	237,14	532,49	530,72	73,82	73,90	85,06	84,94	7,48	7.14

## 5. Поглощающий солнечную радиацию атмосферный аэрозоль (черный углерод)

Как следует из исследований последних лет, на второе место по своему вкладу в парниковый эффект в настоящее время стал претендовать так называемый «черный углерод» (Ramanathan, 2010; Bond et al., 2013), который в виде частиц аэрозоля поступает в атмосферу при сжигании угля и нефти и при пожарах. Он также является продуктом работы дизельных установок, получивших в последние годы широкое распространение в мире. Причем, если ранее глобальный радиационный форсинг за счет частиц сажевого аэрозоля оценивался величиной  $0,34 \pm 0,25 \text{ Вт/м}^2$  (IPCC, 2007), то в ряде последних публикаций оценки его величины достигают  $1,0\text{—}1,1 \text{ Вт/м}^2$  (Bond et al., 2013). Как следует, в том числе и из более ранних зарубежных оценок, в районах с продолжительным снежным покровом (с высоким альбедо) радиационный форсинг уже оценивался, как близкий к  $1 \text{ Вт/м}^2$  (Ramanathan, Carmichael, 2008). Высокая величина радиационного форсинга сажевых частиц аэрозоля, составляющая, как следует из цитируемых выше работ, более 50 % от радиационного форсинга  $\text{CO}_2$ , может существенно сказаться на климате России, особенно ее северных регионов, в ближайшие десятилетия. Наиболее полное исследование источников черного углерода содержится в (Bond et al., 2013), согласно которому источниками атмосферного черного углерода являются следующие процессы и механизмы:

- сгорание биомассы при пожарах в лесах и саванне — 42 %,
- сгорание биомассы, используемой в качестве топлива — 18 %,
- транспорт, работающий на дизельном топливе — 14 %,
- использование дизельных установок в промышленности — 10 %,
- в других промышленных процессах, включая теплоэнергетику малой мощности — 10 %,
- использование каменного угля в жилом секторе — 6 %.

В соответствии с данными последних исследований, сажевый аэрозоль по вкладу в парниковый эффект может вполне соперничать с метаном (Hansen, Nazarenko, 2004; Ramanathan et al., 2005). Черный

углерод «BC», как и сажевый “soot carbon”, а также поглощающий свет аэрозоль (LAC) могут быть идентифицированы как загрязненная фракция углерода с подобной графиту структурой. Черный углерод, как считается, играет важную роль в формировании современного климата. Поглощающий солнечную радиацию аэрозоль является субстанцией, обладающей комбинацией различных физических свойств, благодаря которым он в той или иной мере участвует в процессах, от которых зависят результирующий форсинг и соответствующие неопределенности в оценках. Это процессы, связанные с поглощением прямой солнечной радиации, влиянием на фазовое состояние частиц аэрозоля, на облачность и осадки в виде дождя или снега.

Общая глобальная эмиссия черного углерода, оцениваемая на основе инвентаризации, составляла 7500 млн т/год в 2000 г. при неопределенности оценок от 2000 до 29000. Однако более поздние оценки вклада BC в поглощение позволили получить глобальную оценку радиационного форсинга атмосферного черного углерода (при вычитании радиационного форсинга сажевого аэрозоля до эры индустриализации) как 0,71 Вт/м<sup>2</sup>год при 90 % вероятности (2σ) и неопределенности в пределах (+0,08, +1,27). В то время как общий радиационный форсинг, обусловленный BC, составляет +0,88 (+0,17, +1,48) Вт/м<sup>2</sup> в год (Bond et al., 2013).

Однако оценок одного прямого радиационного форсинга еще недостаточно для того, чтобы охватить основные механизмы, его создающие. Структура, определяющая радиационный форсинг BC, должна включать и такие механизмы как форсинг облачности и форсинг криосферы. В результате наилучшей оценкой вклада в глобальный радиационный форсинг BC будет являться оценка +1,1 Вт/м<sup>2</sup> при 90 % вероятности и неопределенности от +0,17 до +2,1 Вт/м<sup>2</sup>.

В реальной атмосфере на формирование нетто форсинга, обусловленного аэрозолем, оказывают влияние и сопутствующие примеси, включая как составляющие, обеспечивающие отрицательный форсинг (такие как SO<sub>2</sub>), так и составляющие, ответственные за положительный форсинг (продукты сгорания

углеводородного биотоплива), вклад которых в постиндустриальный период оценивается в  $+0,22$  ( $-0,50$  до  $+1,08$ )  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . Среди различных видов источников эмиссии черного углерода, таких как эксплуатация дизелей, отопление жилых домов дровами, создаваемый им тепловой эффект может быть настолько сильным, что его вклад превысит вклад всех источников, создающих отрицательный форсинг. Если учесть все виды эмиссии аэрозоля, включая эмиссию при сгорании органического материала на открытом воздухе, и значение эмиссии за счет всех видов ВС, то наилучшей оценкой нетто радиационного форсинга будет величина  $-0,06$   $\text{Вт}/\text{м}^2$  при 90 % вероятности и границах неопределенности от  $-1,45$  до  $+1,29$   $\text{Вт}/\text{м}^2$  (Bond et al., 2013).

## **6. Баланс основных парниковых газов на территории России**

Территория Российской Федерации (17,08 млн  $\text{км}^2$ ), простираясь от  $30^\circ$  до более чем  $180^\circ$  восточной долготы, обладает самой большой из стран мира площадью, занимаемой лесами (около 45 % территории), болотами (более 11 % территории), кроме того более 60 % ее территории находится в зоне многолетней мерзлоты. Континентальный шельф восточносибирских морей: Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, содержит под своей поверхностью колоссальные запасы гидратов метана, накопленных за период голоцена. Произошедшие за последние десятилетия изменения глобальной температуры воздуха особенно сильно проявились в Арктике, в частности, в Восточной Сибири, в которой превышение среднегодовой температуры достигает  $2^\circ\text{C}$ . По данным 50-летних наблюдений на станции Тикси, протаивание многолетней мерзлоты в настоящее время стало наблюдаться на 10—12 дней раньше. Существенное снижение площади сплошного морского льда в Северном Ледовитом океане резко уменьшило альбедо поверхности, что привело на мелководном прибрежном шельфе к повышению температуры воды. Увеличение эрозии почв по берегам крупнейших рек Восточной Сибири приводит к выносу в океан больших количеств осадка (формируемого легко растворимыми в воде фракциями

породы, содержащими углерод, включая и метан). Особенности структуры наземных пород, формирующих состав многолетней мерзлоты, наличие в доледниковый период больших заболоченных территорий привело к накоплению метана и непосредственно в слое многолетней мерзлоты, достигающей в самых северных районах глубины до 500 м.

### ***Вклад лесов в баланс CO<sub>2</sub> на территории РФ***

Леса являются основным типом растительного покрова на обширных пространствах России. Они призваны обеспечивать компенсацию антропогенных выбросов, обусловленных промышленностью, транспортом и землепользованием. Как известно в РФ около 70 % относятся к землям Лесного фонда. Поэтому Лесной фонд является наиболее важным стабилизирующим и ресурсобразующим природным комплексом страны. Лесной фонд — природный и хозяйственный объект федеральной собственности, представляющий совокупность лесных и нелесных земель в границах, установленных в соответствии с лесным и земельным законодательством. К Лесному фонду относятся все леса, за исключением лесов на землях Министерства обороны РФ и населенных пунктов (городские леса). Общая площадь земель на 01.01.2005 г. составила 1173,9 млн га, из них на леса Лесного фонда приходилось 1133,1 млн га. Общая площадь лесов, не входящих в Лесной фонд, — 5,9 млн га. Лесистость составляет в среднем 45,4 % и значительно колеблется по регионам в пределах территории страны (см. рис. 2). Эти показатели практически не изменились за последние 5 лет. Наибольшие значения лесистости (более 80%) отмечены в подзоне средней тайги — Пермском крае, Республике Коми и Центральной Сибири. Наиболее малолесные районы (лесистость менее 1 %) расположены в аридной зоне европейской территории РФ (Республика Калмыкия, Ставропольский край, Астраханская, Ростовская и Волгоградская области). Земли Лесного фонда по своему функциональному назначению делятся на лесные и нелесные (рис. 2). Лесные земли составляют примерно 65 % общей площади земель Лесного фонда. В свою очередь, лесные земли

делятся на покрытые и не покрытые лесной растительностью. К непокрытым лесной растительностью землям относят болота, луга, пески и пр. По сравнению с предыдущим пятилетием структура лесного фонда (МЛР России) изменилась незначительно. Действующая система лесных законодательных актов, нормативных и методических документов основана на существующем делении Лесного фонда на три группы лесов. Для каждой группы лесов установлены определенные правила ведения лесного хозяйства, проведения лесоустройства, назначения хозяйственных мероприятий (Гос. Доклад, 2006).

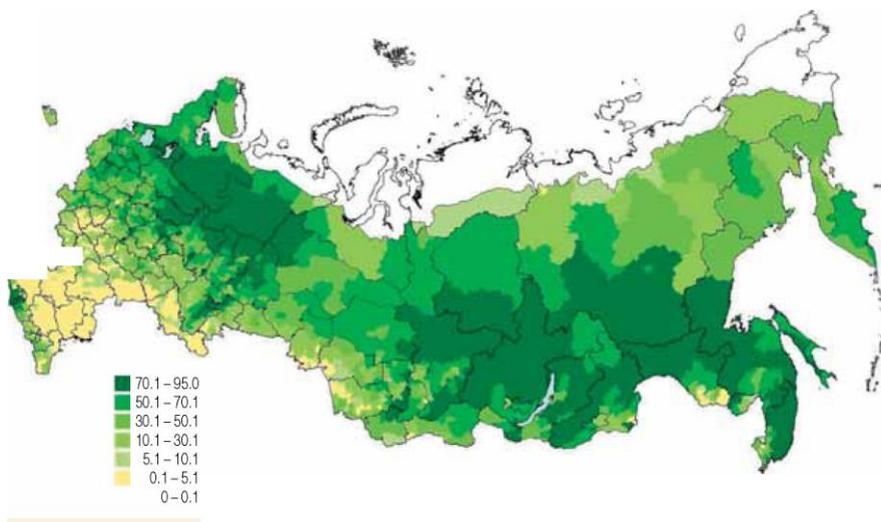


Рис. 2. Лесистость регионов территории Российской Федерации в процентах от их общей площади.

Согласно (Замолодчиков и др., 2011), вклад российских лесов в сток углерода после 1990 г., когда леса РФ оказались источником  $\text{CO}_{2\text{ЭКВ}}$  в объеме 40 млн т  $\text{CO}_{2\text{ЭКВ}}$  (Третье Национальное сообщение РФ, 2002), непрерывно возрастал. В результате в 2008 г. бюджет лесов РФ оценивался уже почти в 240 млн т С/год (в 1998 в 201 млн т С/год). Целый ряд авторов считает, что вклад лесов, оцениваемый по данным

Лесного фонда РФ существенно занижен. В частности, авторами (Заварзин, Кудеяров, 2006) считается, что лесами РФ поглощается весь ее антропогенный выброс (промышленность, транспорт, лесопользование и сельское хозяйство), который за период 1996—2002 гг. составлял 782 млн т С/год, в то время как среднегодовой баланс углерода в сторону стока оценивался в 868 млн т С /год. В другой работе (Филипчук, Моисеев, 2004) нетто-поглощение лесами определялось величиной более 400 млн т С /год. Таким образом, разница в диапазоне оценок стока углерода лесами разными группами ученых, даже в работах последнего десятилетия, превышает 3,5 раза, что не позволяет выполнить более или менее корректную оценку вклада лесов России в бюджет  $\text{CO}_2$ .

***Вклад зоны многолетней мерзлоты (болота, таяние мерзлоты, континентальный шельф, осадок речного стока и др.) в баланс углерода***

Оценки вклада зоны вечной мерзлоты в баланс углерода ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) еще более противоречивы. Всеми исследователями безоговорочно признается роль болот в формировании потока эмиссии метана в атмосферу, который, как считалось, зависел в основном от уровня болотных вод и температуры активного слоя торфа: чем выше уровень воды — тем больше поток  $\text{CH}_4$ , чем ниже — тем больше степень окисления  $\text{CH}_4$  до  $\text{CO}_2$  и, соответственно, меньше поток  $\text{CH}_4$ . При уровне болотных вод ниже 30 см от поверхности болота эмиссия  $\text{CH}_4$  снижалась более чем на порядок. Однако необходимо отметить, что практически всегда при положительных температурах почвы наблюдалась эмиссия  $\text{CO}_2$  болотными системами, причем количество выбрасываемого в атмосферу  $\text{CO}_2$ , как правило, почти на два порядка (в отсутствие процесса фотосинтеза) превосходила эмиссию  $\text{CH}_4$ . Наличие фотосинтеза при высоком разнообразии болотной растительности играло существенную роль в снижении эмиссии  $\text{CO}_2$  болотами, однако в зависимости от вида растительности и уровня освещенности вариации в наблюдаемых нетто-потоках были высокими. Согласно (Калюжный, Лавров, 2012), сезонный ход эмиссии диоксида углерода на олиготрофном болоте в

Северо-Западном регионе РФ отличался медленным ростом после завершения зимнего сезона. Так в марте среднесуточная осредненная за месяц эмиссия  $\text{CO}_2$  по результатам многолетних наблюдений на Карельском перешейке (болотный полигон Ламмин-Суо) составляла  $\approx 20$  мг/м<sup>2</sup>час. В июне месяце она обычно достигала 70—80 мг/м<sup>2</sup>час, а максимальное среднемесячное значение наблюдалось в августе, когда эмиссия  $\text{CO}_2$  достигала 160 мг/м<sup>2</sup>час. В период аномально жаркого лета 2010 г. осредненная за июль месяц эмиссия диоксида углерода составила 750 мг/м<sup>2</sup>час, а за август месяц в середине которого температура воздуха достигла 35 °С, более 2220 мг/м<sup>2</sup>час, причем в сентябре, когда произошло заметное снижение температуры воздуха, до значения около 280 мг/м<sup>2</sup>час, величина которого даже в этом месяце превосходила значения эмиссии  $\text{CO}_2$ , наблюдаемые с 2002 г. Данные экспериментов показали, что эмиссия  $\text{CH}_4$  даже при максимальном расстоянии уровня болотных вод от поверхности, но при высокой температуре почвы также имеет высокий уровень эмиссии, достигающий 15—20 мг/м<sup>2</sup>час. В то же время в 2008 г. в сентябре при значительно более низких температурах воздуха при среднем уровне болотных вод наблюдались потоки  $\text{CH}_4$ , достигающие 15 и даже 20 мг/м<sup>2</sup>час, при диапазоне вариаций от 0,7 до 20 мг/м<sup>2</sup>час.

Сравнение представленных данных эмиссии  $\text{CH}_4$  с данными, полученными на станции Фразендейл в Канаде (Kuhlmann et al., 1998) для сентября, показывает, что несмотря на значительно меньшую широту расположения станции (около 50° с. ш.) среднее суточное значение потока не превышало 11,5 мг/м<sup>2</sup>сутки.

## **7. Мониторинг парниковых газов на территории России**

В настоящее время сеть регулярных наблюдений парниковых газов Росгидромета на территории РФ состоит из четырех станций, две из которых относятся к фоновым. Это станции Териберка (Кольский п-ов, начало наблюдений — 1988 г.), Новый Порт (п-ов Ямал, начало наблюдений — 2004 г.), Воейково (Ленинградская обл., начало наблюдений — 1996 г.), Тикси (Республика Саха, начало наблюдений — 2010 г.).

**Станция Териберка.** Измерения концентрации  $\text{CO}_2$  были начаты в 1988 г., измерения  $\text{CH}_4$  в 1996 г. и продолжаются до настоящего времени. Измерения дискретные: еженедельные парные отборы проб воздуха во флаги емкостью 2,0 л. Анализ проб выполняется с периодической калибровкой по вторичным стандартам лаборатории NOAA/ESRL в аналитической лаборатории ГГО. В таблице 3 представлены среднегодовые значения концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  за два периода наблюдений с 2001 по 2006 г. и с 2007 по 2012 г.

Таблица 3

**Концентрации парниковых газов по данным станций России и станции Барроу (США)**

Станция	2007	2008	2009	2010	2011
	<i>Концентрация <math>\text{CO}_2</math> (ppm)</i>				
Тикси РФ				389,0*	395,3
Териберка РФ	385,0	388,1	390,4	392,5	394,0
Новый Порт РФ	389,3	389,8	395,8	397,23	400,06
Барроу США	385,0	387,4	388,3	390,8	393,1
	<i>Концентрация <math>\text{CH}_4</math> (ppb)</i>				
Тикси РФ				1907,7*	1916,0
Териберка РФ	1871,3	1877,3	1894,9	1906,1	1907,0
Новый Порт РФ	1976,3	1985,0	2004,6	1974,7	1954,6
Барроу США	1873,1	1883,8	1885,6	1996,4	1896,0

*Примечание.*

\*— получено по данным наблюдений за июль — декабрь.

Как следует из таблицы, среднее межгодовое приращение концентрации  $\text{CO}_2$  на станции Териберка практически не отличается от глобального значения прироста  $\text{CO}_2$ , как за период 2001—2006 гг., так и за период 2007—2012 гг., несмотря на ограничения по объему эмиссии парниковых газов для промышленно развитых стран к 2008—2012 гг., предусмотренных Киотским протоколом.

Метеоплощадка, с которой проводятся отборы проб воздуха, расположена на расстоянии 100 м от станции и выше ее на 15 м.

В таблице 3 приведены результаты измерений среднегодовых концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в приземном слое воздуха на станциях сети Росгидромета за период после выхода ОД\_РФ-1, в том числе на станциях Тикси (в устье Лены) и Новый Порт (на полуострове Ямал), причем в таблице указаны значения концентрации, измеренные на станции Барроу (на северном побережье Аляски, США), близкой к Тикси по климатическим условиям. Несколько повышенные величины концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на полуострове Ямал, связаны с приходом на станцию (южное побережье п-ва Ямал) воздушных масс из мест добычи природного газа в регионе. Методика измерений и данные мониторинга проверялись путем калибровки измерительной шкалы по вторичным стандартам NOAA/ESRL.

На рис. 3 представлен сезонный ход концентрации  $\text{CO}_2$ , а также для сравнения показан сезонный ход его концентрации на уровне расчетного морского фона MBL, полученного в результате осреднения данных наблюдений концентраций  $\text{CO}_2$  на фоновых станциях, расположенных в той же широтной зоне, что и станция Териберка (Решетников и др., 2011).

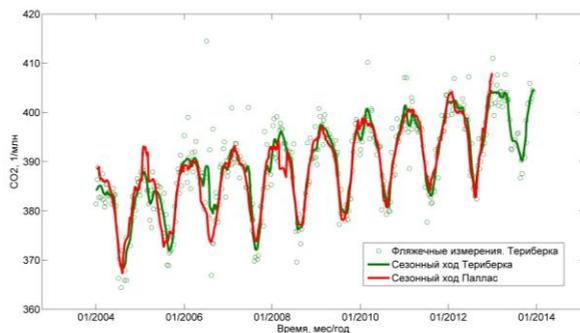


Рис. 3. Данные еженедельных измерений концентрации  $\text{CO}_2$  за период с 2004 по 2011 г.

Аппроксимация данных измерений для получения сезонного хода концентрации проведена методом экспоненциального сглаживания. Красным цветом изображен расчетный сезонный ход — MBL концентрации  $\text{CO}_2$ .

Как следует из рисунка, максимумы сезонного хода концентрации  $\text{CO}_2$  на станции наблюдаются приблизительно на 1—2 месяца раньше, чем максимумы концентрации  $\text{CO}_2$  MBL и, как правило, на  $1\text{—}2 \text{ млн}^{-1}$  превышают их. Если причиной измеренных превышений концентрации  $\text{CO}_2$  являются местные или удаленные источники, то причин фазового сдвига сезонного хода, максимум которого от года к году приходится на разное время, может быть несколько. Одной из возможных является раннее или позднее время промерзания активного слоя почвы на станции.

**Станция Новый Порт.** Особенностью наблюдений на станции Новый Порт, расположенной на берегу Обской губы, является то, что при направлениях переноса воздушных масс с Востока и Юго-Востока они, как показали результаты многолетних наблюдений, обогащены природным газом от расположенных на противоположном берегу Обской губы действующих газоконденсатных месторождений. На рис. 4 и 5 представлены данные измерений концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  за период с 2004 по 2013 гг. Как показывают данные измерений, за все годы наблюдалось повышение концентрации  $\text{CO}_2$  на ст. Новый Порт в среднем на 5 ppm (1,3 %), кроме 2008 г. Оно, по всей вероятности, обусловлено сжиганием попутного (нефтяного) газа, объем которого оценивается в 50—60 млн т/год (Книжников, Пусенкова, 2010) на нефтяных месторождениях, расположенных в среднем течении р. Обь (Сургут, Нефтеюганск, Нижневартовск) на 600—800 км южнее станции.

Превышение концентрации  $\text{CH}_4$  над фоновыми значениями других станций в этой же широтной зоне составляло в среднем 90 ppb ( $\approx 5\%$ ). Аномально высокие концентрации  $\text{CH}_4$ , наблюдаемые на станции, обусловлены технологией добычи природного газа и его потерями на распложенных южнее и восточнее на расстоянии 80—250 км газоконденсатных месторождениях (Ямбургское, Заполярное, Уренгойское, Русское и др.).

Согласно статистическим данным, среднегодовые объемы добычи за рассматриваемый период до 2008 г. включительно изменялись незначительно (колебание объемов добычи в пределах  $\pm 2\%$ ).

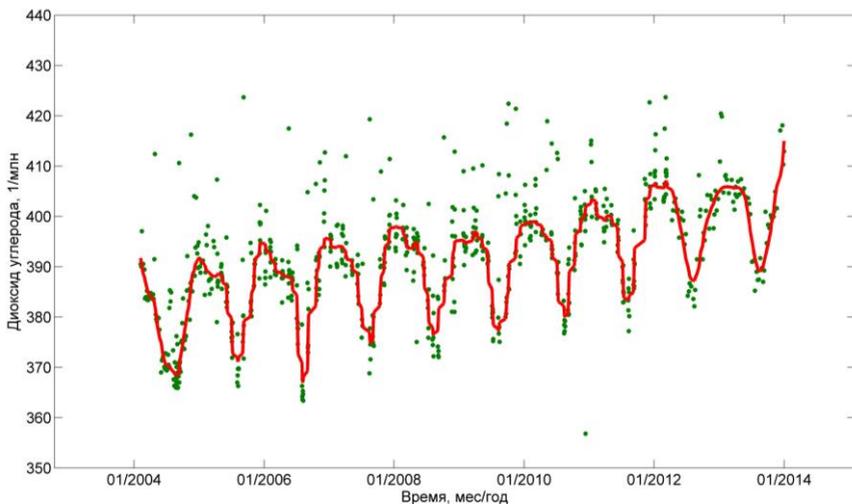


Рис. 4. Данные измерений концентраций  $\text{CO}_2$  на станции Новый Порт за период с 2004 по 2013 г.

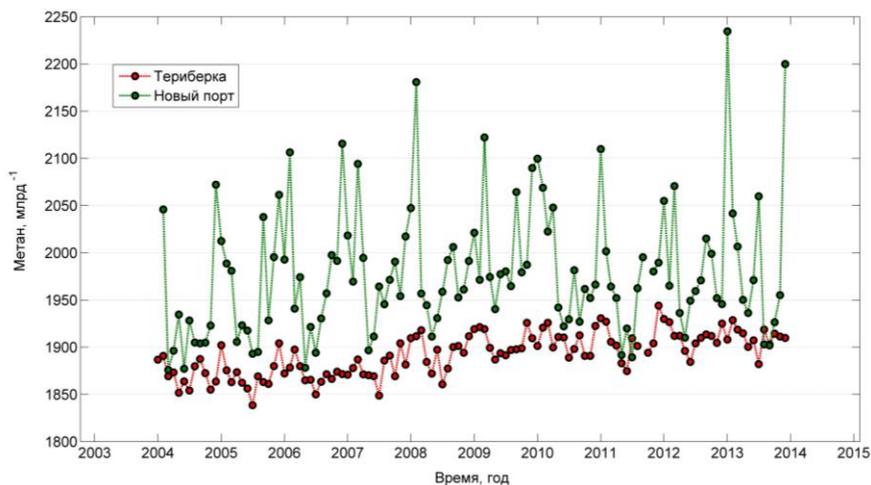


Рис. 5. Среднемесячные концентрации  $\text{CH}_4$  на станции Новый Порт с 2004 по 2013 г. (зеленая кривая) в сравнении с данными измерений концентрации  $\text{CH}_4$  на станции Териберка (красная кривая).

Существенный вклад в величину амплитуды сезонных вариаций концентрации метана мог вносить сезонный ход толщины пограничного слоя атмосферы (ПСА). При различной толщине ПСА приращения концентраций ПГ над фоновым уровнем, обусловленные региональными источниками, распределяются по слою перемешивания разной толщины. Для исключения влияния толщины ПСА на результат измерений концентрации  $\text{CH}_4$  использовалась модель пограничного слоя атмосферы HYSPLIT ([www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html](http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html)), позволяющая рассчитать его высоту в районе расположения станции, что дало возможность скорректировать среднемесячные отклонения концентрации от фоновых значений. Для этого разность между измеренной и расчетной фоновой концентрациями  $\Delta C_i = C_{\text{изм}} - C_{\text{фон}}$ , (отражающая вклад естественных и антропогенных источников в регионе) с целью исключения влияния толщины ПСА на величину концентрации  $\text{CH}_4$ , умножалась на отношение рассчитанной по модели HYSPLIT высоты верхней границы ПСА к величине ее максимального среднемесячного значения для конкретного года:

$$\Delta C_{\text{икор}} = \Delta C_i \cdot H_{\text{инг}} / H_{\text{ингmax}},$$

где:  $H_{\text{ингmax}}$  — максимальное для конкретного года среднемесячное значение толщины ПСА,

$H_{\text{инг}}$  — средняя толщина ПСА для конкретного месяца года.

В результате проведения указанной корректировки удалось привести разность  $\Delta C_i$  к единой толщине ПСА, что позволило получить не искаженные влиянием изменения толщины ПСА среднемесячные концентрации  $\text{CH}_4$  (Решетников и др., 2011).

Предложенный подход позволит контролировать по данным измерений выполнение мероприятий по снижению потерь природного газа при его добыче и подготовке его к транспортировке.

**Станция Тикси.** Арктическая гидрометеорологическая обсерватория в районе п. Тикси (ГМО «Тикси») создавалась в рамках специализированного международного проекта национальных метеорологических служб России, США и Финляндии как ключевое

звено системы международных гидрометеорологических наблюдений и научных исследований в Арктике. Обсерватория в Тикси должна стать важным компонентом сети действующих арктических атмосферных обсерваторий, включающей обсерватории в Барроу (Аляска, США), Эврика и Алерт (Канада), Саммит (Гренландия), Нью-Алесунд (Норвегия), Паллас и Соданкула (Финляндия) и Абиско (Швеция). Совместная работа перечисленных обсерваторий обеспечит циркумполярный мониторинг гидрометеорологических процессов в высоких широтах. Станция Тикси, как это следует из карты расположения отечественных и зарубежных фоновых станций ГСА в Арктике, ликвидирует крупный пробел в регионе арктической Азии (Решетников, Макштас, 2013).

Регулярные наблюдения на ГМО «Тикси» были начаты в августе 2010 г., и к настоящему времени получен уже достаточно обширный объем информации. В ГМО «Тикси» налажен регулярный отбор проб воздуха, сравнения данных измерений концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  с аналогичными измерениями, выполняемыми лабораторией NOAA/ESRL. Финским Метеорологическим Институтом при участии ГГО организованы непрерывные измерения этих газов, а также счетной концентрации и размеров аэрозоля от 7 нм до 15 мкм. Введен в действие наблюдательный комплекс по исследованию радиационного баланса системы подстилающая поверхность — атмосфера, а также нетто потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . На рис. 6 приведены результаты непрерывных и фляжечных еженедельных наблюдений  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  за 2011—2012 гг.

С началом вегетации (июнь) концентрации  $\text{CO}_2$  начинают падать ввиду возникновения стока  $\text{CO}_2$  в процессе фотосинтеза приземной растительности (в основном — трава). С ростом температуры почвы возрастает эффективность дыхания микробов, корней, грибов (с начала августа до начала октября), и возникает обратный процесс — эмиссия  $\text{CO}_2$ , в результате чего наблюдается рост концентрации  $\text{CO}_2$  в приземном слое атмосферы. Зимой процессы, обусловленные обменом между поверхностью и атмосферой прекращаются, и концентрация  $\text{CO}_2$  определяется переносом с материковой части

Якутии. На рис. 7 приведены результаты измерений концентрации  $\text{CH}_4$  за тот же период на станции Тикси.

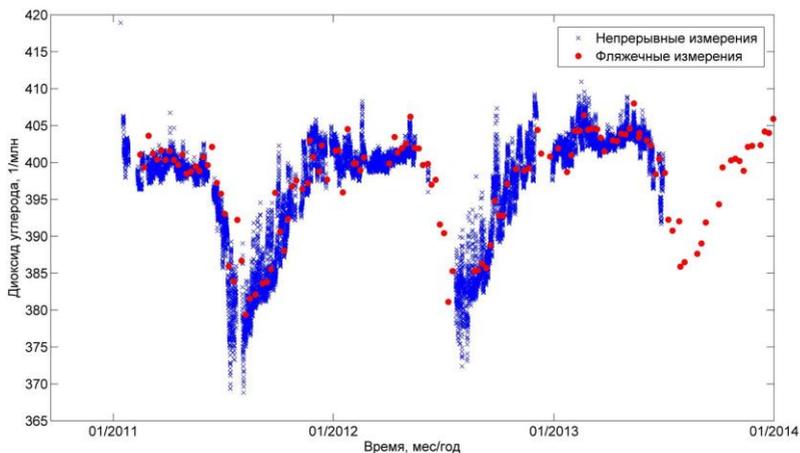


Рис. 6. Концентрация  $\text{CO}_2$  на станции Тикси: среднечасовые значения — синие крестики, еженедельные измерения концентраций  $\text{CO}_2$  в пробах воздуха — красные кружки.

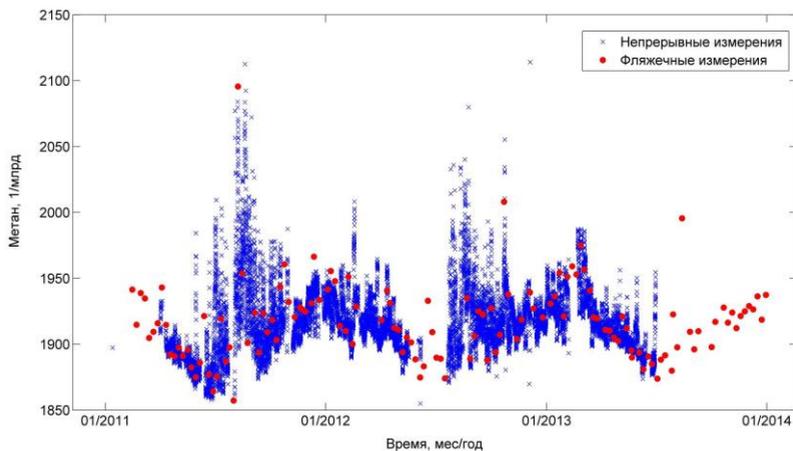


Рис. 7. Концентрация  $\text{CH}_4$  на станции Тикси: среднечасовые значения — синие крестики, еженедельные измерения концентраций  $\text{CH}_4$  в пробах воздуха — красные кружки.

В отличие от сезонного хода  $\text{CO}_2$  изменения концентрации  $\text{CH}_4$  начинаются приблизительно на месяц позже (пока не прогреется активный слой почвы на глубину до 20—30 см). По мере прогрева почвы начинается ее оттаивание, а затем таяние вечной мерзлоты (глубина  $\approx 40$  см) содержащей  $\text{CH}_4$ , накопленный в доледниковый период. На заболоченных землях возрастает активность метаногенов (бактерии). Максимумы того и другого процесса приходятся на август.

Однако окончание процесса таяния мерзлоты ввиду высокой теплоемкости почвы сдвинуто уже к середине октября. Среднесуточная температура воздуха становится ниже  $0^\circ\text{C}$  обычно между 1 и 5 октября. В отличие от фоновых станций умеренных широт северного полушария, на которых максимум концентрации  $\text{CH}_4$  приходится на зимние месяцы года, здесь максимум концентрации  $\text{CH}_4$  наблюдается в июле и августе. Этот фактор, наблюдаемый также и на станции Барроу (Аляска), привел авторов (Shakhova et al., 2010) к ошибочным выводам (полученным по результатам пятилетних судовых и вертолетных измерений концентраций  $\text{CH}_4$  в летние месяцы года) о разрушении гидратов метана, залегающих на дне мелководного шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Общий фон концентрации  $\text{CH}_4$  согласно данных этих измерений на протяжении более 1000 км вдоль северного побережья материка от устья р. Лена до Чукотского моря был существенно выше  $2,0 \text{ млн}^{-1}$  (среднее значение  $\approx 2,4 \text{ млн}^{-1}$ ), в то время как в районе, прилегающем к Тикси, как следует из (Shakhova et al., 2010), наблюдались и концентрации  $\text{CH}_4$ , достигающие значений  $7,0\text{—}8,0 \text{ млн}^{-1}$ .

Действительно, как это следует из данных непрерывных измерений (рис. 7), в июле-августе в районе Тикси наблюдались повышенные концентрации  $\text{CH}_4$ , превышающие  $2,0 \text{ млн}^{-1}$ , причем максимальные среднечасовые значения иногда достигали  $2,15\text{—}2,20 \text{ млн}^{-1}$ . Была проведена оценка влияния повышения концентрации на средние значения, как за эти месяцы, так и за год в целом. Подробно результаты этих оценок изложены в статье (Решетников, Ивахов, 2012), здесь же приведем таблицу 4, в которой

сравниваются среднемесячные и среднегодовые значения измеренных концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на арктических станциях за 2010—2011 гг.

Как следует из таблицы, в июле, августе и сентябре на станции Тикси наблюдались повышенные концентрации  $\text{CH}_4$ , это превышение по сравнению с данными станций Териберка и Барроу в сентябре 2010 г. составило 1,2 % и 0,6 % соответственно, в августе 2011 г. оно было больше, чем на станции Барроу на 2,5 %, а на станции Териберка на 1,8 %. Среднегодовое значение в 2010 г. на станции Тикси было больше, чем на станции Барроу на 1,0 %, а в 2011 г. оно превышало значения на ст. Териберка на 0,47 % и на ст. Барроу на 1,0 %. Результаты непрерывных измерений, подтверждаемые и данными независимых фляжечных наблюдений, позволяют констатировать, что в настоящее время и в ближайшем будущем эмиссии метана, обусловленной разложением его гидратов, образованных в подшельфовом слое вечномерзлого грунта, ожидать не следует, поскольку повышение температуры воды в нижних надшельфовых водных слоях вряд ли произойдет. В то же время более раннее начало таяния вечной мерзлоты приводит к некоторому приросту концентрации  $\text{CH}_4$  в регионе.

*Таблица 4*

**Среднемесячные и среднегодовые концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , измеренные на станциях Тикси, Териберка, Барроу (США)**

Месяц, год	Барроу		Териберка		Тикси	
07.2010	384,89	1889,39	385,5	1888,9	—	—
08.2010	379,91	1889,95	380,5	1898,1	386,45	1909,4
09.2010	383,00	1899,70	383,0	1912,6	388,01	1925,9
07.2011			—	—	385,96	1909,2
08.2011			—	—	382,35	1959,0
2010	390,8	1896,4	392,5	1906,1	389,0*	1907,8*
2011	393,1	1896,0	394,0	1907,0	395,3	1916,0

Примечание.

\*Среднегодовая концентрация  $\text{CH}_4$  в Тикси за 2010 г. получена по данным шести месяцев наблюдений.

## 9. Другие наблюдения на территории России

В период с 2004 по 2010 гг. другими (кроме ГГО) организациями был выполнен достаточно большой объем наблюдений по концентрациям как парниковых, так и сопутствующих газов. При этом необходимо отметить прежде всего регулярные наблюдения за концентрацией парниковых и сопутствующих газов на станции Института Физики атмосферы (ИФА) АН РФ под Кисловодском (станция Шаджатмаз в предгорьях Северного Кавказа), на которой в течение почти 30 лет велись наблюдения концентрации двуокиси азота  $\text{NO}_2$  (Арабов и др., 2012), играющей важную роль в образовании тропосферного озона. На станции проводятся измерения концентрации и других газов:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ , приземного озона. ИФА совместно с Институтом Леса проводились непрерывные измерения концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на 300-метровой вышке в местечке Зотино на Юге Красноярского края ( $60^\circ 45'$  с. ш.  $89^\circ 23'$  в. д), а также выполнялись отборы проб с самолета до высоты 7000 м. Однако эти наблюдения на нескольких уровнях в атмосфере были относительно непродолжительными и выполнялись только в летний сезон года. В (Panov et al., 2012) представлены результаты непрерывных измерений на вышке в обсерватории Зотино. Данные измерений (вышка расположена в лесном массиве) показали значительные вариации в концентрациях  $\text{CH}_4$ , измеренных на пяти уровнях от 4 до 300 м в ноябре и декабре. Было отмечено существенное увеличение концентрации метана в декабре при низких температурах воздуха у земли, достигающих  $-30^\circ\text{C}$ .

Институтом Атмосферной оптики Сибирского отделения РАН совместно с Научным центром глобальных исследований Национального института окружающей среды Японии, Хоккайдским университетом, Аэрокосмическим агентством Японии была организована сеть из восьми наблюдательных станций (JR – SATION), с помощью которой выполнен обширный комплекс исследований концентраций  $\text{CH}_4$  в Западной Сибири на вышках, расположенных в зоне от  $51^\circ$  до  $63^\circ$  с. ш. и от  $62^\circ$  до  $84^\circ$  в. д. (за исключением станции Якутск, расположенной на долготе  $129^\circ$  в. д.). Целью этих

исследований являлось выяснение роли обширных заболоченных территорий Западной Сибири площадью 132 млн га, включая и зону вечной мерзлоты с многочисленными таликовыми озерами, в формировании поля концентрации метана, особенно в связи с наблюдаемыми за последние десятилетия аномалиями среднегодовой температуры приземного воздуха, достигающими на севере Сибири порядка 4 °С по данным Национального климатического центра данных (Dlugokencky et al., 2009).

Для эксперимента было построено семь вышек на территории Западной Сибири высотой от 47 до 85 м, и одна в Якутии высотой ≈ 70 м. Исследования выполнялись в период с 2004 по 2008 гг. Наблюдения велись практически непрерывно. На основе данных этого мониторинга было установлено, что как в летний, так и в зимний периоды наблюдались высокие значения концентраций метана, причем максимальные значения и максимальные амплитуды вариаций концентраций отмечались на вышках в северной части Западной Сибири. Летом амплитуды концентрации метана составляли порядка 2000 млрд<sup>-1</sup> в большинстве пунктов наблюдений, в отдельные дни они достигали даже 2200 млрд<sup>-1</sup>, что авторами объяснялось повышенной эмиссией метана из района болот и заболоченных территорий, занимающих большую часть территории севера Западной Сибири (Sasakawa et al., 2010). Особенно высокие значения концентрации имели место летом 2007 г., которое характеризовалось высокими дневными температурами приземного слоя воздуха при высоком уровне осадков. Максимум концентрации метана в зимнее время года объяснялся понижением верхней границы пограничного слоя атмосферы, и проявлением влияния антропогенных источников, вклад которых в летний период года маскировался естественными источниками эмиссии.

Продолжением исследований концентрации парниковых газов в Западной Сибири являлась и работа Аршинова с соавторами (2012), в которой изложены результаты регулярных наблюдений концентраций CO<sub>2</sub> на семи пунктах наблюдений, оборудованных недисперсионными газоанализаторами Li-7000 фирмы Li Cor Inc. (измерение концентрации CO<sub>2</sub>).

Таблица 5

Среднегодовые концентрации CO<sub>2</sub> (млн<sup>-1</sup>) в пунктах мониторинга на территории Западной Сибири

Пункт наблюдений	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Березоречка</i> (59°09' с. ш. 84°20' в. д.)	384,6	386,0	387,1	388,2	390,7	392,1	394,2
Карасевое (58°15' с. ш. 82°25' в. д.)		385,9	386,9	388,4	390,6	391,9	394,3
Игрим (63° 11' с. ш. 64°25' в. д.)		387,0	388,9	389,9	391,9	394,3	396,8
Ноябрьск (63° 26' с. ш. 75°47' в. д.)			387,6	388,5	390,2	392,0	395,0
Саввушка (51° 20' с. ш. 82° 08' в. д.)				387,2	388,9	391,0	393,6
Демьянское (59° 47' с. ш. 73°02' в. д.)			387,1	389,1	390,8	391,4	394,8
Азово (54° 44' с. ш. 64°25' в. д.)					390,1	392,1	395,0
Ваганово (54° 30' с. ш. 62° 19' в. д.)						390,8	393,0
Териберка (69° 12' с. ш. 35° 06' в. д.)		381,6	384,8	385,0	388,1	390,4	392,1

Примечание.

В последней строке таблицы для сравнения приведены данные измерений концентрации CO<sub>2</sub> на станции Териберка (Кольский п-ов).

В таблице 5 представлены среднегодовые значения концентрации  $\text{CO}_2$  за период с 2004 по 2010 гг. для семи пунктов наблюдений (в качестве пунктов наблюдений использованы те же места, где в предыдущей статье выполнялись измерения на вышках). Однако измерения  $\text{CO}_2$  выполнялись на самом нижнем уровне определяемого высотой места наблюдений. Как следует из таблицы, во всех случаях наблюдений от года к году наблюдался рост концентрации  $\text{CO}_2$  с межгодовым приростом в диапазоне от 1,1 до 3,4 млн<sup>-1</sup>. Максимальные значения концентрации отмечены на станции Игрим, Азово и Ноябрьск. Необходимо отметить, что не было каких-либо значительных изменений концентрации  $\text{CO}_2$ , обусловленных высокими температурами в 2007 г. (как это отмечалось выше по данным наблюдений метана).

Тенденция колебаний среднегодовых концентраций  $\text{CO}_2$  для разных мест наблюдений, отстоящих друг от друга на расстоянии порядка 1000 км, не высока и, как правило, не превышает 3,8 млн<sup>-1</sup>.

Сравнение среднегодовых значений концентрации  $\text{CO}_2$  со станцией Териберка (север Кольского п-ва) показывает, что среднегодовые концентрации в Сибири превышали концентрации, наблюдаемые на фоновой станции на величину от  $\approx 2,0$  до 5,5 млн<sup>-1</sup>. Причину этих отличий установить сложно: такое превышение может быть обусловлено антропогенными источниками в регионе, где размещались пункты наблюдений (например, крупнейший нефтедобывающий район в среднем течении р. Обь, в котором производится сжигание попутного газа в факелах, объем которого оценивается Международным Энергетическим Агентством (МЭА) в 50 млн т в год) (IEA, 2012), а также низкой продуктивностью лесов в части стока атмосферного  $\text{CO}_2$  за счет фотосинтеза и вкладом лесных почв в его эмиссию.

Западная Сибирь, являющаяся крупнейшим в мире естественным источником метана (болота и заболоченные земли) и важным резервуаром диоксида углерода, постоянно привлекает внимание ученых всего мира, занимающимися вопросами изменения климата. С их помощью и при активном участии учреждений РАН помимо наземных был выполнен и обширный комплекс исследований

концентраций парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$ ) на высотах от 0,5 до 7 км. Было установлено, что за период наблюдений с 1997 по 2011 гг. среднегодовой средний по высоте тренд концентрации  $\text{CO}_2$  составлял  $1,98 \text{ млн}^{-1}$ , а  $\text{N}_2\text{O}$  —  $0,73 \text{ млрд}^{-1}$ . На рис. 8 приведен ход концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на разных высотах в рассматриваемый период.

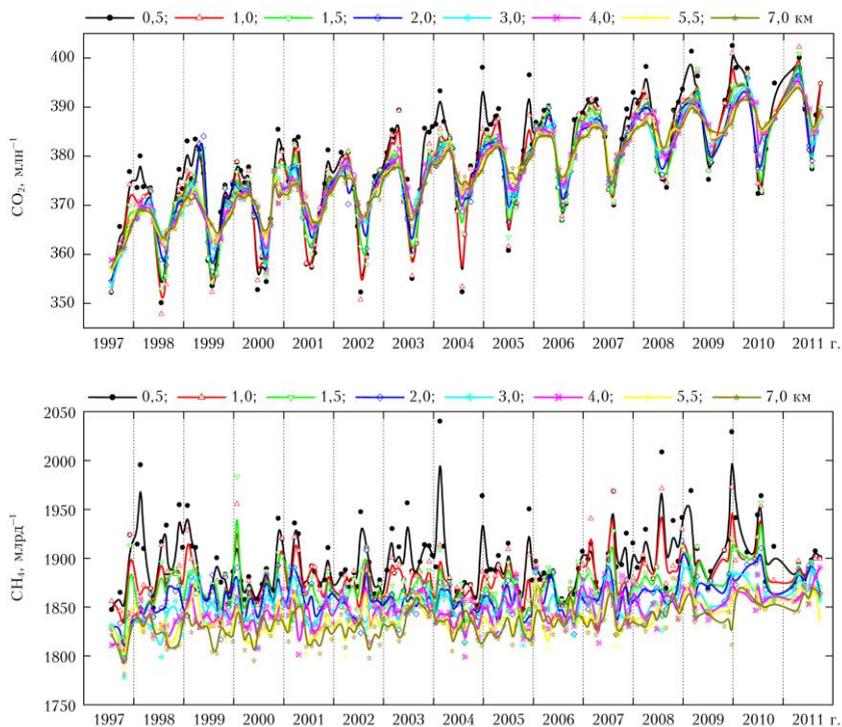


Рис. 8. Результаты многолетних измерений концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в диапазоне высот от 0,5 до 7,0 км (Аршинов и др., 2012).

Ход  $\text{CH}_4$  характеризуется высокой изменчивостью как в течение года, так и от года у года. При этом роста концентрации, отмеченного на многих фоновых станциях, а также в глобальном масштабе, установить не удалось.

Как следует из рисунка, начиная с 2005 г. наблюдалось значительное снижение амплитуды сезонных колебаний концентрации  $\text{CO}_2$ . Если в период с 1997 по 2004 г. она составляла  $30 \text{ млн}^{-1}$ , то с 2005 г. упала до  $20 \text{ млн}^{-1}$ , причем это произошло из-за достаточно резкого увеличения летнего минимума концентрации  $\text{CO}_2$ , который обычно является показателем естественного стока  $\text{CO}_2$ , наблюдающегося в период вегетации биосферы и максимальной эффективности фотосинтеза.

Причин наблюдаемого явления может быть несколько, однако все они, кроме пожаров, предполагают значительно меньшие изменения в процессе стока  $\text{CO}_2$  биосферой.

### **Заключение**

Обобщая изложенную информацию о состоянии мониторинга парниковых газов и аэрозолей в мире и на российской территории, следует отметить, что общий объем такой информации с момента опубликования в 2008 г. Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории РФ заметно вырос. Однако охват вышеупомянутым мониторингом в РФ все еще не соответствует площади страны, ее положению и значению в современном мире. Немногие пункты отбора проб воздуха на сети Росгидромета расположены на побережье Арктики, и потому, в отличие от зарубежных станций, они не в состоянии охватить области основных источников и стоков  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов. Не налажен в должной степени мониторинг аэрозолей, особенно черного углерода, привлекающего в настоящее время особо пристальное внимание, а также мониторинг галогенуглеводородных газов (фреонов). Недостаточна координация программ измерений климатообразующих компонент, выполняемых различными отечественными организациями и ведомствами. В организациях Росгидромета также необходимо согласование измерений опасных для здоровья загрязнений в городах с мониторингом климатически значимых газов и аэрозолей. Важно развивать и совершенствовать соответствующие международные связи и координировать их в глобальном и

региональном масштабах. Это актуальная и острая проблема, с решением которой нельзя медлить.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-05-00677а).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Арабов А. Я., Боровский А. Н., Еланский Н. Ф. и др. (2012). Двуокись азота в атмосфере над Северным Кавказом: тридцать лет наблюдений // Доклады АН. Т. 446. № 3. С. 318—324.*

*Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К. и др. (2012). Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. Т. 25. № 12. С. 1051—1061.*

Бюллетень ВМО по парниковым газам (2012). № 8. 4 с.

Государственный доклад о состоянии и использовании лесных ресурсов РФ. (2006). 217 с.

*Заварзин Г. А., Кудеяров В. Н. (1996). Почва как главный источник углекислоты и резервуар углерода // Вестник РАН. Т. 76. № 1. С. 14—24.*

*Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Краев Г. Н. (2011). Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. № 6. С. 1—15.*

*Калужный И. Л., Лавров С. А. (2012). Гидрофизические процессы на водосборе. Экспериментальные исследования и моделирование. — СПб.: Нестор-история. 615 с.*

*Книжников А., Пусенкова Н. (2009). Проблемы и перспективы использования природного газа в России. — М. 24 с.*

ОД\_РФ-1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008) / Том 1. Изменения климата. — М.: Росгидромет. 227 с.

Третье Национальное сообщение Российской Федерации (2002). — Москва. 91 с.

Пятое Национальное сообщение Российской Федерации (2010). — Москва. 137 с.

*Решетников А. И., Зинченко А. В., Парамонова Н. Н. и др. (2011). Мониторинг парниковых газов на территории России // Труды ГГО. Вып. 564. С. 223—240.*

*Решетников А. И., Ивахов В. М. (2012). Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // Труды ГГО. Вып. 566. С. 257—269.*

*Решетников А. И., Макутас А. П.* (2013). Арктическая Гидрометеорологическая обсерватория «Тикси» // Труды ГГО. Вып. 567. С. 267—283.

*Филипчук А. И., Мусеев Б. Н.* (2004). Вклад лесов России в углеродный баланс планеты. <http://www.carbonfund.ru>.

Atmospheric CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl<sub>4</sub> and SF<sub>6</sub>, 2011. <ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/hats/>

*Beer U., Lucht W., Schmullins C., Svidenko A.* (2006). Small net carbon dioxide uptake by Russian forests during 1981—1999 // *Geoph. Res. Letters*. V. 33. L15403. doi: 10.1029/2006 GL 026919.

*Bond T. C., Doherty S. J., Fahey D. W. et al.* (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *Journal of Geophysical Research*. doi: 10.1002/jgrd.50171.

Global forest land-use change 1990—2005. FAO forest paper 169. 88 p.

*Dlugokencky E. J., Bruhwiler L., White J. W. C. et al.* (2009). Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH<sub>4</sub> burden // *Geophys. Res. Lett.* V. 36. L18803.

*Donigian A. S., Patwardhan Jr., Chinnaswamy R. V. et al.* (1994). Assessment of Alternative Management Practices and Policies Affecting Soil Carbon in Agroecosystems of the Central United States // Environmental Research Laboratory. Athens. GA 193. EPA/600/R-94- 067. U.S. EPA.

GCP (Global Carbon Project) (2011). Internet: <http://www.globalcarbonproject.org/>.

GCP (Global Carbon Project) (2012). Internet: <http://www.globalcarbonproject.org/>.

*Andres R. J., Boden T., Conway T. et al.* (2013). The global carbon budget 1959—2011 // *Earth Syst. Sci. Data*. V. 5. P. 165—185.

*Neimann M., Reichstein M.* (2008). Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // *Nature*. V. 451. P. 289—292. doi:10.1038/nature06591.

Global Forest Resources Assessment 2010. FAO Forestry Paper 163. 66 p. Rome.

IEA 2012. Key world energy statistics. 86 p.

IEA 2013. Key world energy statistics. 82 p.

HYSPLIT [www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html](http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html).

IEA (2011a). Energy Statistics of OECD Countries and Non-OECD Countries (2011). Edition. International Energy Agency, Paris.

IEA (2011b). CO<sub>2</sub> from fuel combustion (2011). Edition. International Energy Agency. Paris.

*Kuchlmann A. J., Worthy D. E., Trivett N. B., Levin I.* (1998). Methane emission from wetland region within the Hudson bay Lowland: An atmospheric approach // *Journal of Geoph. Res.* V. 103. D13. P. 16009—16016.

*Olivier Jos G. Jr, Greet Janssens-Maenhout, Jeroen A. H. W. Peters* (2012). Trends in global CO<sub>2</sub> emissions 2012 Report. Background studies. 49 p.

*Panov A. V., Chi X., Winderlich J. et al.* (2011). Impact of wildfire emission on trace gas and aerosol concentration measured at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // Geophysical Research Abstracts. V. 14. EGU2012-733-1.

*Park S. et al.* (2012). Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940 // Nature 55 Geosci. Vol. 5. P. 261—265.

*Ramanathan V., Yangyang Xu.* (2010). The Copenhagen Accord for limiting global warming: Criteria, constraints, and available avenues // PNAS May 4. V. 107. № 18. P. 8055—8062.

*Ramanathan V., Carmichael G.* (2008). Global and regional climate changes due to black carbon, 1 // Nature Geoscience. P. 221—222.

Report of the MACC/GAW (2010). Session on the Near-Real-Time Delivery of the GAW Observations of Reactive Gases, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 6—8 October 2009 (WMO TD № 1527). 31 p., August 2010.

Status of WMO/GAW Global Atmospheric CO<sub>2</sub> & CH<sub>4</sub> Monitoring Network in 2011. GCOS SC-XIX Doc.7.2a (01. IX.2011).

*Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T. et al.* (2010). Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // Tellus. V. 628. P. 403—416.

*Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al.* (2010). Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. // Science. V. 327. 1246. DOI: 10.1126/science.1182221,

*Syakila, A., Kroeze C., Slomp C. P.* (2010). Neglecting sinks for N<sub>2</sub>O at the earth's surface: does it matter? // Journal of Integrative Environmental Sciences. V. 7. P. 79—87.

Trend in Atmospheric Carbon dioxide. Earth System Research Laboratory. Global monitoring division. August 2013. P. 3.

WMO/GAW Expert Workshop on Global Long-Term Measurements of Volatile Organic Compounds (VOCs) (Geneva, Switzerland, 11—12 April 2007) (WMO TD № 1373). 36 p. February 2007.

Report of the MACC/GAW Session on the Near-Real-Time Delivery of the GAW Observations of Reactive Gases, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 6-8 October 2009. (WMO TD № 1527). 31p. August 2010.

WMO/IAEA Meeting of experts of Carbon Dioxide, Other Greenhouse gases and related tracers Measurements Techniques (Jena Germany, 7—10 September 2009 (WMO TD № 1553). 330 p. April 2011.

## **АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ**

*Э. Г. Богданова, С. Ю. Гаврилова, Б. М. Ильин*

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

Поступила в редакцию 8.09.2014  
Поступила после доработки 20.10.2014

### **Введение**

В последние годы появились новые возможности углубления анализа временных рядов атмосферных осадков.

Во ВНИИГМИ—МЦД создан улучшенный архив синоптических данных из 3- и 6-часовых наблюдений за 1936—2010 гг. (Булыгина и др., 2013). На основе этого архива в ГГО сформирован массив данных о срочных суммах осадков на 457 климатических станциях России с использованием методики, развивавшейся в ГГИ и ГГО на протяжении многих лет и учитывающей на уровне срочных измерений все основные составляющие систематической погрешности измерения осадков стандартными сетевыми приборами (WMO, Report № 67, 1998; Богданова и др., 2002). В настоящей работе приводятся оценки, полученные в ГГО на основе этого массива.

### **1. Многолетние изменения режима осадков на территории России**

В главе «Атмосферные осадки» Первого оценочного доклада Росгидромета (ОД\_РФ-1, 2008) приводится детальное, снабженное обширной библиографией обоснование необходимости гомогенизации временных рядов инструментальных данных об осадках. Подробно анализируются возможные причины нарушения

однородности рядов и искажения, которые могут в связи с ними возникать в результатах исследования пространственных и временных изменений различных характеристик осадков.

Методика корректировки (WMO, Report № 67, 1998; Голубев и др., 2000; Богданова и др., 2000, 2002, 2006, 2007, 2010; Гаврилова, 2010; Bogdanova et al., 2002), разработанная специалистами ГГО и ГГИ в последние полтора десятилетия, позволяет учитывать основные составляющие систематической погрешности измерения осадков на уровне суточных и срочных данных с использованием набора сопутствующих метеорологических характеристик, а также сведений о изменениях защищенности осадкомерных приборов, оказывающей значительное влияние на величину ветрового недоучета (Богданова и др., 2006). В основу методики ГГИ—ГГО положены эмпирические зависимости между основными составляющими систематической погрешности измерения осадков (аэродинамический — ветровой недоучет), потери на смачивание внутренней поверхности осадкоборника, искажение в результате процессов испарения собранных осадков из прибора и конденсации на внутренней его поверхности, а также возможное попадание в осадкомер «ложных» осадков, поднятых во время сильных метелей с поверхности снежного покрова до и выше уровня приемной поверхности прибора) и наблюдаемыми в период их выпадения метеорологическими характеристиками.

С применением этой методики и на основе архива 3- и 6-часовых метеорологических наблюдений, подготовленного во ВНИИГМИ—МЦД (Разуваев и др., 1995) и продленного там же до 2000 г., первоначально в ГГО был создан массив полностью скорректированных осадков суточного разрешения для 100 станций на территории России за период с 1936 по 2000 гг. Данные этого массива позволили оценить различия между характеристиками осадков, исправленных только на смачивание и скорректированных полностью с учетом всех основных составляющих систематической погрешности их измерения (рис. 1). Различия оказываются существенными, преимущественно в полярных широтах, где вклад твердых осадков в годовую сумму достаточно высок.

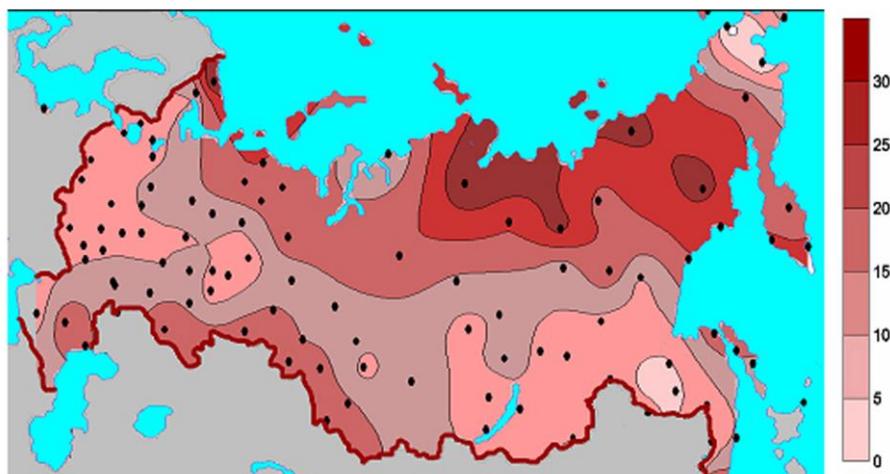


Рис. 1. Процентное отношение средних многолетних годовых сумм осадков, исправленных с учетом всех основных составляющих систематической погрешности измерения ( $R_{обц}$ ) (Богданова, Гаврилова, Ильин, 2010), к суммам осадков, исправленным только за счет потерь на смачивание ( $P_{см}$ ) за период 1967—2000 гг.

Поправки, компенсирующие потери на смачивание, стали вводиться в данные срочных измерений осадков с 1966—1967 гг.

Однако различие средних многолетних значений сумм осадков еще не означает, что какие-то различия обязательно будут в характеристиках трендов временных рядов осадков. Из общезначимых соображений можно предположить, что временные ряды величин поправок также неоднородны (меняется местоположение станций, защищенность установки прибора, ветровой режим и т. п.). В таком случае характеристики временных трендов осадков, скорректированных частично или полностью, могут различаться между собой (рис. 2). Положительные коэффициенты линейных трендов годовых осадков (75 % от всей выборки), рассчитанные с учетом только поправки на смачивание, в среднем на 57 % больше, чем соответствующие коэффициенты, рассчитанные по

массиву ГГО. Для отрицательных трендов картина обратная: тренды, рассчитанные с учетом поправки на смачивание, по абсолютному значению меньше, чем по массиву ГГО на 65 %, однако доля отрицательных трендов составляет всего 25 % от всей выборки.

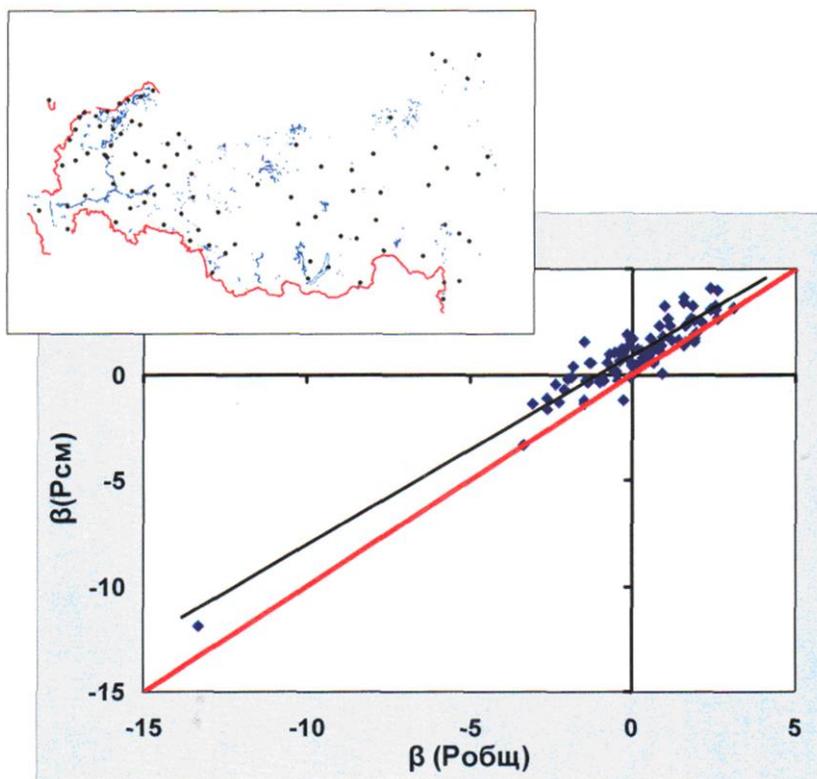


Рис. 2. Связь между коэффициентами линейных трендов годовых осадков ( $\beta$ , мм/год), рассчитанных с учетом только поправки на смачивание ( $P_{см}$ ) и с учетом всех основных составляющих систематической погрешности ( $Робщ$ ), для 87 станций РФ за период 1967—2010 гг.

На карте России в верхней части рисунка точками отмечено местоположение станций.

Таким образом, годовые суммы осадков, скорректированные на систематический недоучет в основном за счет влияния ветра (рис. 1), оказываются систематически больше, а значения преобладающих положительных коэффициентов линейных трендов годовых осадков (рис. 2) меньше, чем соответствующие характеристики осадков, учитывающие лишь потери на смачивание.

В самое последнее время во ВНИИГМИ—МЦД создан архив срочных данных основных метеорологических параметров (Булыгина и др., 2013). В отличие от упомянутого выше архива ВНИИГМИ—МЦД (Разуваев и др., 1995) последний содержит большее число станций на территории России (457), более продолжительный период наблюдений (1936—2010 гг.) и дополнительные сведения об атмосферных явлениях и их продолжительности в пункте наблюдений. Эти сведения позволяют уточнить алгоритм и программу корректировки измеренных осадков и производить ее на уровне данных срочных наблюдений. В результате такой корректировки в ГГО были получены исправленные срочные суммы осадков для всех 457 климатических станций за период 1936—2010 гг.

Представленные ниже результаты получены на основе использования в качестве исходного материала сумм осадков, скорректированных на основании улучшенного архива срочных данных и применения уточненной программы корректировки срочных сумм осадков<sup>1</sup>. Пространственное осреднение годовых и сезонных сумм осадков для расчета соответствующих трендов производилось арифметически. При пространственном осреднении сумм осадков в ОД\_РФ-1 (2008) при расчетах трендов в ИГКЭ использовался иной способ осреднения, применяемый к аномалиям и учитывающий

---

<sup>1</sup> С 2012 г. для всей сети станций Росгидромета уже производится полная корректировка срочных сумм осадков в системе обработки данных ПЕРСОНА-МИС; скорректированные данные вместе с основными расчетными параметрами корректировки помещаются на специальной дополнительной странице таблицы месячных данных станций.

неравномерность и густоту расположения станций на исследуемой площади (Груза, Ранькова, 2004).

Для пространственного осреднения в дальнейших расчетах ГГО применено арифметическое осреднение.

## **2. Временные и пространственные изменения количества атмосферных осадков (с учетом всех погрешностей измерения осадков)**

Временные и пространственные изменения осадков рассматриваются за два периода: за весь доступный период с 1936 по 2010 гг. и за современный период с 1976 по 2010 гг. (рис. 3, 4 и табл. 2). В среднем по России в целом за год количество осадков за период 1976—2010 гг. увеличивается быстрее, чем за весь период с 1936 по 2010 гг., преимущественно за счет интенсивного роста осадков весной.

При региональных оценках изменений в годовых трендах отчетливо выделяются их отрицательные значения на ЕЧР и в Восточной Сибири, свидетельствующие о заметном уменьшении осадков за 1976—2010 гг. по сравнению со всем рассматриваемым периодом (рис. 5 и табл. 2). В остальных регионах, наоборот, наблюдается существенное увеличение годового количества осадков за этот современный период.

Весной повсеместно наблюдается увеличение сезонных осадков за 1976—2010 гг. по сравнению с общим периодом.

Летом (так же, как и в среднем за год) заметно выделяется существенное уменьшение сезонных осадков на ЕЧР и в Восточной Сибири. В остальных регионах увеличение летних осадков за 1976—2010 гг. преобладает над их изменением за весь период 1936—2010 гг., в котором значения сезонных трендов — отрицательные.

Осенью и зимой соотношение значений трендов в отдельных регионах двух сравниваемых периодов довольно пестрое, стойких закономерностей не прослеживается. Можно лишь отметить появление положительного зимнего тренда (хотя и незначительного)

на ЕЧР и практически круглогодичное (кроме весны) уменьшение сезонных осадков в Восточной Сибири.

Пространственное распределение изменений среднего многолетнего годового количества осадков на всей территории России представлено на рис. 6 в виде карт временного изменения годового количества осадков на каждой из станций в мм за весь период с 1936 по 2010 гг. При построении карт использованы данные не всех станций исходного массива. Некоторые из них были исключены из расчетов либо по очевидно сомнительной достоверности данных наблюдений, либо из-за краткости и нерегулярности временных рядов осадков. За период с 1936 г. по 2010 г. количество действующих станций, включенных в массив, не оставалось постоянным. Число их постепенно росло от 195 в 1936 г. до 457 в 2010 г. по всей территории России. Поэтому длина временных рядов на разных станциях может заметно различаться.

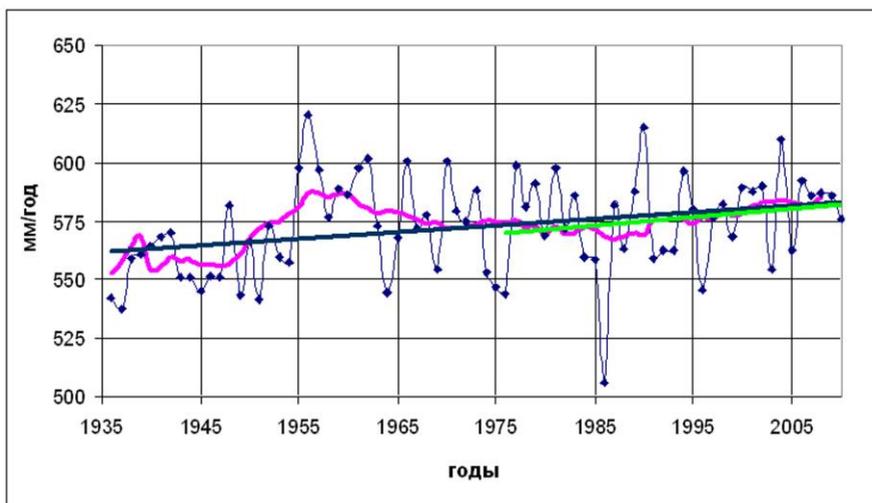


Рис. 3. Временной ряд и линейный тренд годовых сумм осадков (мм/год), осредненных по всей территории России (457 станций) за 1936—2010 гг.

Жирная кривая соответствует 11-летнему сглаживанию.

Дополнительной прямой линией показан линейный тренд за 1976—2010 гг.

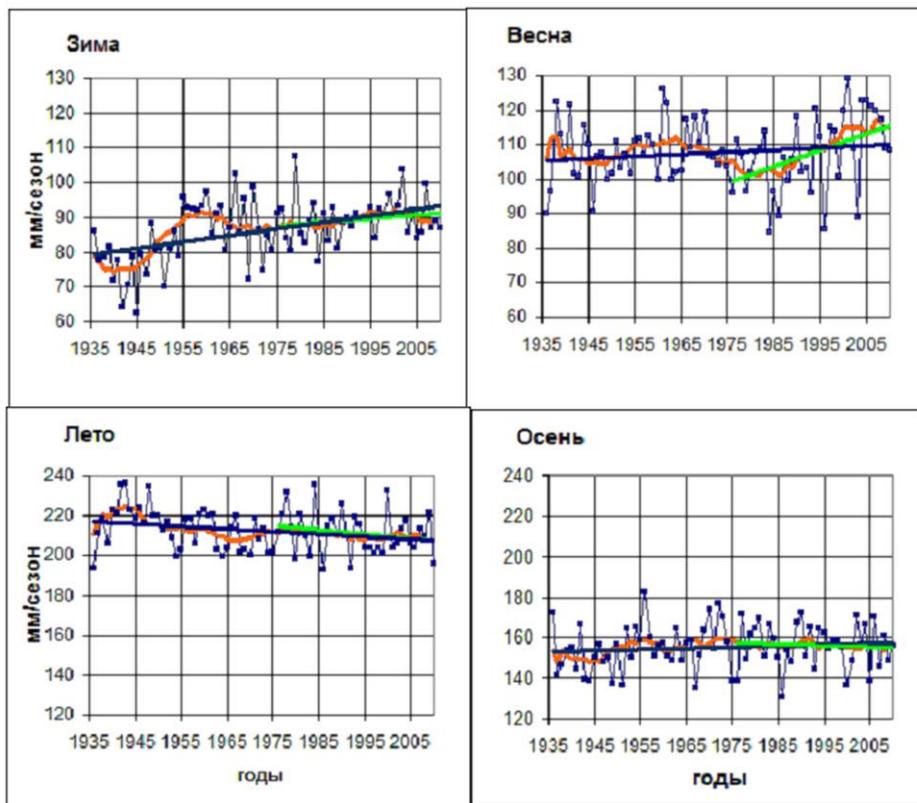


Рис. 4. Временные ряды и линейные тренды сезонных сумм осадков (мм/сезон), осредненных по всей территории России (457 станций) за 1936—2010 гг.

Жирные кривые соответствуют 11-летнему сглаживанию.

Дополнительными прямыми линиями показаны линейные тренды для каждого сезона за 1976—2010 гг.

Таблица 2

**Коэффициенты линейных трендов годовых и сезонных регионально осредненных сумм осадков  
(мм/мес/10 лет) для России в целом и отдельных физико-географических регионов за периоды  
1936—2010 и 1976—2010 гг.**

Регионы	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	1936-2010	1976-2010	1936-2010	1976-2010	1936-2010	1976-2010	1936-2010	1976-2010	1936-2010	1976-2010
Россия	<b><u>0.23</u></b>	<b><u>0.29</u></b>	<b><u>0.63</u></b>	<b><u>0.30</u></b>	<b><u>0.20</u></b>	<b><u>1.57</u></b>	<i>-0.43</i>	<b><u>0.03</u></b>	<b><u>0.20</u></b>	<i>-0.17</i>
Европейская часть РФ	<b><u>0.48</u></b>	<i>-0.18</i>	<b><u>0.63</u></b>	<b><u>0.53</u></b>	<b><u>0.00</u></b>	<b><u>1.83</u></b>	<b><u>0.57</u></b>	<i>-2.40</i>	<b><u>0.37</u></b>	<i>-0.23</i>
Западная Сибирь	<b><u>0.24</u></b>	<b><u>0.83</u></b>	<b><u>0.87</u></b>	<b><u>0.00</u></b>	<b><u>0.27</u></b>	<b><u>2.47</u></b>	<i>-0.93</i>	<b><u>0.10</u></b>	<b><u>0.20</u></b>	<b><u>0.03</u></b>
Средняя Сибирь	<i>-0.10</i>	<b><u>0.72</u></b>	<b><u>0.03</u></b>	<i>-0.03</i>	<b><u>0.03</u></b>	<b><u>0.40</u></b>	<i>-0.83</i>	<b><u>1.87</u></b>	<b><u>0.23</u></b>	<b><u>1.27</u></b>
Прибайкалье и Забайкалье	<i>-0.41</i>	<b><u>0.83</u></b>	<b><u>0.00</u></b>	<b><u>0.10</u></b>	<i>-0.17</i>	<b><u>0.47</u></b>	<i>-1.13</i>	<b><u>1.13</u></b>	<i>-0.33</i>	<b><u>1.37</u></b>
Восточная Сибирь	<i>-0.19</i>	<i>-1.09</i>	<b><u>0.03</u></b>	<i>-1.63</i>	<i>-0.03</i>	<b><u>0.47</u></b>	<i>-0.70</i>	<i>-2.17</i>	<i>-0.13</i>	<i>-1.63</i>
Приамурье и Приморье	<b><u>0.66</u></b>	<b><u>0.85</u></b>	<b><u>1.33</u></b>	<b><u>1.67</u></b>	<b><u>1.03</u></b>	<b><u>2.17</u></b>	<i>-0.53</i>	<b><u>0.03</u></b>	<b><u>0.13</u></b>	<i>-1.80</i>

*Примечание.*

Жирным шрифтом и подчеркиванием выделены положительные значения трендов, курсивом – отрицательные.

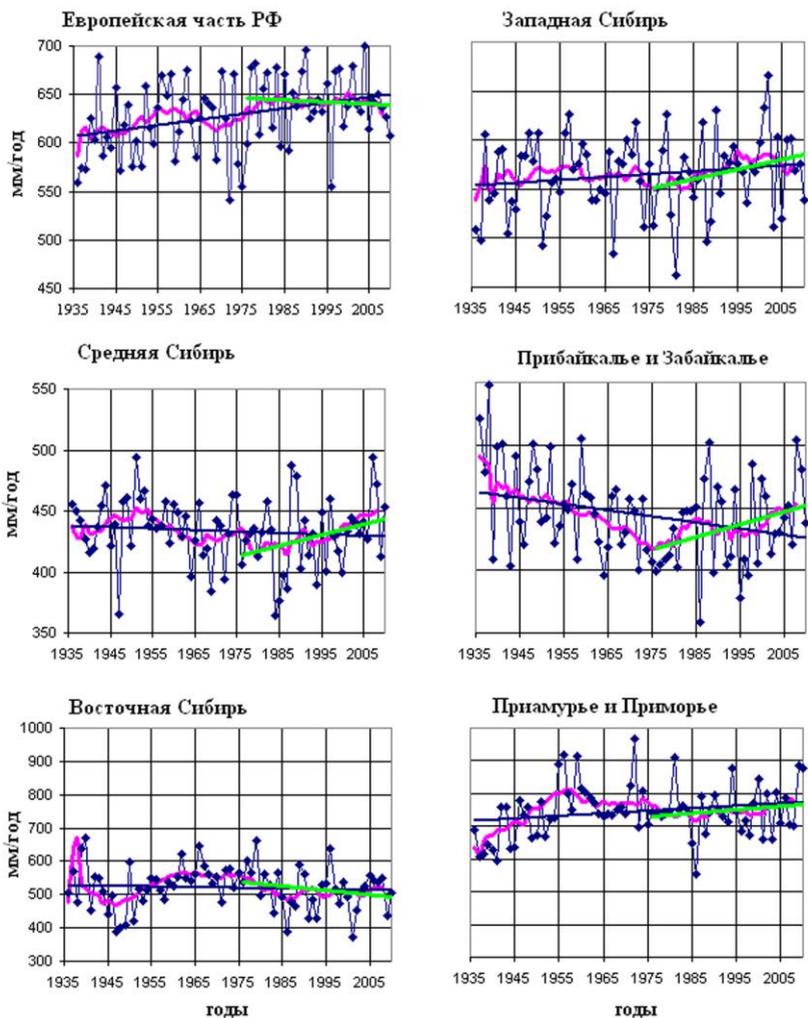


Рис. 5. Временные ряды и линейные тренды регионально осредненных годовых сумм атмосферных осадков (мм/год) для регионов России за 1936—2010 гг.

Жирные кривые соответствуют 11-летнему сглаживанию.

Дополнительными прямыми показаны линейные тренды за 1976—2010 гг.

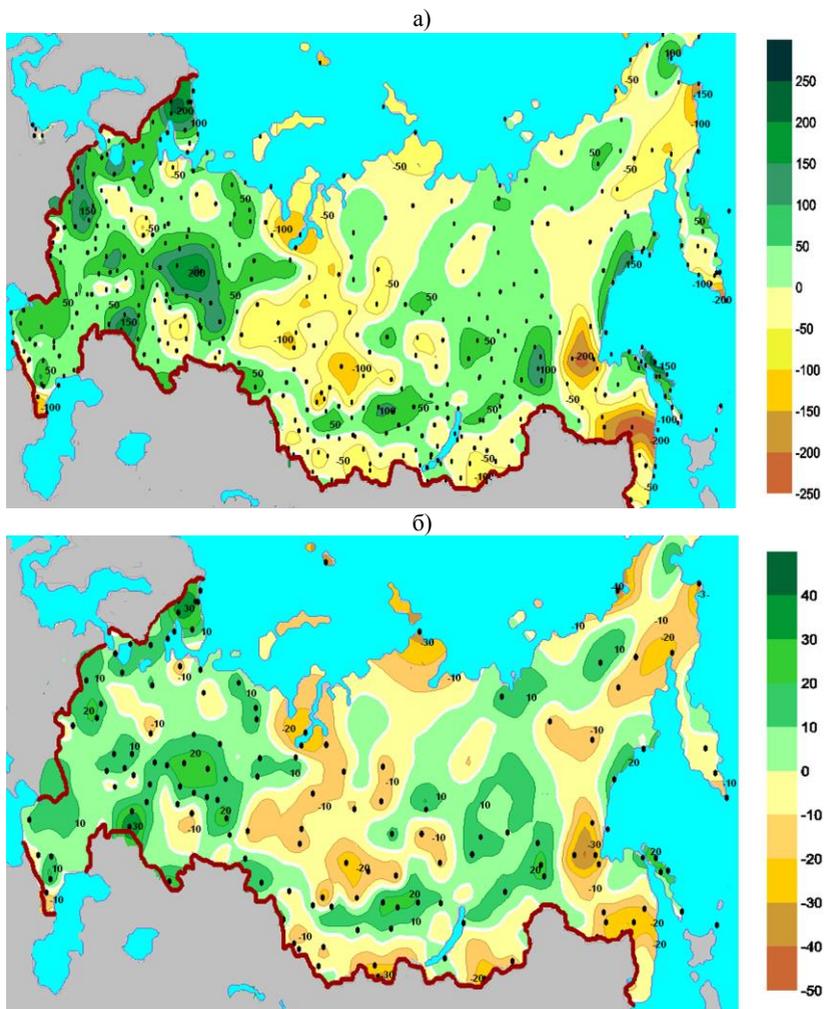


Рис. 6. Временные изменения годового количества осадков на территории России за период с 1936 по 2010 гг.: а) мм за 75 лет (т. е.  $\beta \times 75$ ), б) % от нормы осадков 1961—1990 гг.

На карте (а) в виде точек обозначено местоположение всех станций, по данным которых она построена. На карте (б) показаны только станции со статистической значимостью трендов на уровне 8 %, хотя построена эта карта по данным всех станций — так же, как и (а).

Общая картина пространственного распределения значений трендов на обоих картах совпадает. Отчетливо проявляется преобладание увеличения годовых осадков на территории ЕЧР, а также в центральной Сибири. В западной и восточной Сибири, а также в Прибайкалье, Забайкалье, Приамурье и Приморье преобладают площади с отрицательными значениями трендов. Далее на восток увеличение годовых осадков наблюдается лишь местами в узкой прибрежной полосе Охотского моря и на Сахалине.

На рис. 7 показано распределение станций только со статистически значимыми на уровне 5 % линейными трендами за тот же период с указанием границ федеральных округов России.

Карты временных изменений средних сезонных сумм осадков (рис. 8) построены по данным тех же станций, которые отмечены на рис. 6а, но на каждой из сезонных карт отмечено местоположение только тех станций, где статистическая значимость трендов составляет не менее 8 %. Поскольку статистическая значимость тренда в значительной мере обусловлена его величиной (при равной длине ряда), количество точек на каждой из карт также является показателем уровня значений трендов в каждый из сезонов.

На карте трендов зимнего сезона (рис. 8) отмечаются наибольшие площади с положительными трендами и наибольшие их значения по сравнению с остальными сезонами. Здесь же самое большое число станций со статистически значимыми величинами трендов (165 станций). Зимняя карта имеет существенное сходство с соответствующей годовой (рис. 6) по общей картине распределения площадей увеличения и уменьшения осадков за рассматриваемый период.

Для летнего сезона, наоборот, характерны большие площади с отрицательными трендами и наибольшими (по модулю) их значениями. Хотя на ЕЧР и сохраняется слабая тенденция к увеличению осадков, но за Уралом и до самого восточного побережья летние осадки почти повсеместно уменьшаются.



Рис. 7. Временные изменения годового количества осадков (линейные тренды, мм/год, со статистической значимостью на уровне 5 %) за период с 1936 по 2010 гг.  
 На рисунке обозначены границы федеральных округов России.

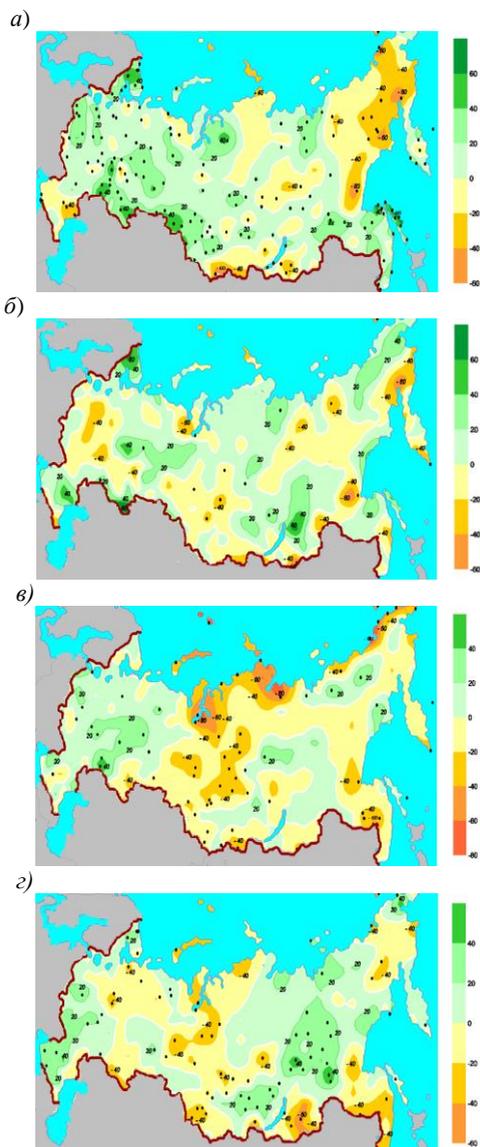


Рис. 8. Временные изменения средних сезонных сумм осадков на территории России за период с 1936 по 2010 гг. в процентах от соответствующих сезонных норм осадков (средних за период 1961—1990 гг.);  
*а) зима, б) весна, в) лето, г) осень.*

Весна и осень, как переходные периоды между зимним и летним типами атмосферной циркуляции, отличаются очень пестрой картиной распределения областей увеличения и уменьшения количества осадков, в которой трудно выделить устойчивые закономерности. Хотя можно отметить формирующуюся область увеличения осадков на ЕЧР вдоль западной границы РФ и обширную область положительных трендов в центральной и восточной Сибири, достигающими в областях максимумов 40 % от сезонной нормы осадков.

### **3. Временные и пространственные изменения осадков разных видов (твердых, жидких и смешанных)**

Осредненные в целом по России и по площадям регионов годовые количества осадков разных видов<sup>2</sup> за период 1936—2010 гг. и за период 1976—2010 гг. (табл. 3 и табл. 4) демонстрируют повсеместное уменьшение твердых осадков и также повсеместное увеличение смешанных. Жидкие осадки также увеличиваются почти везде, кроме Западной Сибири, Приамурья и Приморья, где процент их уменьшения весьма невелик. Вполне очевидно, что увеличение количества жидких и смешанных осадков происходит за счет уменьшения количества твердых, связанного с повышением температуры воздуха в соответствующих регионах. Например, в Западной Сибири, где соотношение осадков разных видов в рассматриваемый период почти не меняется, повышение среднегодовой температуры наименьшее. Наибольшее в процентном выражении увеличение смешанных осадков объясняется наименьшими значениями их среднего многолетнего количества («эффект знаменателя»).

---

<sup>2</sup> Массив ГГО скорректированных срочных значений осадков содержит также все необходимые сведения для определения вида осадков (твердых, жидких и смешанных), выпавших между сроками их измерения.

Таблица 3

**Изменение регионально осредненных годовых сумм осадков разных видов ( $\beta \times 75$ ) за 1936 — 2010 гг. в процентах от средней многолетней суммы осадков данного вида (мм/год)**

Регионы	Осадки					
	жидкие		твердые		смешанные	
	%	мм	%	мм	%	мм
Россия	7	380	-14	163	33	30
Европейская часть РФ	14	436	-22	157	35	36
Западная Сибирь	-1	340	-0,5	378	1	32
Средняя Сибирь	4	461	-3	169	11	19
Прибайкалье и Забайкалье	6	317	-18	105	14	15
Восточная Сибирь	9	295	-23	195	24	35
Приамурье и Приморье	-3	554	-7	173	35	29

Таблица 4

**Изменение регионально осредненных годовых сумм осадков разных видов ( $\beta \times 35$ ) за 1976—2010 гг. в процентах от средней многолетней суммы осадков данного вида (мм/год)**

Регионы	Осадки					
	жидкие		твердые		смешанные	
	%	мм	%	мм	%	мм
Россия	5	385	-1	158	18	33
Европейская часть РФ	4	449	-18	151	17	39
Западная Сибирь	7	338	-5	191	1	38
Средняя Сибирь	20	241	-8	165	8	20
Прибайкалье и Забайкалье	11	320	-2	197	10	16
Восточная Сибирь	1	299	-17	180	5	38
Приамурье и Приморье	-0	547	4	171	5	33

Связь пространственно-временных изменений осадков разных видов с изменениями температуры воздуха прослеживается достаточно наглядно (табл. 3 и рис. 9).

Количество твердых осадков (рис. 9а) уменьшается на преобладающей части территории России. Увеличение их наблюдается главным образом в северных и приполярных частях Западной и Центральной Сибири, т. е. в областях слабого роста температуры воздуха. Увеличение количества твердых осадков на Кольском полуострове и в Карелии связано, очевидно, с общим существенным увеличением осадков в этом районе.

Жидкие осадки (рис. 9б) увеличиваются на большей части территории России, особенно на ЕЧР. Но значительные площади уменьшения количества жидких осадков располагаются в Западной Сибири и части центральной Сибири, где области увеличения жидких осадков находятся лишь в южных частях этих регионов.

Смешанные осадки (рис. 9в) увеличиваются практически повсеместно, слабо уменьшаясь только в северных и приполярных областях от Урала до Чукотки. Увеличение температуры воздуха оказывает влияние на изменение количества жидких осадков двояко. С одной стороны, при потеплении на границе осень-зима смешанных осадков становится больше за счет уменьшения количества твердых.

С другой стороны, при переходе от лета к осени может увеличиваться количество жидких осадков за счет смешанных. Поскольку наблюдается практически повсеместное интенсивное увеличение количества смешанных осадков, преобладает, очевидно, первый процесс.

#### **4. Продолжительность осадков различных градаций интенсивности на территории России и ее изменение во времени**

Разработанные ранее (Богданова, 1979, 1982, 1998, 2001) методы определения суммарной месячной и годовой продолжительности осадков разных градаций интенсивности их выпадения дают возможность исследования изменений этих характеристик во времени и пространстве.

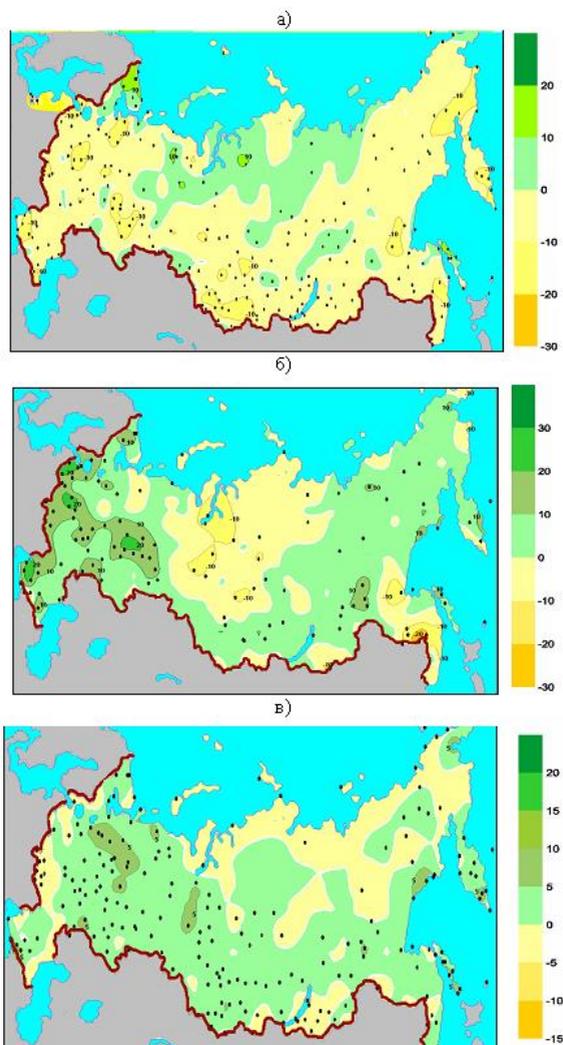


Рис. 9. Временные изменения годового количества осадков разных видов (мм/10 лет) за период 1936—2010 гг.:  
 а) твердые осадки; б) жидкие осадки; в) смешанные осадки. Точками отмечено местоположение станций со статистической значимостью линейных трендов годовых осадков каждого вида на уровне 8 %.

В работе Богдановой (1979) была установлена и позже формализована связь между параметрами интегрального распределения месячной продолжительности выпадения осадков разных градаций интенсивности с их общей месячной интенсивностью (отношением месячного количества осадков к общей продолжительности их выпадения за этот месяц). Полученные формулы позволяют рассчитывать относительную (долю или %) или абсолютную (часы, минуты) продолжительность осадков определенной интенсивности в их общей продолжительности за месяц (Богданова, 2013).

В предыдущих исследованиях (Богданова, 1998, 2001) было принято выделять четыре градации интенсивности осадков ( $i$ , мм/ч) для которых определялась продолжительность их выпадения: слабые ( $i \leq 1,8$  мм/ч), умеренные ( $1,8 < i \leq 6$  мм/ч), сильные ( $6 < i \leq 60$  мм/ч) и очень сильные ( $i > 60$  мм/ч). В табл. 5 приведены данные о средней годовой продолжительности осадков разной интенсивности для периодов 1976—2000 и 1976—2010 гг. В табл. 6 показано изменение годовой продолжительности осадков разной интенсивности (коэффициент линейного тренда, умноженный на число лет в периоде) на всей территории России и в каждом из регионов за 1976—2000 и 1976—2010 гг. в абсолютных (часы) и относительных (% от среднего многолетнего значения за соответствующий период, т. е. за 25 и 35 лет) единицах.

Вполне очевидно, что продолжительность выпадения общего количества осадков и слабых осадков систематически и повсеместно уменьшается, но с удлинением периода отрицательные тренды почти везде становятся меньше по модулю. Изменение продолжительности умеренных и сильных осадков в основном невелико и разнонаправлено, только в северо-восточном регионе отрицательные значения остаются существенными.

Обращает на себя внимание отчетливое увеличение в относительном выражении продолжительности очень сильных осадков. Но этот эффект нельзя считать вполне достоверным из-за очень малых значений продолжительности таких сильных осадков и, соответственно, существенных случайных погрешностей их

определения. Однако в качестве тенденции это явление следует отметить.

Таблица 5

**Средняя многолетняя годовая продолжительность (часы) выпадения осадков разных градаций интенсивности за 1976—2000 и 1976—2010 гг.**

Регион	Период	Средняя многолетняя годовая продолжительность осадков, часы				
		все осадки	слабые	умеренные	сильные	очень сильные
Россия	1976—2000	1371	1310	45	16	0,28
	1976—2010	1357	1296	45	16	0,29
Европейская часть РФ	1976—2000	1334	1266	49	18	0,32
	1976—2010	1316	1249	49	18	0,32
Западная Сибирь	1976—2000	1468	1407	45	16	0,25
	1976—2010	1460	1399	45	16	0,26
Средняя Сибирь	1976—2000	1710	1664	34	12	0,16
	1976—2010	1697	1650	35	12	0,17
Прибайкалье и Забайкалье	1976—2000	982	936	33	12	0,26
	1976—2010	973	927	33	12	0,26
Восточная Сибирь	1976—2000	1679	1622	42	15	0,20
	1976—2010	1661	1603	42	15	0,20
Приамурье и Приморье	1976—2000	1191	1113	57	21	0,47
	1976—2010	1178	1100	56	21	0,46

Таблица 6

**Изменение регионально осредненной годовой продолжительности осадков разной интенсивности на территории России и в каждом из регионов за 1976—2000 и 1976—2010 гг.**

Регионы	Период	Изменение продолжительности осадков									
		все осадки		слабые		умеренные		сильные		очень сильные	
		час	%	час	%	час	%	час	%	час	%
Россия	1976—2000	-203	-15	-202	-15	-1,4	-3	-0,28	-2	<b><u>0,01</u></b>	<b><u>4</u></b>
	1976—2010	-176	-13	-175	-14	-0,3	-1	<b><u>0,08</u></b>	<b><u>1</u></b>	<b><u>0,02</u></b>	<b><u>6</u></b>
Европейская часть РФ	1976—2000	-192	-14	-189	-15	-2,1	-4	-0,50	-3	<b><u>0,02</u></b>	<b><u>2</u></b>
	1976—2010	-194	-15	-193	-15	-1,1	-2	-0,17	-1	<b><u>0,01</u></b>	<b><u>4</u></b>
Западная Сибирь	1976—2000	-142	-10	-141	-10	-0,6	-1	<b><u>0,01</u></b>	<b><u>0</u></b>	<b><u>0,01</u></b>	<b><u>5</u></b>
	1976—2010	-112	-8	-113	-8	<b><u>0,7</u></b>	<b><u>2</u></b>	<b><u>0,41</u></b>	<b><u>3</u></b>	<b><u>0,02</u></b>	<b><u>7</u></b>
Средняя Сибирь	1976—2000	-302	-18	-303	-18	-0,3	-1	<b><u>0,05</u></b>	<b><u>0,4</u></b>	<b><u>0,01</u></b>	<b><u>1</u></b>
	1976—2010	-221	-13	-223	-14	<b><u>1,8</u></b>	<b><u>5</u></b>	<b><u>0,8</u></b>	<b><u>7</u></b>	<b><u>0,03</u></b>	<b><u>16</u></b>
Прибайкалье и Забайкалье	1976—2000	-204	-21	-207	-22	<b><u>2</u></b>	<b><u>4</u></b>	<b><u>0,6</u></b>	<b><u>5</u></b>	<b><u>0,11</u></b>	<b><u>11</u></b>
	1976—2010	-139	-14	-141	-15	<b><u>1,8</u></b>	<b><u>5</u></b>	<b><u>0,9</u></b>	<b><u>7</u></b>	<b><u>0,02</u></b>	<b><u>10</u></b>
Восточная Сибирь	1976—2000	-297	-18	-291	-18	-4,1	-11	-1,5	-10	-0,02	-2
	1976—2010	-263	-16	-259	-16	-2,9	-7	-1	-7	<b><u>0,07</u></b>	<b><u>6</u></b>
Приамурье и Приморье	1976—2000	-128	-11	-128	-11	-0,7	-1	-0,09	-0,4	<b><u>0,04</u></b>	<b><u>8</u></b>
	1976—2010	-118	-10	-117	-11	-0,7	-1	-0,04	-2	<b><u>0,02</u></b>	<b><u>4</u></b>

*Примечание.*

Жирным шрифтом и подчеркиванием выделены положительные значения трендов, курсивом — отрицательные.

Изменения продолжительности осадков демонстрируют отчетливую тенденцию увеличения площадей с положительными трендами продолжительности осадков и, соответственно, сокращение площадей с отрицательными их значениями (рис. 10). Точками на рисунке отмечено местоположение станций с трендами, статистически значимыми на уровне 8 %.

Районы увеличения продолжительности слабых осадков (рис. 10а) незначительны и приурочены в основном к горным областям. Наибольшее увеличение продолжительности не только слабых, но и умеренных и сильных осадков отмечается в предгорных и горных районах Черноморского побережья.

Особенно сильное уменьшение продолжительности слабых осадков в районах северных и северо-восточных морских побережий могут объясняться не только природными причинами, но и существенным ухудшением качества визуальных наблюдений, особенно за продолжительностью слабых твердых осадков в темное время суток. Кроме того, с начала девяностых годов прошлого века и по настоящее время весьма затруднительно обеспечить непрерывные круглосуточные наблюдения за продолжительностью атмосферных явлений из-за недостаточности штатного состава станций. Все эти причины определенно приводят к систематическому занижению общей продолжительности осадков, и в особенности — слабых. На продолжительности умеренных и сильных осадков эти обстоятельства отражаются меньше. Наблюдателю легче их зафиксировать, т. к. по большей части значительные осадки выпадают в теплый период года.

С увеличением интенсивности площади с положительными трендами продолжительности увеличиваются, хотя сами значения трендов в абсолютном выражении уменьшаются (рис. 10 б—г). При этом увеличение продолжительности очень сильных осадков занимает наибольшую часть всей площади России по сравнению с осадками остальных градаций интенсивности. На эту тенденцию следует обратить внимание, т. к. увеличение продолжительности сильных осадков приводит к существенному увеличению количества приносимых ими осадков.

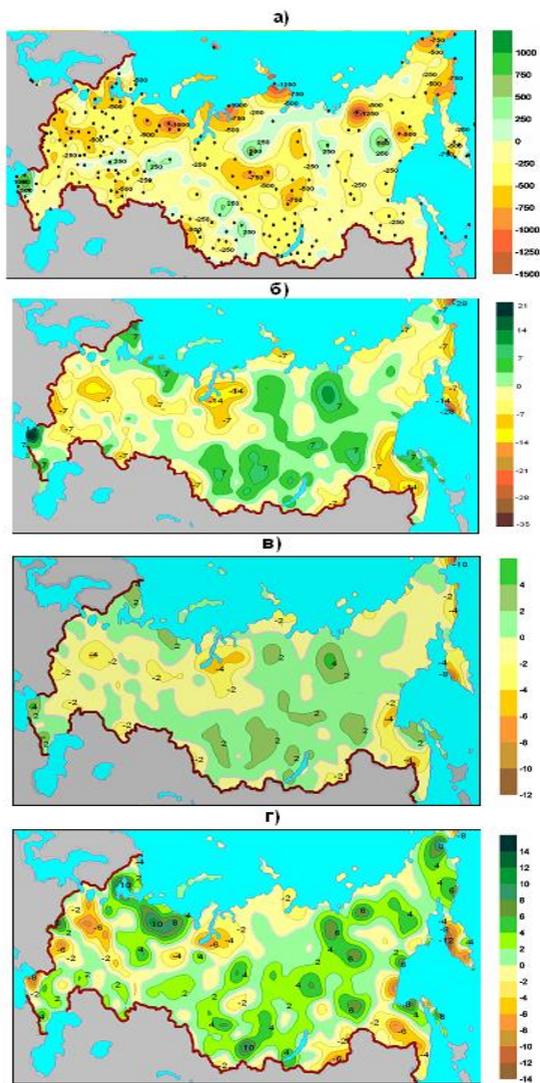


Рис. 10. Временные изменения продолжительности осадков разных градаций интенсивности за период 1976—2010 гг.  
 а) слабые, б) умеренные и в) сильные осадки (часы за 35 лет),  
 г) очень сильные осадки (минуты за 35 лет).

## Заключение

Наиболее существенным отличием оценок, приведенных в настоящей работе от соответствующей главы из Оценочного доклада (ОД\_РФ-1, 2008), является использование в качестве исходной базы данных нового архива срочных данных основных метеорологических параметров, который содержит большее число станций на территории России (457), и дополнительные сведения об атмосферных явлениях и их продолжительности в пункте наблюдений.

На основе этого архива в ГГО создан массив данных об осадках, скорректированных по методике ГГИ—ГГО, учитывающей влияние основных составляющих систематической погрешности осадкомерных приборов на результат измерения осадков.

По данным ГГО за периоды 1936—2010 гг. и 1976—2010 гг. в среднем по России отмечается увеличение годовых сумм осадков, при этом за современный период осадки увеличиваются заметно быстрее, чем за 1936—2010 гг., преимущественно за счет интенсивного роста осадков весной во всех регионах России.

Очевидный практический интерес представляет также выполненный анализ таких нетрадиционных характеристик режима осадков, как количество осадков разных видов (жидких, твердых и смешанных), и продолжительность выпадения осадков разных градаций интенсивности (слабых, умеренных, сильных и очень сильных).

Анализ временных изменений за период с 1936 по 2010 гг. количества осадков отдельно по их видам позволил детализировать вклад осадков каждого вида (твердых, жидких и смешанных) в годовые изменения. Количество твердых осадков уменьшается на преобладающей части территории России, как за общий период, так и за современный. Жидкие и смешанные осадки увеличиваются практически повсеместно, особенно на ЕЧР.

Продолжительность выпадения осадков сильной и очень сильной интенсивности в целом по России за период 1976—2010 гг. увеличивается, а соответственно увеличивается и количество приносимых осадков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богданова Э. Г.* (1979). О расчете некоторых характеристик интенсивности дождей // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 40—44.
- Богданова Э. Г.* (1982). Использование стандартной метеорологической информации для определения режима характеристик продолжительности и интенсивности осадков // *Труды ГГО*. Вып. 461. С. 44—56.
- Богданова Э. Г.* (1998). Осадки разной интенсивности — Год / Карта в Атласе Природа и ресурсы Земли. Т. I — М.—Вена: ED. HÖLZER. С. 57.
- Богданова Э. Г.* (2001). Интенсивность осадков / В кн. *Климат России* / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб.: Гидрометеиздат, С. 317—329.
- Богданова Э. Г., Голубев В. С., Ильин Б. М., Драгомилова И. В.* (2002). Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 68—94.
- Богданова Э. Г., Ильин Б. М., Драгомилова И. В.* (2000). Опыт применения усовершенствованной методики корректировки суточных сумм осадков в различных климатических условиях // *Труды ГГО*. Вып. 551. С. 23—50.
- Богданова Э. Г., Ильин Б. М., Гаврилова С. Ю.* (2006). Оценка влияния защищенности установки осадкомера на величину ветровой погрешности измерения осадков // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 92—101.
- Богданова Э. Г., Ильин Б. М., Гаврилова С. Ю.* (2007). Современные методы корректировки измеренных осадков и результаты их применения в полярных регионах России и Северной Америки // *Метеорология и гидрология*. № 4. С. 21—44.
- Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М.* (2010). Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936—2000 гг. // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 78—89.
- Богданова Э. Г., Зорина А. А.* (2013) Продолжительность осадков различных градаций интенсивности на территории России и ее изменение во времени // *Труды ГГО*. Вып. 569. С. 189—196.
- Булыгина О. Н., Веселов В. М., Разуваев В. Н., Александрова Т. М.* (2013). Описание массива срочных данных основных метеорологических параметров на станциях России. — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 21 с.
- Голубев В. С., Коновалов Д. А., Богданова Э. Г., Ильин Б. М.* (2000). Полная модель корректировки осадкомерных данных; методика и алгоритм оценки систематических составляющих погрешности. — ВМО, instruments and Observing Methods. Report № 74. WMO/TD-№ 1028. P. 136—139.

*Гаврилова С. Ю.* (2010). Устранение неоднородности временных рядов атмосферных осадков и их использование для анализа изменений режима увлажнения на территории России. — Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. — Санкт-Петербург. 22 с.

*Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* (2004). Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // *Метеорология и гидрология*. № 4. С. 50—62.

ОД\_РФ-1 (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008. Том 1. Изменения климата. — М.: Росгидромет. 227 с.

*Разуваев В. Н., Анасова В. Г., Мартуганов Р. А.* (1995). Шести- и трехчасовые метеорологические наблюдения по данным 223 станций СССР. — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 69 с.

*Bogdanova E. G., Ilyin B. M., Dragomilova I. V.* (2002). Application of a Comprehensive Bias-Correction Model to Precipitation Measured at Russian North Pole Drifting Stations // *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 3. P. 700—713.

WMO (1998): Instruments and Observing Methods. Report № 67. Solid Precipitation Measurement Intercomparison. Final Report. № 872. P. 212

## **ОБЛАЧНОСТЬ И РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: НАБЛЮДАЕМЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ**

*Е. И. Хлебникова, Е. Л. Махоткина, И. А. Салль*

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

Поступила в редакцию 8.09.2014  
Поступила после доработки 6.10.2014

### **1. Облачность**

Облачность является важнейшим регулятором солнечного и земного излучения и может обеспечивать формирование механизмов обратной связи, обусловленных антропогенными воздействиями. Радиационные эффекты облаков зависят от сезона и времени суток, а также от вида облачности (IPCC, 2007). Вместе с тем, к настоящему времени сохраняется большая степень неопределенности в оценке наблюдаемых изменений облачного покрова как глобального, так и регионального масштаба.

Как отмечалось в Оценочном докладе (2008), оба вида наблюдений за облачностью — спутниковые и наземные — имеют свои специфические особенности, которые не дают оснований отдать безусловное предпочтение какому-либо из них. В рамках наземных наблюдений определение состояния облачного покрова осуществляется наблюдателями, которые визуальным по 10-балльной шкале оценивают степень покрытия небосвода облаками (по общей и нижней облачности) и фиксируют наличие различных форм облаков. При наличии нижней облачности по наземным наблюдениям сложно характеризовать облачность верхнего и среднего ярусов. В то же

время спутниковые наблюдения во многих случаях отражают состояние лишь самого верхнего слоя облаков.

Редкая наземная сеть наблюдений не дает достоверных данных об облачности для многих регионов. По сравнению с наземными наблюдениями спутниковые данные обладают существенно более высоким пространственным и временным разрешением. Однако их обработка требует серьезных усилий, направленных на идентификацию и корректировку искажающего влияния различных методических факторов (смещение орбитальных параметров, деградация сенсора, особенности межспутниковой калибровки и пр.).

В настоящее время существует более десяти глобальных баз данных по облачности, основанных на разных источниках информации, детальный сравнительный анализ которых проведен в работах (Чернокульский, Мохов, 2010; Chernokulsky, Mokhov, 2012). С точки зрения оценки климатических изменений облачности по спутниковым данным наибольший интерес представляют два базовых архива, формирование которых началось в 1980-х годах: ISCCP (Rossow and Schiffer, 1999) и PATMOS (Jacobowitz et al., 2003). В (IPCC, 2007) отмечалось несоответствие в тенденциях изменения облачности между ISCCP и другими спутниковыми продуктами. Последующие исследования свидетельствуют, что выраженный нисходящий тренд глобальной облачности, обнаруживаемый по данным ISCCP в 1980-х годах (см., например, (Покровский, 2012)), не согласуется с данными PATMOS и наземными данными, и большая часть этого тренда может быть объяснена методическими причинами (Baringer et al., 2010).

В Оценочном докладе (2008) основное внимание уделялось изучению региональных тенденций в изменении характеристик облачности по результатам наземных наблюдений во второй половине XX столетия. Пространственное осреднение среднегодовых аномалий общей облачности по данным 150 станций на территории России выявило во второй половине XX столетия тенденцию к увеличению общей облачности, наиболее выраженную в Азиатской части России в период 1961—1990 гг. (0,08/10лет). Однако на рубеже XX—XXI веков сохранения положительной тенденции не наблюдалось.

Более устойчивые и глубокие изменения были обнаружены в отношении распределения разных видов и форм облачности по частоте их повторения (Хлебникова, Салль, 2009). В частности, была отмечена хорошо выраженная тенденция к увеличению доли облачности вертикального развития, наблюдаемая во все сезоны года (скорость изменения варьирует от 1 %/10 лет в зимний сезон до 3 %/10 лет и более в теплое время года), а также уменьшение слоисто-дождевой облачности и увеличение вклада облаков верхнего яруса.

В отличие от работы Е. И. Хлебниковой и И. А. Салль (2009), в которой основное внимание обращалось на крупномасштабные изменения на продолжительном интервале 1951—2005 гг., в работе А. В. Чернокульского (Chernokulsky et al., 2011) представлены результаты детализированного регионального анализа характеристик облачности по информации более чем с 1600 метеорологических станций за двадцатилетний период 1991—2010 гг.

В целом результаты исследований хорошо согласуются между собой и дают возможность в определенной степени уточнить выводы, содержащиеся в Оценочном докладе (2008). В последние десятилетия сохраняется хорошо выраженная тенденция увеличения частоты появления конвективной облачности (рис. 1, рис. 2). Растет частота появления облаков верхнего яруса. Продолжается перераспределение вклада дождевой облачности разных типов, проявляющееся в росте отношения доли кучево-дождевых облаков к доле слоисто-дождевых облаков. При этом на Урале и в прибрежных районах Дальнего Востока в 2001—2010 гг. отмечается уменьшение частоты появления кучево-дождевых облаков и увеличение слоисто-дождевой облачности по сравнению с предыдущим десятилетием. Рост общей облачности, обнаруженный по среднегодовым данным во 2-й половине XX в. и отмеченный в Оценочном докладе (2008), на рубеже веков значимо проявляется лишь в переходные сезоны. Повсеместное увеличение частоты появления конвективной облачности является важным свидетельством интенсификации конвективных процессов, происходящих в последние десятилетия над северными районами суши умеренных широт (Mokhov et al., 2009).

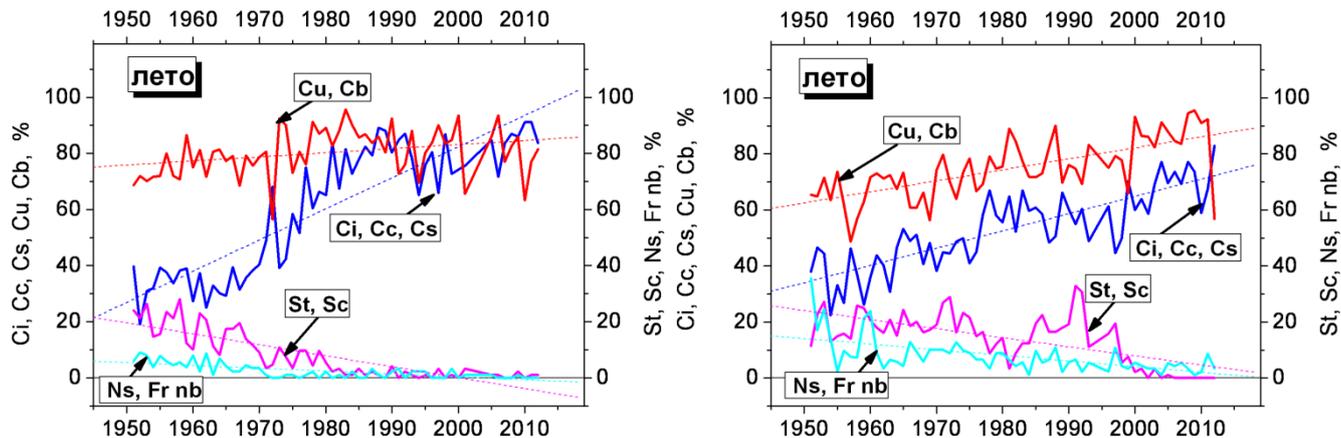


Рис. 1. Изменение доли разных форм облачности (в % общего числа наблюдений с наличием облаков) в полуденный срок по данным метеорологических (1951—1975) и актинометрических (1976—2012 гг.) наблюдений в летний сезон.

Слева — станция Павелец (Европейская часть России), справа — станция Енисейск (Азиатская часть России).  
 (Хлебникова, Салль, 2009) — продленные ряды.

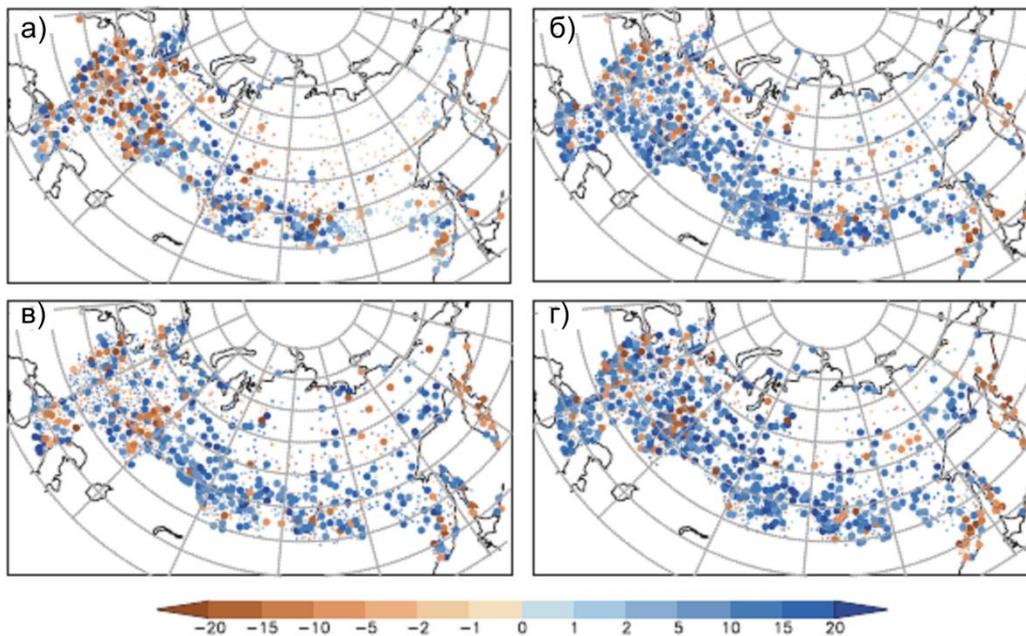


Рис. 2. Изменение повторяемости Сб облаков (%) на интервале 2001—2010 гг. по отношению к периоду 1991—2000: а) зима, б) весна, в) лето, г) осень. (Chernokulsky et al., 2011).

Особенности наблюдаемых изменений облачности могут быть связаны с изменениями динамических и термодинамических процессов, обусловленными увеличением приземной температуры воздуха, которые приводят к ослаблению статической устойчивости и, как следствие, к увеличению конвективных облаков и уменьшению слоистой облачности (Mokhov and Akperov, 2006).

## **2. Радиационный режим**

Регулярные наземные наблюдения за поступающей солнечной радиацией на отдельных метеорологических станциях на территории России были организованы еще в начале XX в. Однако плановое развитие актинометрической сети связано с проведением Международного Геофизического Года (1957—1958 гг.). По состоянию на 1.01.2012 актинометрическая сеть Росгидромета включает в себя 115 станций с программами наблюдений, позволяющими осуществлять климатологический анализ коротковолновой радиации (прямой солнечной, рассеянной, отраженной и суммарной радиации), а также радиационного баланса подстилающей поверхности.

Величина солнечной радиации у поверхности земли зависит не только от астрономических факторов, но и от изменения характеристик аэрозолей, содержания водяного пара, от количества и свойств облаков. Различные виды аэрозолей по-разному воздействуют на радиационный баланс и температуру воздуха в приземном слое. Стратосферный аэрозольный слой вызывает отражение приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации и уменьшает нагрев нижележащих слоев (например, сульфатный вулканический аэрозоль может вызвать «кратковременное» глобальное похолодание). Воздействие тропосферного аэрозоля неоднозначно и в зависимости от оптических свойств может способствовать как увеличению, так и уменьшению приземной температуры воздуха.

Аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ), являющаяся основным показателем аэрозольного влияния на потоки солнечного излучения, в настоящее время может быть определена на основе

прямых измерений спектральной прозрачности с помощью солнечных фотометров на глобальной сети станций AERONET (Aerosol Robotic NETwork). Эта сеть, насчитывающая несколько сотен станций, достаточно хорошо освещает территорию Западной Европы и Северной Америки. На территории России действует 8 станций, семь из которых находится в азиатской части.

Данные AERONET активно используются для валидации различных спутниковых продуктов (Sayer et al., 2012; Hsu et al., 2012), а также, несмотря на непродолжительность рядов, для анализа по имеющимся данным тенденции изменения AOT в различных регионах. В работе (de Meij et al., 2012) на станции Томск, считающейся репрезентативной для юга Западной Сибири, на интервале 2000—2009 была отмечена тенденция к уменьшению AOT ( $-0,04/10$ лет).

Изучение региональных особенностей пространственно-временных изменений прозрачности атмосферы на территории России базируется, в основном, на данных сетевых актинометрических наблюдений (Махоткина и др., 2005), которые могут быть использованы для оценки характеристик интегральной прозрачности атмосферы. Такая оценка выполняется по специальной методике (см., например, (Евневич, Савиковский, 1989)) по данным о прямой солнечной радиации при безоблачном небе. Применение этого подхода дало возможность сформировать продолжительные ряды показателей интегральной прозрачности — коэффициента прозрачности ( $P_2$ ) и фактора мутности Линке ( $T_2$ ), а также — с привлечением информации о влажности и температуре воздуха — осуществить выделение аэрозольной составляющей ослабления радиации (Махоткина и др., 2005; Абакумова, Горбаренко, 2008).

В Оценочном докладе (2008) отмечалось, что в конце XX в. на всей территории России сформировалась тенденция к уменьшению мутности атмосферы как интегральной, так и аэрозольной. Последующие исследования в целом подтверждают сохранение этой тенденции и позволяют уточнить некоторые региональные проявления наблюдаемых изменений (Плахина и др., 2009; Махоткина и др., 2010; Плахина и др., 2011).

Основная особенность распределения атмосферного аэрозоля над территорией России состоит в уменьшении АОТ с юго-запада на северо-восток при наличии районов с постоянной повышенной аэрозольной замутненностью на юго-западе и юго-востоке (Плахина, Махоткина, Панкратова, 2009). На этом фоне отмечаются отдельные очаги более высокой тропосферной аэрозольной нагрузки, которые наиболее ясно проявились после 1995 г. в связи с глобальным очищением атмосферы от стратосферного (вулканического) аэрозоля. Тропосферные источники связаны, в основном, с интенсивным антропогенным воздействием (города юга России, Западной Сибири и Приморья), а также с лесотундровыми пожарами в Сибирском регионе. Еще одной причиной понижения прозрачности атмосферы на востоке российского региона, проявляющейся в средних годовых АОТ, являются вулканы Камчатки.

В период 1960—2011 гг. наблюдается сложная картина временных изменений интегральной ( $T_2$ ) и аэрозольной (АОТ) мутности атмосферы (рис.3а). Глобальные эффекты крупных извержений (Эль-Чичон, апрель 1982 г.; Пинатубо, июнь 1991 г.) проявились на всей территории России в резком увеличении мутности спустя 3—6 месяцев после извержений и постепенном уменьшении ее до обычных значений на протяжении 12—18 месяцев.

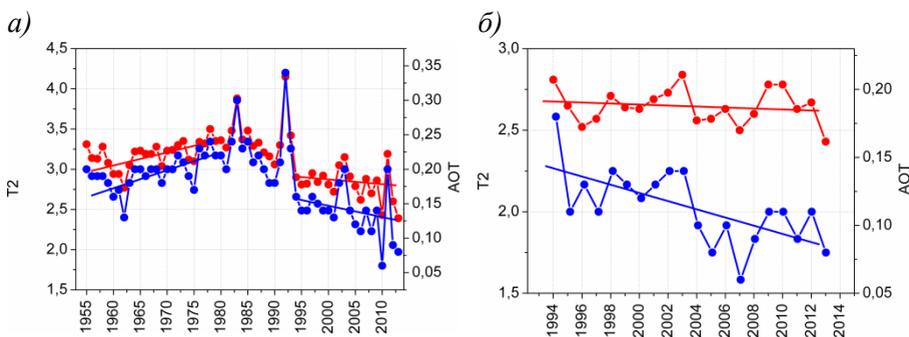


Рис. 3. Средние годовые значения интегральной мутности атмосферы  $T_2$  (красные линии) и аэрозольной оптической толщины АОТ (синие линии), осредненные по территории ЕЧР (а) и Западной Сибири (б).

Прямыми линиями показаны линейные тренды.

Аномальная жара и связанные с ней пожары лета 2010 г. привели к значительному уменьшению атмосферной прозрачности на территории ЕЧР и формированию замкнутой области экстремально высоких значений фактора мутности  $T_2$  в регионе ( $48^\circ$ — $55^\circ$  с. ш.;  $37^\circ$ — $42^\circ$  в. д.) (Плахина и др., 2011).

В последние десятилетия в центре и на юге ЕЧР проявляется тенденция к уменьшению интегральной мутности  $T_2$  (рис. 3а). На остальной территории изменения неоднозначны и, в основном, слабо выражены (рис. 3б). При этом аэрозольная составляющая мутности атмосферы (АОТ) продолжает уменьшаться практически на всей территории России. Лишь на отдельных станциях Камчатки и Дальнего Востока регистрируются положительные тренды АОТ.

Принятый в России подход к оценке изменений атмосферной прозрачности по измерениям прямой солнечной радиации используется в настоящее время и в других странах бывшего СССР. В работе (Ohvriil et al., 2009) представлены результаты анализа интегральной прозрачности атмосферы в Европе по данным шести станций, расположенных на территории Эстонии (3 станции), России (Павловск, Москва) и Украины (Феодосия). Ряды наблюдений на этих станциях в совокупности характеризуют более чем 100-летний период и обнаруживают значительное сходство на длительных временных интервалах. С конца 1990-х на всех действующих станциях регистрируются высокие значения прозрачности, что связывается не только со снижением вулканической активности, но и с экологически ориентированными изменениями в технологиях, снижением промышленных выбросов, а также выводом отдельных производств из Европы.

Климатические изменения проходящей солнечной радиации при реальных условиях облачности в контексте проблемы глобальных изменений климата вызывают в настоящее время повышенный интерес (Wild, 2012). В последнее десятилетие сложились представления, в определенной степени нашедшие отражение в (IPCC, 2007), что изменения проходящей радиации играют маскирующую роль по отношению к потеплению антропогенного

происхождения. Отправной точкой таких представлений явились результаты работ, выполненных, в основном, в 90-х годах прошлого столетия, в рамках которых была обнаружена тенденция к уменьшению поступления солнечной радиации на подстилающую поверхность в 1950—1980 гг.

Среди наиболее ранних исследований по этому вопросу следует отметить работы отечественных специалистов (Житорчук и др., 1994), а также (Abakumova et al., 1996), где эта крупномасштабная тенденция была выявлена по данным 160 станций, освещающих значительную часть Евроазиатского континента. Уменьшение прихода солнечной радиации, начавшееся в 1950-х и продолжавшееся до конца 1980-х годов, было зафиксировано и в других регионах земного шара, и это явление получило название “global dimming” (Stanhill, Cohen, 2001).

Основным источником информации для глобальных исследований изменения приходящей радиации является архив Global Energy Balance Archive (GEBA), в котором на начальном этапе в 1988 г. было представлено около 500 постанционных рядов суммарной радиации месячного разрешения (Gilgen, Ohmura, 1999). В 1990-х годах архив был существенно пополнен путем привлечения информации из Мирового Центра радиационных данных (ГГО), в том числе данных наблюдений на российских станциях международного обмена, а также данных Национальных Метеослужб других стран. Впоследствии GEBA был использован для анализа изменений суммарной радиации за последнее десятилетие XX в. Для повышения обоснованности выводов к анализу были также привлечены данные сетей высокоточных радиационных измерений, которые начали функционировать в 1990-х годах. К числу этих сетей относятся: Baseline Surface Radiation Network (Ohmura et al., 1998), насчитывающая в настоящее время свыше 50 станций, Atmospheric Radiation Measurement (ARM), NOAA Earth System Research Laboratory (ESRL), а также региональные сети в США, Австралии, Швейцарских Альпах.

Исследования, основанные на данных GEBA и имеющихся результатах высокоточных измерений, показали, что повсеместное уменьшение прихода радиации к концу XX в. прекратилось и

началось восстановление исходных значений приходящей радиации, получившее название “brightening” (Wild et al., 2005). Стала высказываться точка зрения, что именно изменение знака тренда приходящей солнечной радиации внесло существенный вклад в сильный рост температуры воздуха в конце прошлого столетия (Wild et al., 2005). В последующих работах (Omura, 2009; Gilgen et. al., 2009), а также в других исследованиях, обзор которых дан в (Wild, 2010), широко обсуждается влияние аэрозольных и облачных эффектов на обнаруживаемые крупномасштабные особенности изменения солнечной радиации.

В Оценочном докладе (2008) отмечались основные закономерности многолетних изменений радиационных характеристик на территории России. В частности, обращалось внимание как на уменьшение прихода солнечной радиации в 1960-е — 1980-е годы, так и на ослабление к концу XXI в. отрицательной тенденции в поступлении солнечной радиации. Анализ данных за последующие годы, осуществляемый в рамках мониторинга радиационного режима (Доклад Росгидромета, 2013) и обобщенный в работе Е. И. Хлебниковой и И. А. Салль (2014), позволил выявить как общие черты, так и особенности междесятилетних изменений приходящей радиации на территории России, по сравнению с другими регионами Земного шара.

В основе мониторинга коротковолновой солнечной радиации (Доклад, 2013) лежит анализ месячных сумм различных видов радиации. Значения норм определяются за единый базовый период, в качестве которого используется интервал 1961—1990 гг. Нормированные аномалии оцениваются как отклонения соответствующих величин от средних многолетних значений (норм), выраженные в процентах от этих значений. На основе месячных аномалий рассчитываются сезонные и годовые аномалии. Именно эти два временных масштаба — сезон и год — рассматриваются для выявления долгопериодных климатических изменений солнечной радиации.

В качестве базового источника информации используются данные измерений плотности потоков разных видов радиации в

фиксированные сроки (так называемых «срочных» наблюдений). Из двух видов актинометрических наблюдений, дающих информацию не только о суммарной радиации, но и об отдельных составляющих радиационного баланса, предпочтение отдано именно срочным наблюдениям в силу большей плотности подсети этих станций — как в начале XXI в, так и в 60-х годах XX столетия. По состоянию на 1.01.2012 г. около 90 станций на территории России функционируют по программе срочных актинометрических наблюдений. Для большинства действующих станций со срочными наблюдениями (в отличие от станций, ведущих непрерывные наблюдения) могут быть рассчитаны нормы за базовый период 1961—1990 гг.

Оценки климатических изменений на территории России и бывшего СССР, в отличие от других регионов, выполнялись как для суммарной, так и для прямой солнечной радиации. В работе Г.М. Абакумовой с соавторами (Abakumova et al., 1996) было показано, что скорость относительного изменения годовых сумм прямой радиации на интервале 1961—1987 гг. составляет 4—6 %/10 лет, а суммарной — около 2 %/10 лет. В изменение суммарной радиации большой вклад вносит рассеянная радиация, существенно зависящая от аэрозолей антропогенного происхождения, имеющих локальное распространение. На настоящем этапе в системе регулярного мониторинга радиационного режима рассматриваются и суммарная, и прямая солнечная радиации (Доклад, 2013). При этом в контексте выявленной чувствительности этих составляющих радиационного баланса первоочередное внимание уделяется анализу прямой радиации.

Анализ сезонных аномалий прямой радиации, осредненных по территории России (рис. 4), демонстрирует единообразие векового хода аномалий для различных сезонов, свидетельствующее о крупномасштабности воздействия, приведшего к пониженным значениям прямой радиации в последней четверти XX в. на территории России. В начале XXI в. и особенно в последние годы (2006—2012 гг.) регистрируемые аномалии близки к нулю и значительно отстоят от экстремально низких значений, достигнутых в начале 90-х годов прошлого столетия.

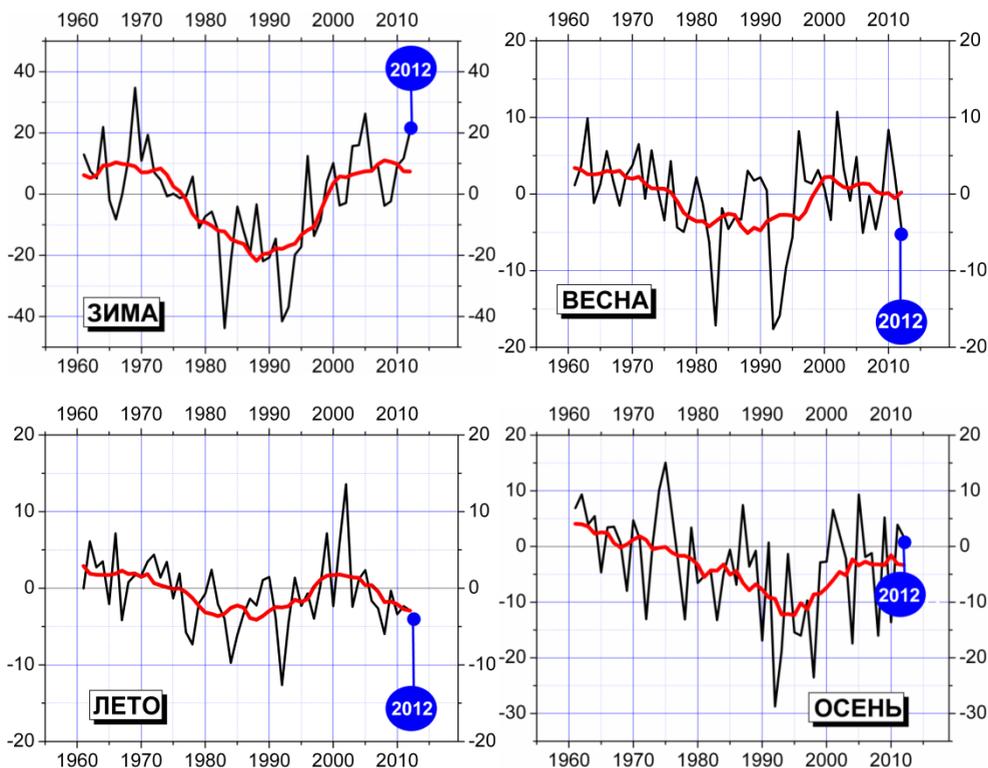


Рис. 4. Аномалии (в процентах от среднего за 1961—1990 гг.) сезонных сумм прямой радиации, приходящей к земной поверхности, осредненные по территории РФ. 1961—2012 гг. (Доклад Росгидромета, 2013).

Региональный анализ многолетних колебаний пространственно-осредненных аномалий годовых сумм прямой радиации (рис. 5) показывает, что в начале XXI в. значения, близкие к норме, наблюдаются практически на всей территории России. В большей степени, чем для других регионов, отклоняются от нормы годовые суммы прямой радиации на территории Средней Сибири, где в течение ряда лет регистрируются отрицательные аномалии.

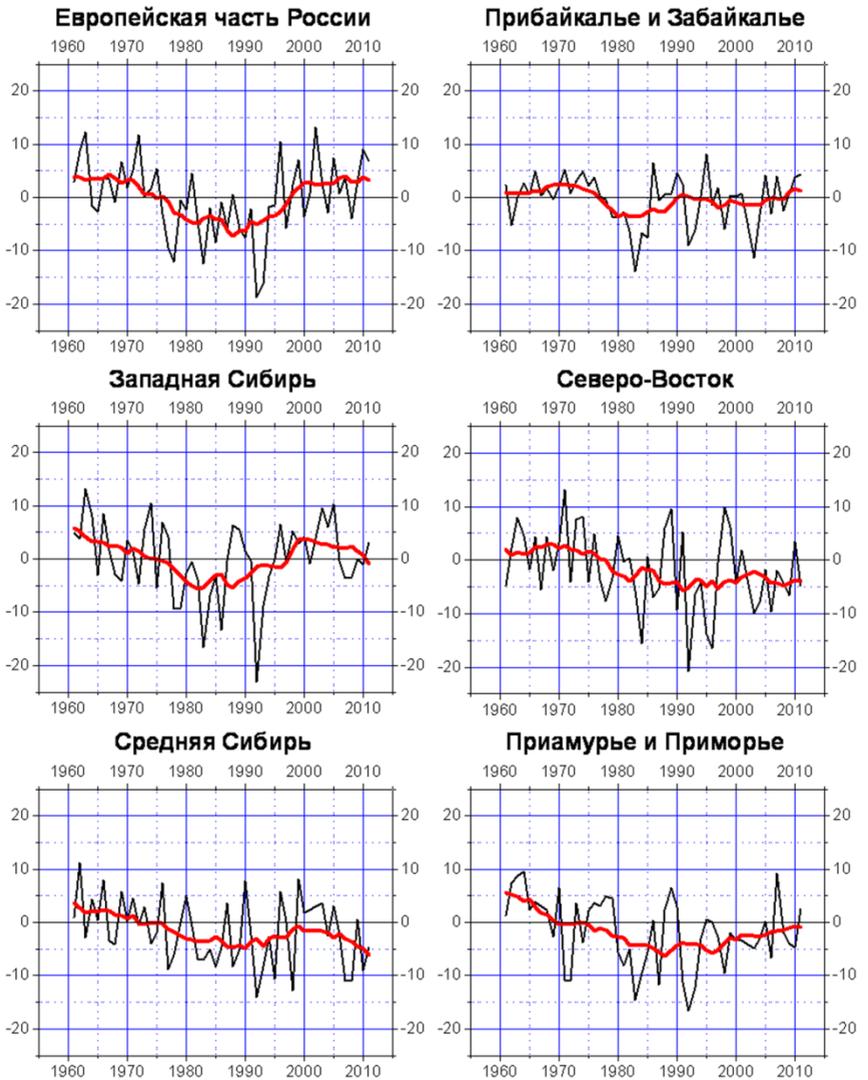


Рис. 5. Регионально-средненные аномалии (в процентах от среднего за 1961—1990 гг.) годовых сумм прямой солнечной радиации, приходящей к земной поверхности (Доклад Росгидромета, 2013).

Особенности многолетних изменений солнечной радиации в 1961—2012 гг. с выраженным минимумом вблизи середины этого периода делают нецелесообразным использование линейной модели для всего рассматриваемого интервала. Для выявления региональных особенностей изменения радиационных потоков более информативной является оценка линейного тренда для двух последовательных интервалов: 1961—1985 гг. и 1986—2010 гг. (Хлебникова и др., 2011). Следует заметить, что исключение из рассмотрения 2010 г., когда была зафиксирована крупная температурная аномалия, лишь незначительно уменьшило величину коэффициентов линейного тренда, но не изменило конфигурации поля и общих наблюдаемых закономерностей.

Представленные результаты оценки трендов прямой и суммарной радиации (рис. 6) наглядно демонстрируют наличие повсеместной тенденции к уменьшению поступления солнечной радиации в 1960-х — 1980-х годах (рис. 6 а, в). Вместе с тем, тенденция к росту радиации, проявившаяся к концу XX в., не оказалась долговременной на всей территории России. Рост прямой радиации на интервале 1986—2010 гг. является хорошо выраженным на территории ЕЧР, где скорость изменения в южных районах составляет около  $6 \text{ Вт/м}^2/10\text{лет}$ . Вместе с тем, в Азиатской части России сформировалась обширная область со слабыми отрицательными трендами приходящей радиации (рис. 6 б, г). действительности, как можно видеть на рис. 7, в этом регионе наблюдается сложный характер изменений в 1986—2010 гг., который плохо описывается линейной моделью на всем интервале. На ряде российских станций значения стабилизировались на определенном уровне, хотя и не достигли максимальных значений, наблюдаемых в 1960-х годах (рис. 7). В некоторых регионах АЧР после 2000г. возобновилась тенденция к снижению прямой и суммарной радиации. Наиболее ярко это проявляется в Средней Сибири (Енисейск, Солянка). Аналогичные особенности изменения радиации обнаруживаются на территории Китая и Монголии (Wild et al., 2009; Wild, 2012).

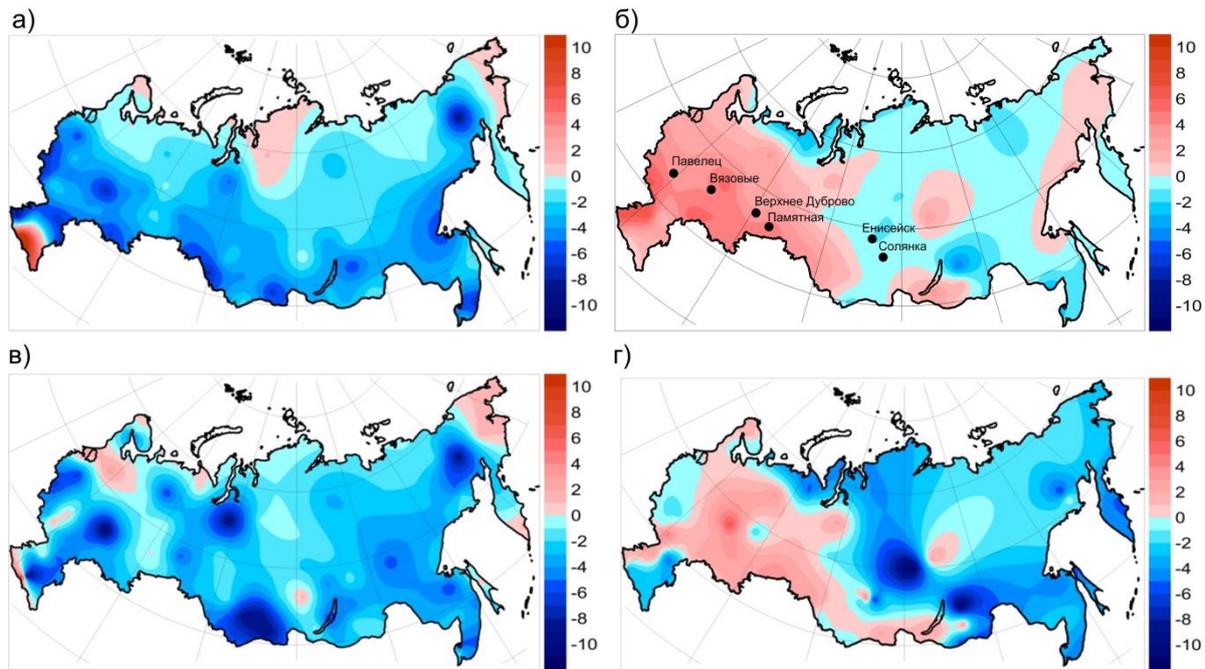


Рис. 6. Изменение ( $\text{Вт}/\text{м}^2/10$  лет) прямой и суммарной радиации, приходящей к земной поверхности в среднем за год, на различных временных интервалах (Хлебникова, Салль., 2014):

- а) прямая радиация, 1961—1985 гг., б) прямая радиация, 1986—2010 гг.,  
 в) суммарная радиация, 1961—1985 гг., г) суммарная радиация, 1986—2010 гг.

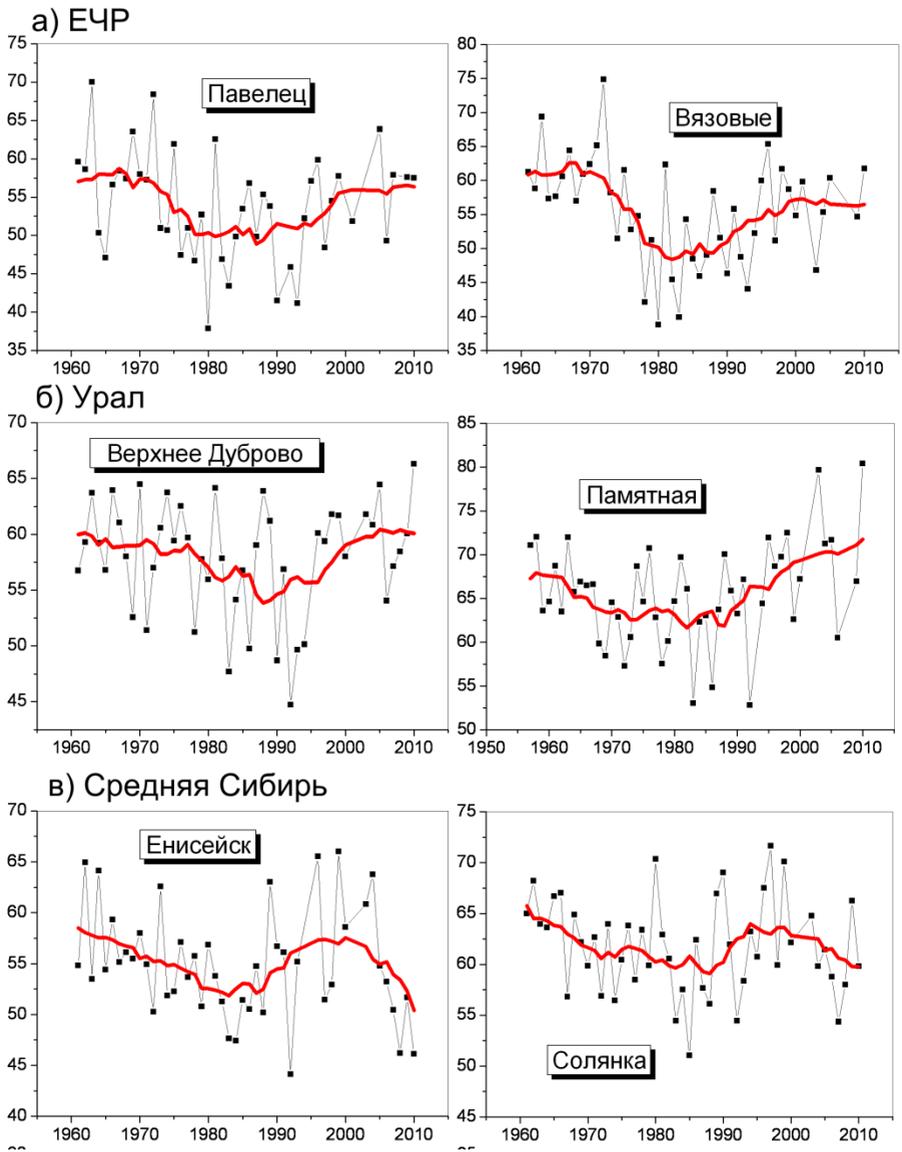


Рис. 7. Прямая радиация ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), приходящая к земной поверхности в среднем за год. 1961—2010гг. (Хлебникова, Салль, 2014).  
а) ЕЧР, б) Урал, в) Средняя Сибирь.

В то же время изменения, наблюдаемые на территории ЕЧР (в первую очередь, в южных регионах с большим годовым приходом радиации), вполне аналогичны тем, которые отмечаются на зарубежных европейских станциях, например, на станции Потсдам. (Wild et al., 2005).

При выявлении трендов радиационных характеристик часто возникает вопрос о качестве используемых приборов. Это связано с тем, что большинство радиометров со временем теряют чувствительность и при отсутствии своевременной и надлежащей калибровки могут демонстрировать ложные нисходящие (но не восходящие) тренды. В этом контексте обнаружение положительного тренда в конце XX в. является аргументом в пользу истинности наблюдаемых вариаций.

Сеть актинометрических станций, пригодных для мониторинга междесятилетних колебаний, довольно редкая. Соответственно получаемое поле оценок может отражать лишь крупномасштабные особенности наблюдаемых изменений при условии репрезентативности сети станций (рис. 6). По этой причине возможность использования дополнительной информации, в той или иной степени подтверждающей выявляемые региональные особенности, является весьма актуальной.

Одной из характеристик, которая может рассматриваться как косвенный источник информации о солнечной радиации у поверхности Земли, является суточная амплитуда температуры воздуха (САТ). Это обусловлено тем, что солнечное излучение, в отличие от теплового, в большей степени влияет на дневной максимум температуры воздуха и является главным фактором, определяющим рост суточной амплитуды температуры воздуха. Взаимосвязь долговременных изменений солнечной радиации и суточной амплитуды воздуха хорошо проявляется при достаточно большом временном и пространственном осреднении, позволяющем уменьшить влияние циркуляционных процессов (Makowski et al., 2009). Средние годовые значения суточных амплитуд, осредненные по Северному полушарию, аналогично региональным изменениям солнечной радиации (Wild et al., 2007; Wild, 2009), начиная с 1960-х

годов, демонстрируют значительное понижение, которое завершилось в середине 1980-х годов.

Определенные связи долговременных изменений солнечной радиации и суточных амплитуд температуры воздуха проявляются и по данным на территории России. На интервале 1986—2010 гг. область положительных трендов САТ на юге России довольно отчетлива, простирается с запада на восток и занимает весьма большую территорию (рис. 8). В Европейской части России эта область несколько меньше, чем область положительных трендов солнечной радиации, которая выделена по очень редкой сети актинометрических станций. Однако в целом, учитывая ограниченные возможности линейной модели, можно считать, что особенности изменения САТ на рассматриваемом интервале косвенно подтверждают пространственные закономерности долговременных изменений приходящей радиации в 1961—2010 гг.

В теплый сезон (апрель — сентябрь) изменения прямой радиации хорошо согласуются с изменениями общей облачности (рис. 9). Лишь в Якутии для интервала 1961—1985 гг. (рис. 9а и рис. 9б) в силу слабой освещенности территории получить согласованные оценки трендов не удалось. Междесятилетние изменения суммарной радиации в Западной Европе хорошо согласуются также с рядами продолжительности солнечного сияния (Sanchez-Lorenzo et al., 2008). Аналогичные связи хорошо прослеживаются также по данным наблюдений в Москве (Абакумова и др., 2012).

Для понимания причин наблюдаемых климатических изменений первостепенное значение имеет слежение за разными компонентами радиационного баланса земной поверхности, его приходной и расходной частью, а также результирующей величиной радиационного баланса. В настоящее время состояние приборной базы и сложность соблюдения регламента производства измерений дают возможность судить о климатических изменениях радиационного баланса лишь в отдельных пунктах на территории России (Климат Санкт-Петербурга и его изменения, 2010; Абакумова и др., 2012).

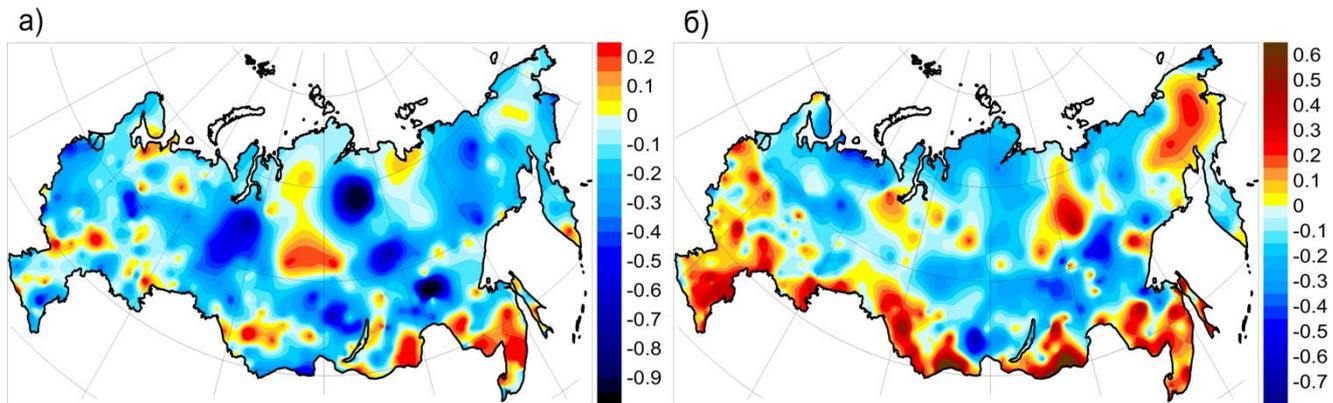


Рис. 8. Изменение среднегодовой суточной амплитуды температуры воздуха.  
а) 1961—1985 гг. б) 1986—2010 гг. (Хлебникова, Салль, 2014).

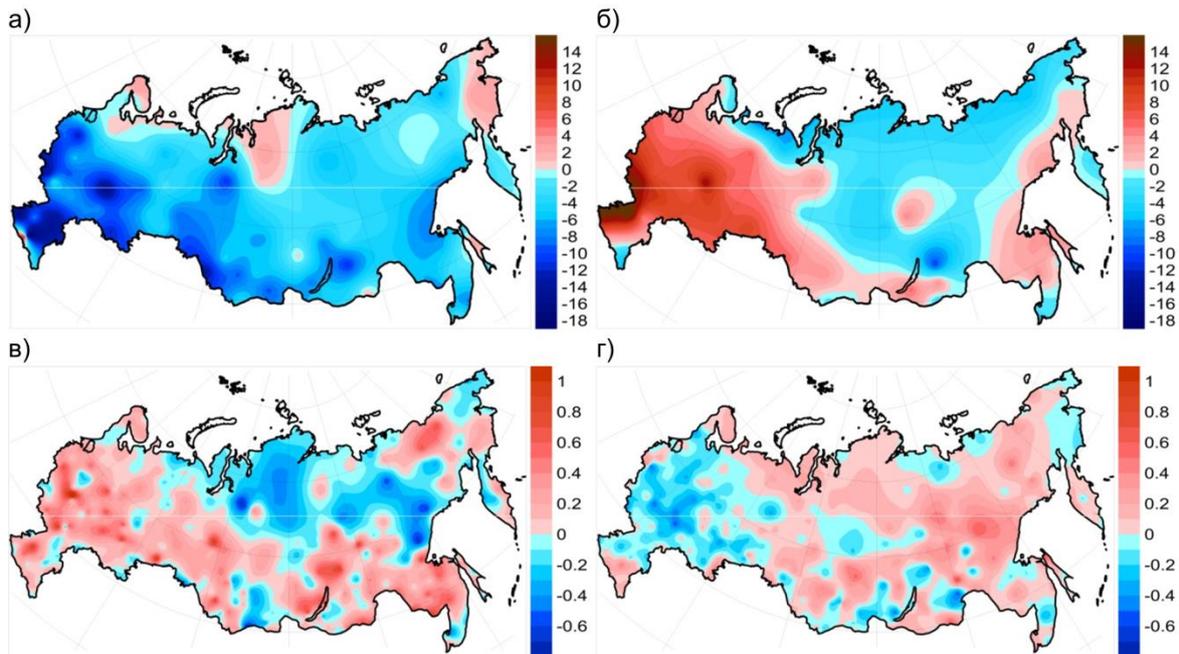


Рис. 9. Изменение прямой радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2/10\text{лет}$ ) и общей облачности (балл/10лет).

Теплый сезон (апрель—сентябрь) (Хлебникова, Салль, 2014).

а) прямая радиация, 1961—1985 гг., б) прямая радиация, 1986—2010 гг.,

в) общая облачность, 1961—1985 гг., г) общая облачность, 1986—2010 гг.)

По результатам наблюдений в Москве (МГУ) были систематизированы и обобщены данные о радиационном балансе подстилающей поверхности за 50 лет непрерывных наблюдений с 1958—2007 гг. (Горбаренко, Абакумова, 2011). Отмечается тенденция к росту ночных часовых сумм радиационного баланса, наиболее выраженная в зимние месяцы, а также происходящее уменьшение числа дней с отрицательными суточными суммами радиационного баланса (рис. 10). Сравнение средних многолетних значений суточных сумм для отдельных месяцев за 1994—2007 гг. с соответствующими значениями для базового периода 1961—1990 гг. демонстрирует увеличение радиационного баланса во все месяцы года. При этом максимальный рост наблюдается в зимние и переходные месяцы.

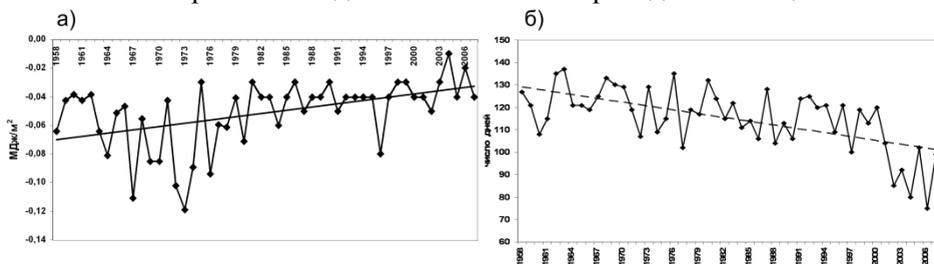


Рис. 10. Характеристики радиационного баланса за 1958—2007 гг.

Москва, МГУ (Горбаренко, Абакумова, 2011).

- а) Январь. Часовые суммы радиационного баланса в срок 02—03 ч ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ),
- б) Год. Число дней с отрицательными значениями суточных сумм радиационного баланса.

## Заключение

Анализ данных наземных наблюдений за характеристиками облачности с акцентом на последние десятилетия показал, что основные тенденции, проявившиеся в конце XX в., нашли свое подтверждение в последующие годы. Сохраняется хорошо выраженная тенденция увеличения частоты появления конвективной облачности. Растет частота появления облаков верхнего яруса. Продолжается перераспределение вклада дождевой облачности разных типов, которое проявляется в преимущественном увеличении

доли кучево-дождевых облаков. Лишь на Урале и в прибрежных районах Дальнего Востока регистрируется увеличение слоисто-дождевой облачности в 2001—2010 гг. по сравнению с предыдущим десятилетием. Рост общей облачности и уменьшение частоты безоблачной погоды отмечается, в основном, в весенний и осенний периоды.

С середины 1990-х годов, в условиях отсутствия крупных вулканических извержений, тенденция к уменьшению интегральной мутности атмосферы хорошо проявляется в центре и на юге Европейской части России. На остальной территории изменения неоднозначны и, в основном, слабо выражены. При этом на фоне роста общего влагосодержания атмосферы, связанного с увеличением температуры воздуха, на большей части территории России отмечается тенденция к уменьшению величины аэрозольной составляющей мутности атмосферы. Лишь на отдельных станциях Камчатки и Дальнего Востока регистрируются положительные тренды аэрозольной оптической толщины атмосферы.

Рост поступления солнечной радиации, наблюдаемый по наземным данным во многих регионах Земного шара в последнее десятилетие XX в., с разной степенью отчетливости проявился практически на всей территории России. Изменения, происходящие в начале XXI в., не столь крупномасштабны и однозначны. На ряде станций значения стабилизировались на определенном уровне, хотя и не достигли максимальных значений, наблюдаемых в 1960-х годах. В Европейской части России, в особенности в центральных и южных районах, сохраняется положительная тенденция, которая наблюдается и на территории зарубежной Европы. В некоторых регионах АЧР возобновилась тенденция к снижению прямой и суммарной радиации. Наиболее ярко это проявляется в Средней Сибири.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В.* (2008). Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и ее изменения на территории России. — М.: Издательство ЛКИ. 192 с.

*Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В., Незваль Е. И., Шиловцева О. А.* (2012). Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. — М.: Издательство Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 310 с.

*Горбаренко Е. В., Абакумова Г. М.* (2011). Вариации радиационного баланса подстилающей поверхности по многолетним наблюдениям МО МГУ // Метеорология и гидрология. № 6. С. 42—54.

Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории России (2013).

*Евневич Т. В., Савиковский И. А.* (1989). Расчет прямой солнечной радиации и коэффициента прозрачности атмосферы // Метеорология и гидрология. № 5. С. 92—95.

*Житорчук Ю. В., Стадник В. В., Шанина И. Н.* (1994). Исследование линейных трендов во временных рядах солнечной радиации // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 30. № 3. С. 389—391.

Климат Санкт-Петербурга и его изменения (2010). / Под ред. В. П. Мелешко, А. В. Мещерской, Е. И. Хлебниковой. — СПб. 256 с.

*Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Лукин А. Б.* (2005). Некоторые особенности изменения мутности атмосферы на территории России в последней четверти XX века // Метеорология и гидрология. № 1. С. 28—36.

*Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Лукин А. Б.* (2010). Выявление изменений интегральной и аэрозольной мутности атмосферы в Забайкалье и Центральной Сибири // Метеорология и гидрология. № 1. С. 53—67.

*Мохов И. И., Чернокульский А. В., Акперов М. Г., Дюфрен Ж.-Л., Ле Трет Э.* (2009). Изменения характеристик циклонической активности и облачности в атмосфере внетропических широт северного полушария по модельным расчетам в сопоставлении с данными реанализа и спутниковыми данными // Доклады РАН. Т. 424. № 3. С. 393—397.

*Мохов И. И., Акперов М. Г.* (2006). Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Известия РАН. Т. 42. № 4. С. 467—475.

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

*Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В.* (2009). Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным российской актинометрической сети (1976—2006 гг.) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 45. № 4. С. 489—500.

*Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л.* (2011). Пространственные вариации фактора мутности атмосферы над европейской территорией России в условиях аномального лета 2010 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 47. № 6. С. 1—6.

*Покровский О. М.* (2012). Климатология облачности по результатам международного спутникового проекта // Труды ГГО. Вып. 565. С. 115—131.

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

*Хлебникова Е. И., Салль И. А., Стадник В. В., Трофимова О. В.* (2011). Климатические изменения составляющих радиационного баланса подстилающей поверхности на территории России / В сб.: Труды Международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика». — СПб. С. 157—158.

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

*Чернокульский А. В., Мохов И. И.* (2010). Сравнительный анализ характеристик глобальной и зональной облачности по различным спутниковым и наземным наблюдениям // Исследования Земли из космоса. № 3. С. 12—29.

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

*Baringer M. O., Arndt D. S. and Johnson M. R.* (2010). State of the climate in 2009 // Bulletin of the American Meteorological Society. 91 (7). P. 1—15.

*Chernokulsky A. V., Bulygina O. N. and Mokhov I. I.* (2011). Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // Environ. Res. Lett. 6. 035202. 6 p. doi: 10.1088/1748-9326/6/3/035202.

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

IPCC (2007). Climate Change 2007 / Solomon S., Qin D., Manning M. et al. (eds.) // The Physical Science Basis. — Cambridge/New York: Cambridge University Press. 996 p.

*De Meij A., Pozzer A., Lelieveld J.* (2012). Trend analysis in aerosol optical depths and pollutant emission estimates between 2000 and 2009 // Atm. Env. 51. P. 75—85.

*Gilgen H., Ohmura A.* (1999). The Global Energy Balance Archive // Bull. Amer. Meteor. Soc. 80. P. 831—850.

*Gilgen H., Roesch A., Wild M. and Ohmura A.* (2009). Decadal changes in shortwave irradiance at the surface in the period from 1960 to 2000 estimated from Global Energy Balance Archive Data // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 114. D00d08.

*Hsu N. C., Gautam R., Sayer A. M., Bettenhausen C., Li C., Jeong M. J., Tsay S.-C. and Holben B. N.* (2012). Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 12. 8037—8053.

*Jacobowitz H., Stowe L. L., Ohring G., Heidinger A., Knapp K. and Nalli N. R.* (2003). The advanced very high resolution radiometer Pathfinder Atmosphere (PATMOS) climate dataset — A resource for climate research // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 84 (6). 785.

*Makowski K., Jaeger E. B., Chiacchio M., Wild M., Ewen T. and Ohmura A.* (2009). On the relationship between diurnal temperature range and surface solar radiation in Europe // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 114. D00d07.

*Ohmura A. et al.* (1998). Baseline surface radiation network, a new precision radiometry for climate research // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79. 2115—2136. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<2115:BSRNBW>2.0.CO;2.

*Ohmura A.* (2009). Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 114. D00d05.

*Ohvriil H., Teral H., Neiman L., Kannel M., Uustare M., Tee M., Russak V., Okulov O., Joveer A., Kallis A., Ohvriil T., Terez E. I., Terez G. A., Gushchin G. P., Abakumova G. M., Gorbarenko E. V., Tsvetkov A. V. and Laulainen N.* (2009). Global dimming and brightening versus atmospheric column transparency, Europe, 1906—2007 // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 114. D00d12.

*Rossow W. B. and Schiffer R. A.* (1999). Advances in understanding clouds from ISCCP // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 80 (11). 2261—2287.

*Sanchez-Lorenzo A., Calbo J. and Martin-Vide J.* (2008). Spatial and Temporal Trends in Sunshine Duration over Western Europe (1938—2004) // *Journal of Climate*. 21 (22). 6089—6098.

*Sayer A. M., Hsu N. C., Bettenhausen C., Ahmad Z., Holben B. N., Smirnov A., Thomas G. E. and Zhang J.* (2012). SeaWiFS Ocean Aerosol Retrieval (SOAR): algorithm, validation and comparison with other datasets // *J. Geophys. Res.* 117. D03206. doi: 10.1029/2011JD016599.

*Stanhill G. and Cohen S.* (2001). Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation // *Agric. For. Meteorol.* 107. 255—278. doi: 10.1016/S0168-1923(00)00241-0.

*Stjern C. W., Kristjansson J. E. and Hansen A. W.* (2009). Global dimming and global brightening — an analysis of surface radiation and cloud cover data in northern Europe // *International Journal of Climatology*. 29 (5). 643—653.

*Wild M. et al.* (2005). From dimming to brightening: Decadal changes in surface solar radiation // *Science*. 308. 847—850. doi: 10.1126/science.1103215.

*Wild M., Ohmura A. and Makowski K.* (2007). Impact of global dimming and brightening on global warming // *Geophys. Res. Lett.* 34. L04702. doi: 10.1029/2006GL02803.

*Wild M.* (2009). Global dimming and brightening: A review // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 114. D00d16.

*Wild M., Trussel B., Ohmura A., Long C. N., Konig-Langlo G., Dutton E. G. and Tsvetkov A.* (2009). Global dimming and brightening: An update beyond 2000 // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 114. D00d13.

*Wild M.* (2010). Introduction to special section on global dimming and brightening // *J. Geophys. Res.* 115. D00D00. doi: 10.1029/2009JD012841.

*Wild M.* (2012). Enlightening global dimming and brightening // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93 (1). 27—37.

УДК 551.5(470+571)

## **ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В РОССИИ**

*И. М. Школьник, В. П. Мелешко, В. В. Стадник, Е. И. Хлебникова,  
Е. М. Акентьева, Е. Л. Генихович, А. А. Киселев*

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

Поступила в редакцию 8.09.2014  
Поступила после доработки 22.10.2014

### **Введение**

В настоящее время широко признается, что глобальное потепление климата может создать серьезные экономические, политические и социальные проблемы для многих стран мира в грядущие десятилетия XXI века. С одной стороны, оно может проявляться в росте повторяемости и интенсивности кратковременных и долговременных аномальных и экстремальных климатических режимов и погодных явлений регионального масштаба. С другой стороны, глобальное потепление может вызывать благоприятные климатические и погодные условия в некоторых регионах. В любом случае потребуются значительные материальные ресурсы, чтобы адаптировать социально-экономические структуры стран к изменяющимся климатическим условиям и обеспечить их устойчивое развитие. Существуют большие неопределенности в оценках того, как будут протекать ожидаемые климатические изменения, и какое влияние они могут оказать на экономическую деятельность и социальные процессы в разных регионах России, а также на функционирование ее государственных институтов.

Наблюдения свидетельствуют, что интенсивность потепления на значительной части российской территории превосходит среднеглобальную. Сокращение и смягчение холодного периода на территории России может способствовать расширению зоны комфортного проживания, сокращению расхода электроэнергии в отопительный сезон, улучшению ледовой обстановки и, соответственно, облегчению транспортировки грузов в Арктических морях и освоения арктических шельфов и т. д. В то же время потепление может вызывать рост повторяемости засух в одних регионах и наводнений в других; стать причиной деградации многолетнемерзлых грунтов, которая нанесет серьезный ущерб строениям и транспортным коммуникациям в северных регионах России. При этом неопределенность последствий изменения климата на сельское хозяйство, водные ресурсы, энергетический потенциал, растительный и животный мир, демографическую ситуацию до сих пор весьма велика.

Указанное потепление, очевидно, скажется как на объемах производимой в России энергии, так и на особенностях ее потребления. При этом чрезвычайно важны принадлежность отдельных российских регионов к различным географическим зонам и потенциальная возможность развивать в этих регионах альтернативные (сжиганию ископаемого топлива) виды энергетики — ветро-, гелио- и гидроэнергетику.

Энергетическая система России — ключевая отрасль отечественной экономики, развитию которой уделяется большое внимание. Энергетическая Стратегия, принятая Правительством РФ в начале этого века на период до 2030 года, определяет цели и задачи развития энергетического сектора страны. В ней указаны приоритеты, обеспечивающие достижение намеченных целей (<http://www.energystrategy.ru/projects/energystrategy.htm>). Однако в этом документе развитие энергетики рассматривается без учета возможных изменений климата на территории России, вызванных глобальным антропогенным потеплением, способным оказывать разнонаправленные влияния (благоприятные и негативные) на

энергетический потенциал страны и в особенности на его возобновляемые источники.

Цель настоящего исследования — определить, какое влияние глобальное потепление климата может оказать на производственные мощности климатически зависимого энергетического сектора России в XXI веке, а также на объемы и структуру потребления выработанной энергии. В основе исследования лежат прогнозы климата с использованием современных физико-математических моделей, позволяющие сформулировать научно обоснованные рекомендации по дальнейшему развитию энергетического сектора России в контексте глобального и регионального потепления климата. Исследование сфокусировано на электроэнергетике, как наиболее сильно подверженной изменениям климата энергетической отрасли.

Первый этап исследования был посвящен выявлению характерных особенностей климата России и его изменений в первой половине XXI века. С этой целью была выделена группа климатических моделей, наиболее успешно описывающих текущие изменения климата (см. разделы 1 и 2), проанализировано современное состояние климата на территории России (раздел 3.1), дано краткое описание использованных сценариев будущих изменений климатических характеристик (раздел 3.2). В разделе 3.3 представлены модельные оценки ожидаемых изменений климата до середины XXI века, способных оказать влияние на развитие и функционирование энергетической системы России. К характеристикам климата, заслуживающим особого внимания, были отнесены изменения температуры воздуха, суммарных осадков, речных стоков, скорости ветра и солнечной энергии.

Далее, в соответствии с полученными в ходе выполнения первого этапа результатами, были рассмотрены и проанализированы различные аспекты функционирования системы производства и потребления энергии в России. В разделе 4 представлен анализ текущего положения дел с производством и потреблением энергии в России. Раздел 5 посвящен обсуждению сезонных и региональных изменений энергопотребления на обогрев и кондиционирование зданий в настоящем и будущем. Влияние регионального климата на

эффективность российской гидроэнергетики описано в разделе 6. Современное состояние и перспективы развития гелио- и ветроэнергетики кратко изложено в разделе 7. В силу того, что основным производителем энергии в России были и останутся теплоэлектростанции, в разделе 8 отдельно рассмотрен вопрос о влиянии грядущих изменений климата на рассеивающую способность атмосферы, что важно при определении максимальных уровней загрязнения воздуха в окрестности таких станций.

В Заключении кратко сформулированы основные выводы, полученные в результате анализа, проведенного в рамках данного исследования, на базе которых представлены рекомендации по адаптации к изменениям климата на федеральном и региональном уровнях.

### **1. Создание единой базы данных для основных атмосферных переменных, полученных из расчетов по полному набору современных моделей климата CMIP5 на период до 2030 года и дальнейшую перспективу**

В Пятом оценочном докладе первой рабочей группы Межправительственной Группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК), публикация которого намечена на 2013 г., предусматривается использовать результаты расчетов эволюции климата в XX и XXI веках с помощью климатических моделей нового поколения, разработанных в ведущих исследовательских центрах мира. С целью научного обеспечения подготовки Пятого доклада МГЭИК Всемирная программа исследований климата инициировала 5-ю фазу Международного проекта сравнения объединенных моделей CMIP5 (Taylor et al., 2007). Формат этого проекта существенно расширен по сравнению с предыдущей фазой — CMIP3, в рамках которой проводилась подготовка Четвертого оценочного доклада МГЭИК (2007 г.).

В результате реализации экспериментальной части CMIP5 получен большой объем данных, включающий сотни характеристик климата с временной дискретизацией (с шагом) от нескольких часов до месяцев

(в течение всего охватываемого периода, т. е. нескольких сот лет). Такой объем примерно в 10 раз превышает тот, что получен в результате предыдущей фазы проекта (CMIP3). Это увеличение является следствием расширения списка запланированных экспериментов, а также роста количества моделей и их пространственного разрешения. Модельные данные архивируются в Ливерморской лаборатории (США) и предоставляются участникам диагностической части CMIP5, в число которых входят и авторы настоящего исследования.

В программе расчетов климата XX и XXI веков по единому протоколу и с учетом наблюдаемого и сценарного роста парниковых газов и аэрозоля в атмосфере приняли участие более 50 моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), разработанных в ведущих научных организациях разных стран мира, занимающихся исследованиями климата. Результаты модельных расчетов размещены на сайте Ливерморской национальной лаборатории (США) [<http://pcmdi3.llnl.gov/esgcet/home.html>] в формате международного обмена NetCDF.

В ходе выполнения первого этапа работ по оценке возможных последствий изменений климата для энергетики России в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова была сформирована база данных «Суперансамбль данных МОЦАО CMIP5 для исследования изменений климата» за XX и XXI века. Размер базы составляет 1,4 Тб и включает более 40 различных характеристик климата, рассчитанных по 32 МОЦАО (эти данные были размещены на сайте на дату начала выполнения проекта) и двум сценариям радиационного внешнего воздействия на глобальный климат RCP4.5 (умеренное воздействие) и RCP8.5 (максимальное воздействие) за 250 лет (Taylor et al., 2007). Список МОЦАО, включающий название научной организации и страну, в которой создана данная версия модели, ее год создания и пространственное разрешение для атмосферы и океана, приведен в таблице 1. Горизонтальное разрешение МОЦАО характеризуется шагом сетки в градусах широты/долготы или в виде спектрального усечения (в атмосфере). Вертикальное разрешение (L) определяется количеством уровней.

Таблица 1

### Модели общей циркуляции атмосферы и океана CMIP5

№	Institution	Model ID, Vintage	Resolution of atmospheric model	Resolution of oceanic model
1	CSIRO&BOM, Australia	ACCESS1.0, 2011	N96 (1,875°× 1,25°)L38	MOM4p1(1°×0,3-1,0°)L50
2	BCC, China	BCC_AGCM2.1,2011	T42 (2,8°× 2,8°)L26	MOM4 (1°× 0,3-1,0°)L40
3	BNU, China	BNU-ESM, 2011	T42 (2,8°× 2,8°)L26	MOM4p1(1°× 0,3-1,0°)L50
4	CCCMA, Canada	CanESM2, 2010	T63 (1,9°× 1,9°)L35	(-0,7° × ~0,9°)L40 256 × 192
5	CCCMA, Canada	CanCM4, 2010	T63 (1,9°× 1,9°)L35	(-0,7° × ~0,9°)L40 256 × 192
6	NCAR, USA	CCSM4, 2010	f09_g16(1,25°× 0,9°)L27, 288×192	POP2(1,1°× 0,3~0,6°)L60, 320×383
7	CNRM, France	CNRM-CM5, 2010	TL127 (1,4°× 1,4°)L31	ORCA1deg(~1°×1~0,3°)L42, 256×128
8	CSIRO, Australia	CSIRO Mk3.6 ,2010	T63 (1,9°×1,9°)L18	MOM2.2 (1,9°× 0,9° )L31, 192×189
9	GFDL, USA	GFDL-CM3, 2011	AM3 C48 (2°×2,5°)L48	MOM4 T(1° × 0,3-1,0°) L50, 360×200
10	GFDL, USA	GFDL-ESM2G,2010	AM2 M45 (2°×2,5°)L24	TOPAZT(1° × 0,3-1,0°) L63, 360×210
11	GFDL, USA	GFDL-ESM2M,2010	AM2 M45 (2°×2,5°)L24	MOM4((1° × 0,3-1,0°) L50, 360×200
12	NASA, USA	GISS-E2-H, 2004	(2,0° × 2,5°)L40	HYCOM(1°×0,2~1,0°)L26
13	NASA, USA	GISS-E2-R, 2011	(2,0° × 2,5°)L40	Russel(1°×1,25°)L32
14	Hadley Centre,UK	HadGEM2-ES, 2009	HadGEM2N96 (1,875°×1,25°)L38	HadGOM2(1°× 0,3-1,0°)L40
15	INM, Russia	INM CM4, 2009	(2,0° × 1,5°)L21	R1×(1,0°-0,5°)L40 360×340
16	AORI/NIES/JAM ES&T, Japan	MIROC4H, 2009	T213(0,56°×0,55°)L56 640×320	COCO3,4R(0,3°×0,2°)L48 1280×912
17	AORI/NIES/JAM ES&T, Japan	MIROC5, 2010	T85L40(1,4°×1,4°)L40 256×128	COCO4,5R(1,4°×0,5°)L50 256×224
18	JAMES&T/A&O RI/NIES	MIROC-ESM-CHEM, 2010	T42L80(2,8°×2,8°)L80	COCO3,4R(1,4°×0,5°)L44 256×192
19	MPI, Germany	MPI-ESM-LR, 2009	T63 (1,9° × 1,9°)L47	MPIO GR16(~1°×0,5°) L40 256×220
20	MPI, Germany	MPI-ESM-P, 2009	T63 (1,9° × 1,9°)L95	MPIO GR16(~1°×0,5°) L40 256×220
21	MRI, Japan	MRI-CGCM3, 2011	TL159(1,1°×1,1°)L48 320×160	MRI,COM3 (1°×0,5°)L51 360×368
22	NCC, Norway	NorESM1-M, 2011	F19(2,5°×1,9°)L26 144×96	MICOM(r112,0,9°×1~0,5°)L 53 84×320

При создании базы данных был проведен сквозной контроль качества данных по всем временным интервалам, моделям и сценариям. Поскольку каждая модель использует свою собственную трехмерную структуру глобальной сетки и пространственное

разрешение, то для удобства анализа результаты моделей были трансформированы в единую глобальную регулярную сетку с разрешением  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ .

В оценках изменений климата и их последствий для энергетики в регионах России использовались глобальные поля следующих климатических характеристик с месячным осреднением по времени (сценарий глобального радиационного воздействия RCP4.5):

- температура приземного воздуха на уровне 2 м,
- суммарные (жидкие и твердые) осадки,
- годовые стоки (разность между осадками и испарением),
- ветер на высоте 10 м,
- потоки солнечной радиации, приходящие на поверхность

Земли.

В качестве базового периода, соответствующего современному климату, принят временной интервал с 1991 по 2010 годы. В качестве периода, характеризующего среднесрочную перспективу, выбран интервал с 2021 по 2040 годы, а долгосрочная перспектива характеризует временной интервал с 2041 по 2060 годы. Соответственно, все приведенные ниже оценки следует относить к середине указанных интервалов, а именно 2030 и 2050 годам. Изменения характеристик климата рассчитаны как разности между их средними значениями по ансамблю МОЦАО в будущем (т. е. в 2030 или 2050 гг.) и в базовом периоде.

При проведении расчетов использовалось лицензионное программное обеспечение и бесплатно распространяемое графическое средство для научных исследований GrADs (<http://grads.iges.org>).

## **2. Оценка успешности моделей МГЭИК при расчетах современного климата и выбор наиболее качественных моделей с помощью специально разработанной метрики ранжирования**

### **2.1. Общие замечания**

В настоящее время при изучении изменений климата широко используются физико-математические модели, описывающие разнообразные физико-химические и биологические взаимодействия, протекающие в природных средах. Расчеты состояний климата с помощью этих моделей выполняются на высокопроизводительных вычислительных системах (IPCC, 2007). Модели основаны на фундаментальных законах физики. Кроме того, в них применяются различные гипотезы, опирающиеся на современный уровень знания сложных физических процессов. На основе этих гипотез разработаны и используются различной степени детализации эмпирические соотношения, которые реалистично воспроизводят соответствующие физические процессы.

Обычно полагается, что достоверность расчетов будущего климата определяется способностью моделей воспроизводить современное его состояние, а также различные состояния в прошлом, в соответствии с имеющимися данными наблюдений. Чтобы убедиться, что модель правильно воспроизводит наблюдаемый климат, необходимо проводить всестороннее тестирование модели относительно данных наблюдений и проверять ее реакцию на различные внешние воздействия.

Климат — это «осредненная» погода, поэтому сравнения модельных расчетов с данными наблюдений можно проводить для характеристик, осредненных за достаточно большие промежутки времени, измеряемые десятками лет. Примерами таких временных интервалов могут служить так называемые базовые климатические периоды. В оценочных докладах МГЭИК в качестве базовых обычно используются периоды, равные 20 годам (IPCC, 2007). Способность моделей воспроизводить среднее состояние является важным, но отнюдь не достаточным условием при оценках будущих изменений климата. Помимо среднего состояния, модели должны правильно

воспроизводить эволюцию климата под влиянием внешних воздействий и естественную межгодовую изменчивость. Если, помимо современного состояния климата, модели воспроизводят различные его состояния, наблюдавшиеся в прошлые эпохи (когда внешние воздействия сильно отличались от современных), а также его эволюцию (т. е. связанные с внешним воздействием тренды и собственную изменчивость), можно считать, что полученные с помощью таких моделей оценки будущих изменений климата в результате реализации того или иного сценария внешнего воздействия заслуживают доверия.

Всесторонняя оценка МОЦАО требует очень больших усилий от коллектива разработчиков модели, который, как правило, оказывается в состоянии контролировать поведение модели лишь в ограниченном числе наиболее важных аспектов. В этом смысле чрезвычайно облегчает дело международная кооперация в виде проектов сравнения моделей. К наиболее известным международным проектам такого рода относятся сравнения атмосферных моделей АМIP, сравнения совместных моделей атмосфера—океан—криосфера СМIP, сравнения палеоклиматических моделей РМIP и другие.

В последнее время опубликован ряд работ, посвященных оценкам успешности расчетов регионального и глобального климатов с помощью МОЦАО, выполненных в рамках третьей фазы сравнения моделей СМIP3 (Говоркова и др., 2008; Gleckler et al., 2008; Pierce et al., 2009; Charman and Walsh, 2007). Результаты расчетов по этим моделям также отражены в Четвертом оценочном докладе МГЭИК об изменениях глобального климата (IPCC, 2007).

Оценки расчетов современного климата и его изменений на территории России в XXI веке проводились по 16 МОЦАО СМIP3 и использовались при подготовке Первого оценочного доклада на территории России (ОДГМ, 2008).

В разделе 1 отмечалось, что в ГГО создан архив расчетных климатических характеристик, полученных по 32 глобальным МОЦАО СМIP5 за период XX—XXI веков. По сравнению с моделями предыдущего поколения СМIP3 большинство моделей СМIP5 имеют более высокое пространственное разрешение в атмосфере и океане и

включают новые более совершенные методы параметризации физических процессов. Некоторые научные организации подготовили несколько вариантов расчета глобального климата, которые отличаются между собой методами параметризации отдельных физических процессов или имеют разное пространственное разрешение в океане и атмосфере. В этой связи представляет определенный интерес оценить, насколько повысилась успешность новых моделей СМIP5 при расчете климатических характеристик на территории России и уменьшился межмодельный разброс, характеризующий неопределенность оценок современного и будущего климата России по ансамблю моделей по сравнению с предыдущими расчетами по моделям СМIP3. Основное внимание в анализе уделялось таким характеристикам, как температура приземного воздуха, осадки, годовые стоки и давление на уровне моря на территории России.

## **2.2. Сравнительная оценка качества моделей СМIP3 и СМIP5**

Как отмечалось ранее, необходимым условием успешного расчета будущих изменений климата является достоверное моделирование его современного состояния. К настоящему времени предложены разные метрики (критерии) для оценки успешности расчета современного климата. Проблема состоит в том, что систематические ошибки расчета разных переменных модели, как правило, слабо коррелированы между собой и поэтому в настоящее время не существует универсального алгоритма, указывающего, по каким критериям отбирать лучшие модели, чтобы добиться минимизации межмодельного разброса.

Основное внимание при анализе уделялось таким характеристикам, как приземная температура воздуха, осадки, давление на уровне моря и речные стоки на территории России, полученные по моделям СМIP5. Поскольку оценки ранее проводились по 16 МОЦАО СМIP3 (ОДИК, 2008), в данном случае бралось такое же число наиболее успешных моделей СМIP5. Сначала для двух модельных ансамблей (состоящих из 19 моделей СМIP3 и 32 моделей СМIP5 соответственно) рассчитывались сезонные среднеквадра-

тические ошибки приземной температуры воздуха, суммарных (жидких и твердых) осадков, давления на уровне моря, которые сравнивались с климатическими данными на территории России в период 1980—1999 гг. Затем для каждой переменной составлялась средняя по России совокупная ошибка, равная сумме ошибок по четырем сезонам (зима, весна, лето, осень). Все модели ранжировались с учетом величины этой ошибки для каждой переменной, из которых отбирались 16 моделей, показавших наименьшие ошибки (см. рис. 1 и 2).

Из рис. 1 следует, что наименьшие ошибки по температуре наблюдаются летом, и в этот сезон они близки для обеих ансамблей. Для остальных трех сезонов ошибки в ансамбле СМIP5 заметно уменьшились по сравнению с ошибками ансамбля СМIP3. Аналогичный сезонный ход наблюдается и в величине межмодельного разброса. Другими словами, ансамбль моделей СМIP5 показал более высокую успешность расчета температуры на территории России в трех сезонах, за исключением лета. В целом, совокупная ошибка по температуре воздуха уменьшилась в ансамбле СМIP5 на 18 %, а ее межмодельный разброс на 28 % (таблица 2).

*Таблица 2*

**Абсолютные значения совокупных ошибок и их межмодельный разброс для температуры воздуха, осадков и давления на уровне моря на территории России, рассчитанные по ансамблю из 16 МОЦАО СМIP3 и СМIP5 за базовый период 1980—1999 гг.**

АOGCMs	Температура воздуха	Давление на уровне моря	Осадки
СМIP3, 16 МОЦАО	12,9±3,2	11,0±3,7	2,1±0,7
СМIP5, 16 МОЦАО	10,6±2,3	9,2±3,2	2,2±0,5

*Примечание.* В качестве наблюдаемых брались данные из следующих источников: по температуре воздуха — <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>, по осадкам — <http://www.cgd.ucar.edu/cas/guide/Data/xiearkin.htr>, по давлению — <http://www.ecmwf.int/product/data/archive/>.

Аналогичный результат получен и для давления на уровне моря, совокупная ошибка уменьшилась на 16 %, и межмодельный разброс

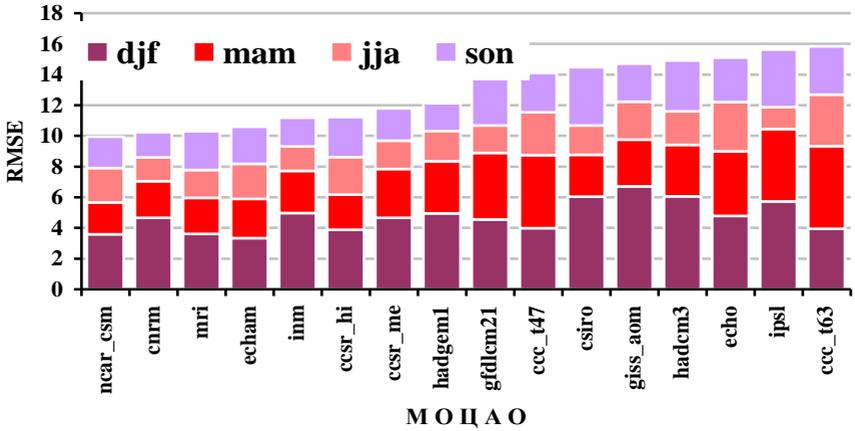
на 14 %. Существенное уменьшение совокупных ошибок для температуры и давления было также получено по ансамблю СМIP5 в полярной области северного полушария (данные не приводятся).

Что касается осадков, то картина здесь выглядит несколько другой (рис. 2). Наибольшие ошибки в осадках на территории России получились летом и наименьшие зимой в обоих ансамблях. При этом в ансамбле СМIP5 они уменьшились зимой, почти не изменились весной и осенью и выросли летом. Вместе с тем межмодельный разброс стал меньшим во все сезоны. В целом, преимущества ансамбля моделей СМIP5 по осадкам оказались не столь очевидными, как в температуре, средняя по ансамблю ошибка возросла на 5 %, а их разброс уменьшился на 28 % (таблица 2). По-видимому, это связано с тем обстоятельством, что формирование осадков происходит на пространственных масштабах, которые явно не описываются современными моделями. Это, в первую очередь, относится к процессам формирования конвективных осадков.

Если рассматривать полный список моделей СМIP3 и СМIP5, то среди них всегда найдутся такие, которые показывают посредственные результаты, и создается впечатление, что их число не убывает. На фоне общего повышения качества широко известных моделей, традиционно участвующих в проектах СМIP, в проекте СМIP5 также появилось несколько новых моделей, качество которых несколько отстает от уровня продвинутых. Вместе с тем, существенно больший по сравнению со СМIP3 размер ансамбля СМIP5 расширяет возможности в выборе качественных моделей и тем самым позволяет уменьшить неопределенности, связанные с межмодельным разбросом. Поскольку совокупные ошибки в ранжированном ансамбле СМIP5 по всем рассмотренным переменным убывают достаточно медленно, расчеты изменения климата России до середины XXI века выполнялись по расширенному ансамблю моделей.

Установлено, что в рамках данной метрики совокупные ошибки рассмотренных переменных слабо коррелируют между собой. Поскольку для температуры и осадков ансамбли моделей составлялись раздельно, полный перечень МОЦАО, использованных при оценках будущих изменений климата, приводится в таблице 1.

a)



б)

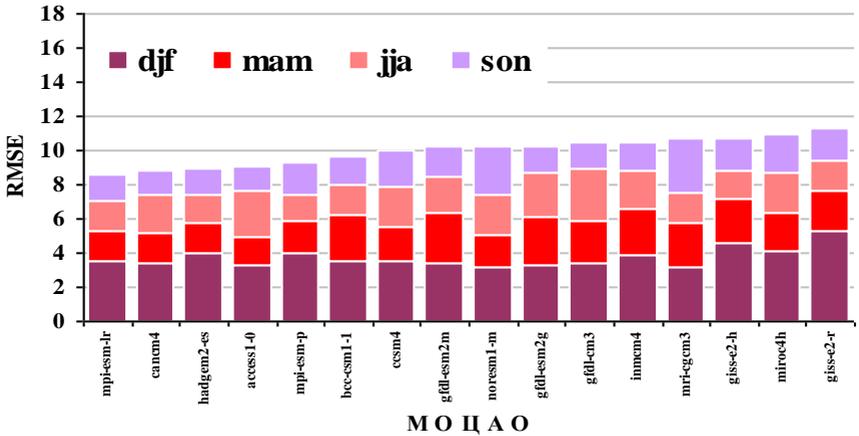
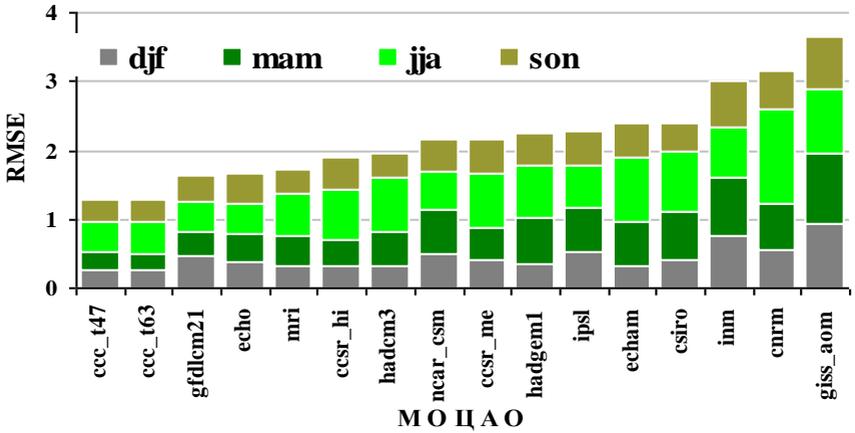


Рис. 1. Среднеквадратические ошибки (RMSE) приземной температуры воздуха (град С) на территории России для четырех сезонов (djf — зима, mam — весна, jja — лето, son — осень) за период 1980—1999 гг. , рассчитанные: а) по 16 МОЦАО СМIP3, б) по 16 МОЦАО СМIP5.

При вычислении средних квадратических ошибок использованы климатические данные CRU о приземной температуре воздуха на территории России за тот же период (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>).

a)



б)

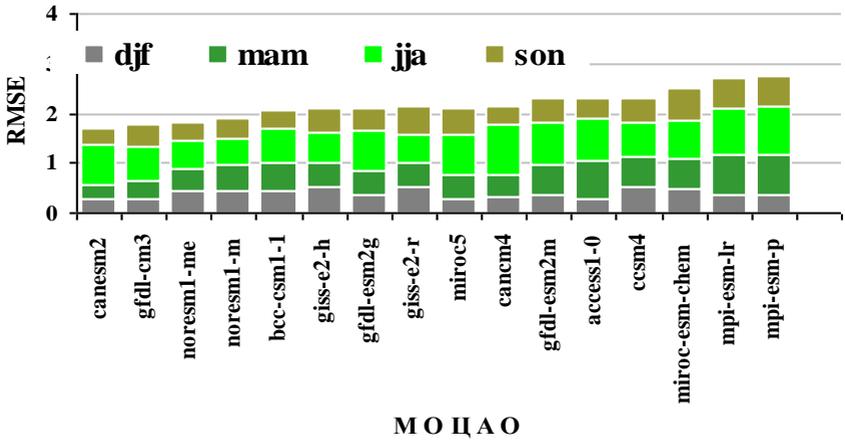


Рис. 2. Среднеквадратические ошибки (RMSE) осадков (мм/сутки) на территории России для четырех сезонов (djf — зима, mam — весна, jja — лето, son — осень) за период 1980—1999 гг., рассчитанные: а) по 16 МОЦАО СМIP3, б) по 16 МОЦАО СМIP5.

При вычислении средних квадратических ошибок использованы климатические данные об осадках на территории России за тот же период (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/guide/Data/xiearkin.htm>).

## Выводы

Выполнен анализ модельных расчетов современного климата с помощью совместных моделей атмосфера—океан—криосфера, принимавших участие в международном проекте сравнения моделей СМIP3 и СМIP5.

В рамках принятой метрики из каждой выборки СМIP3 и СМIP5 были созданы два ансамбля, включающие наиболее успешные модели при расчетах современного климата. Сравнительный анализ показал, что ансамбль СМIP5 более успешно воспроизводит приземную температуру воздуха на территории России зимой, весной, осенью и, в целом, за год по сравнению с ансамблем СМIP3. Межмодельный разброс, характеризующий меру неопределенности ансамблевых оценок, также оказывается меньшим в ансамбле СМIP5. Что касается осадков, то более высокое качество их расчета ансамблем моделей нового поколения заметно только зимой, а в другие сезоны успешность обоих ансамблей оказалась примерно одинаковой.

**Межмодельный разброс осадков уменьшился во все сезоны в ансамбле СМIP5, как и в случае с температурой. Это в целом свидетельствует об уменьшении неопределенности оценок будущих изменений компонент гидрологического баланса, основанных на расчетах по моделям нового поколения.**

Для оценки изменения температуры воздуха, осадков, годового стока, потока солнечной энергии и скорости ветра в первой половине XXI века на территории России составлен ансамбль из 16 МОЦАО СМIP5.

### **3. Оценка изменения климата в административных регионах России по ансамблю моделей МГЭИК на период до 2030 года и до середины XXI века**

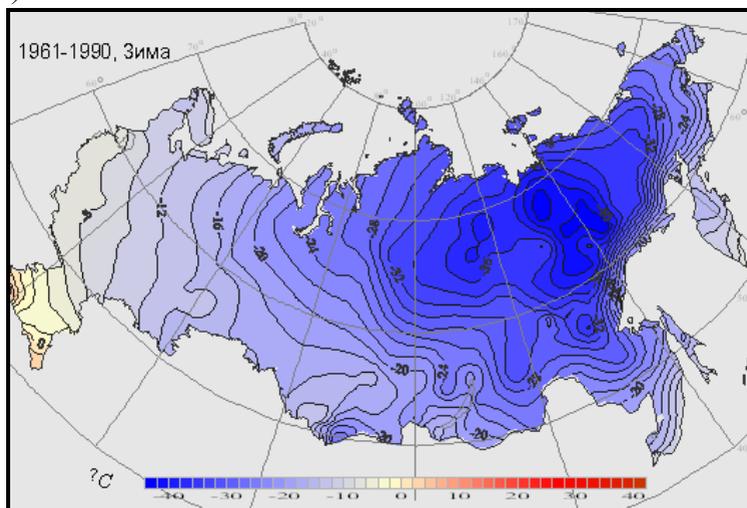
#### **3.1. Климат России по данным наблюдений**

В настоящем разделе дается краткая характеристика современного климата России. Более полное его описание можно найти в ряде специальных монографий, опубликованных в последние годы (КР, 2001; НАР, 2007). Климат России характеризуется большим разнообразием, обусловленным протяженностью ее территории и значительными сезонными колебаниями температурного и гидрологического режимов. По климатическим условиям Россия является самой холодной страной в мире; средняя годовая температура приземного воздуха на ее территории составляет  $-4,1$  °С. На большей части территории климатические условия достаточно суровые для комфортного проживания населения. Другой особенностью климата является наличие огромных пространств (более 60 % площади), занятых многолетнемерзлыми грунтами.

*Температура приземного воздуха.* На Европейской территории России (ЕТР) средняя зимняя температура воздуха изменяется от  $-3$  °С на юго-западе до  $-12$  °С в центральных областях, достигая положительных значений на Черноморском побережье. Летом средние температуры изменяются от  $4$  °С на северном побережье страны до  $22$  °С на юге в Астраханской области, а абсолютные максимумы достигают  $45$  °С (рис. 3).

Зимой в Центральной и Восточной Сибири образуется устойчивый зимний антициклон, который способствует формированию очень низких температур воздуха. В этих районах наблюдается более 280 дней в году с отрицательными минимальными суточными температурами (рис. 4).

а)



б)

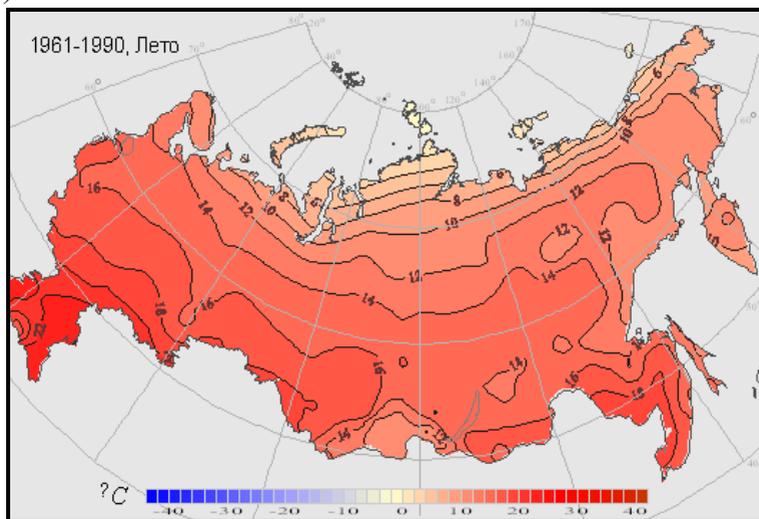


Рис. 3. Средняя температура приземного воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ): (а) зимой и (б) летом за период 1961—1990 гг.

Здесь в качестве стандартного периода для оценивания климатических переменных, характеризующих современный климат, по рекомендации ВМО используется период 1961—1990 гг.

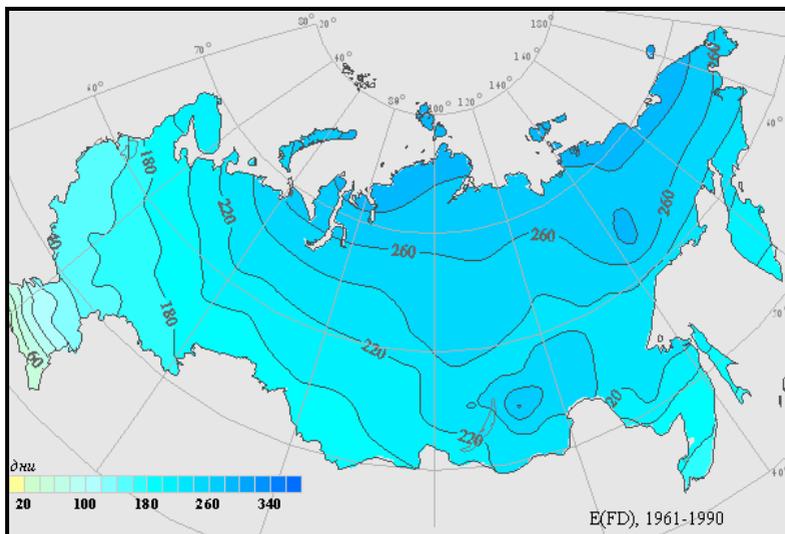
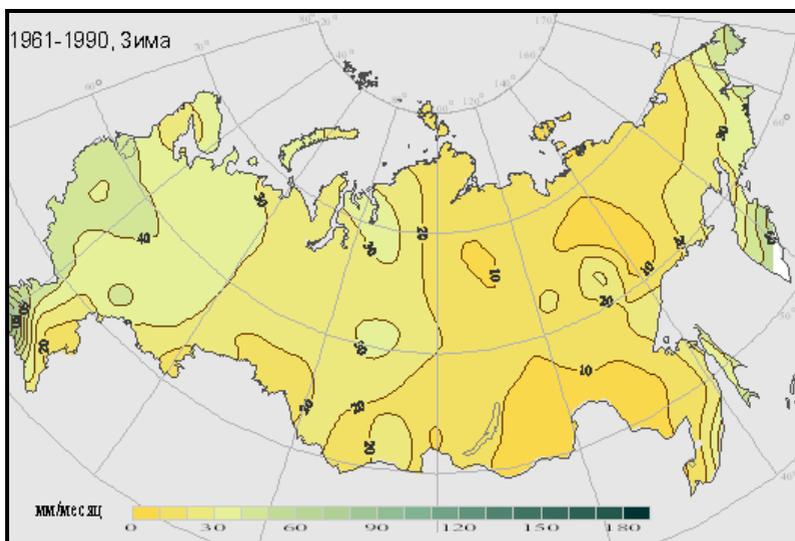


Рис. 4. Среднее за год число дней с отрицательными минимальными суточными температурами.

*Осадки.* На большей части территории России выпадает много осадков в виде снега. При этом практически на всей территории России суммы осадков в теплый период года превышают их суммы в холодный период. Распределение суммарных осадков (твердых и жидких) чрезвычайно неравномерно по территории. Годовые суммы осадков изменяются от 3200 мм на Черноморском побережье Кавказа до 150 мм в арктических районах и в засушливых областях юго-восточного Алтая (рис. 5).

*Водные ресурсы.* Реки на большей части России имеют преимущественно снеговое питание. Более половины годового стока (50—75 %) формируется за счет таяния снега. В период снеготаяния начинается весеннее половодье, которое в отдельные годы приводит к крупным наводнениям. Наиболее опасные наводнения, наблюдающиеся на реках Восточной Сибири, связаны с образованием на них заторов и зажоров.

а)



б)

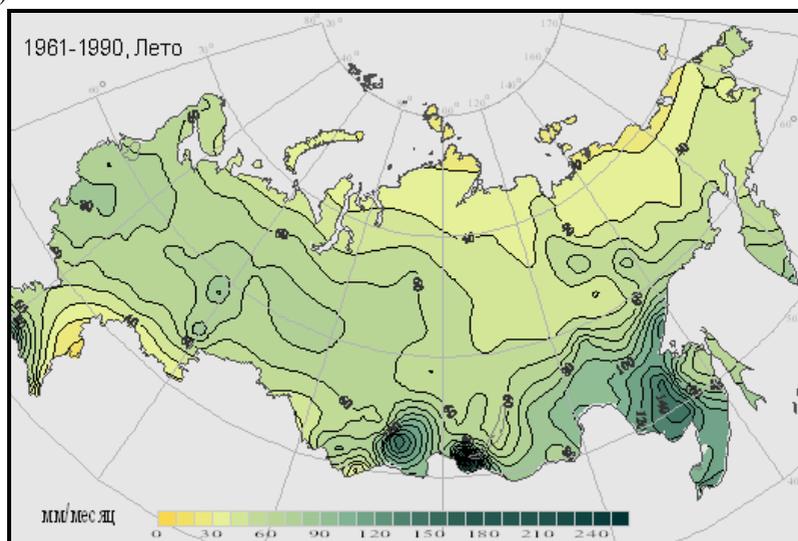


Рис. 5. Средние месячные суммы осадков (мм): (а) зимой и (б) летом за период 1961—1990 гг.

*Снежный покров.* Особенностью климата России является длительное залегание снежного покрова на большей части территории. Основными показателями снежного покрова являются число дней со снегом, его высота, плотность и запас воды в снеге. Наиболее высокий снежный покров в пределах ЕТР характерен для Предуралья, где запас воды составляет 50—250 мм. В центральных районах ЕТР запасы воды в снежном покрове находятся в пределах от 80 до 140 мм, а в многоснежные годы — до 200 мм.

*Облачность и солнечная радиация.* Регионами, где наиболее часто имеет место пасмурная погода, являются северо-запад европейской территории России, побережье Камчатки и тихоокеанских островов. Реже пасмурная погода наблюдается в Восточной Сибири в области действия Сибирского антициклона. Годовой ход характеризуется почти повсеместно минимумом количества облаков летом и максимумом поздней осенью или зимой, за исключением муссонных областей на Дальнем Востоке. Во все сезоны года суммарная радиация возрастает с севера на юг в соответствии с изменением высоты Солнца. Исключением является период с мая по июнь, когда благодаря большой продолжительности дня и высокому положению Солнца довольно высокие значения суммарной радиации на севере.

*Ветровой режим.* Важной особенностью географического распределения скорости ветра являются весьма значительные горизонтальные градиенты вблизи побережий северных и дальневосточных морей, где средняя скорость ветра изменяется от 3 м/с на континенте до 9 м/с и больше над водной акваторией. Максимальная скорость ветра на побережьях северных и дальневосточных морей, за исключением побережья Японского моря, достигает 34 м/с. Эти районы являются наиболее благоприятными для развития ветроэнергетики. Вследствие особенностей рельефа очаги повышенных скоростей ветра наблюдаются также в южной части ЕТР, на границе с Казахстаном, в Новосибирской и Кемеровской областях, где отмечалась максимальная скорость ветра 34—36 м/с.

*Многолетняя мерзлота.* Почвы или грунты считаются многолетнемерзлыми, если их температура остается ниже нуля в течение двух лет и более. Помимо многолетнемерзлых грунтов в

России вплоть до 40—45° с. ш. распространены сезонно-мерзлые грунты, промерзающие до разных глубин в зимнее время в зависимости от климата, ландшафта, состава и структуры почвы. Многолетняя мерзлота в России занимает более 10 млн км<sup>2</sup>, что составляет около 60 % всей территории (рис. 6). Мощность вечной мерзлоты достигает 1370 м в Восточной Сибири.

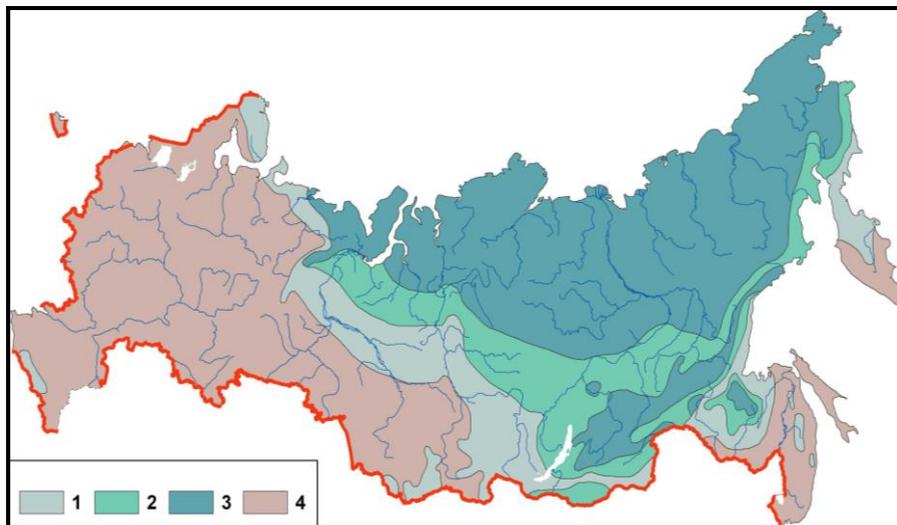


Рис. 6. Многолетнемерзлые грунты России: (1) площади с островным (менее 50 %) распределением мерзлых грунтов; (2) площади с прерывистым (50 % — 90 %) распределением мерзлых грунтов; (3) площади со сплошным (более 90 %) распределением мерзлых грунтов; (4) области сезонного промерзания (Kotlyakov and Khromova, 2002).

Особое значение эволюция вечной мерзлоты имеет при хозяйственном освоении территории, связанном с возведением строительных и инженерных сооружений и, в первую очередь, прокладкой и эксплуатацией магистральных трубопроводов. Это особенно важно для территории севера Западной Сибири, как в связи с низинным и равнинным характером местности, так и с

расположением здесь Западно-Сибирской газоносной провинции, которая является основным источником газовых ресурсов России.

*Опасные явления.* В силу своего географического положения большая часть территории России в меньшей степени, чем многие другие районы земного шара, подвержена таким опасным метеорологическим явлениям, как тропические тайфуны, смерчи, ураганы. Тем не менее, на территории России наблюдаются другие опасные метеорологические и гидрологические явления, такие как сильный ветер, шквал, сильный дождь и снег, метель, пыльная буря, туман, град, гололедно-изморозевые отложения, волны тепла и холода, паводки и наводнения.

### **3.2. Сценарии антропогенного воздействия на климат и выбранные регионы**

Для выработки рекомендаций по адаптационным мероприятиям введены в рассмотрение два периода, определяющие среднесрочную и долгосрочную перспективы — это 2021—2040 гг. и 2041—2060 гг. Середина первого периода соответствует принятому сейчас в Энергетической Стратегии периоду планирования развития энергетики до 2030 г., а второй период призван обеспечить прогностической информацией будущие редакции Стратегии вплоть до середины XXI века.

Поскольку территория России включает разнообразные климатические зоны, при оценке изменений климата, наряду с рассмотрением территории России как единого целого, рассматриваются два типа регионов, отличающиеся между собой размерами и особенностями климатических условий. Первый тип включает Европейскую часть России, Западную и Восточную Сибирь. Второй тип основывается на административном делении по федеральным округам (ФО). При этом некоторые очень крупные по размерам ФО, расположенные преимущественно в Сибири, разбиты на регионы меньшего размера с учетом относительной однородности климатических условий. Всего рассматривалось 13 административных регионов (рис. 7). Для анализа изменений речных стоков выбраны

девять крупных водосборов, расположенных в России и на сопредельных территориях (рис. 8).

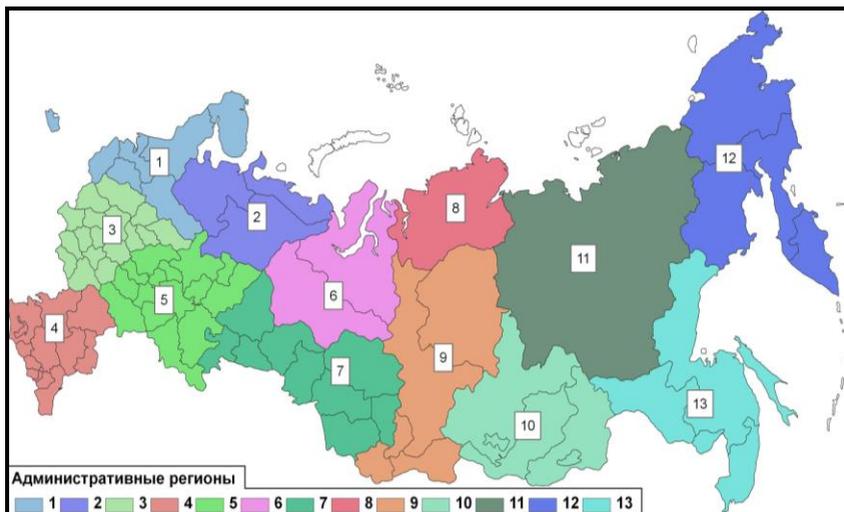


Рис. 7. Административные регионы России, для которых получены оценки изменения климата:

- 1 — Северо-Западный ФО (запад); 2 — Северо-Западный ФО (восток);
- 3 — Центральный ФО; 4 — Южный ФО; 5 — Приволжский ФО;
- 6 — Уральский ФО (север); 7 — Уральский ФО (юг) и Сибирский ФО (юго-запад); 8 — Сибирский ФО (север); 9 — Сибирский ФО, центр и юг;
- 10 — Сибирский ФО (юго-восток);
- 11 — Дальневосточный ФО (северо-запад и центр);
- 12 — Дальневосточный ФО (северо-восток);
- 13 — Дальневосточный ФО (юго-восток).

Ниже представлена серия рисунков, показывающих сезонные изменения приземной температуры воздуха, осадков, потока приходящей солнечной радиации на поверхность Земли, модуля скорости ветра у поверхности Земли и годового локального стока воды на водосборах крупных рек России, полученные в результате расчетов по ансамблю глобальных моделей СМIP5. Для температуры,

осадков и стоков также приводятся соответствующие изменения в табличном виде по территориям основных административных областей. Для всех переменных приняты стандартные метеорологические сезоны: зима (декабрь—февраль), весна (март—май), лето (июнь—август), осень (сентябрь—ноябрь).

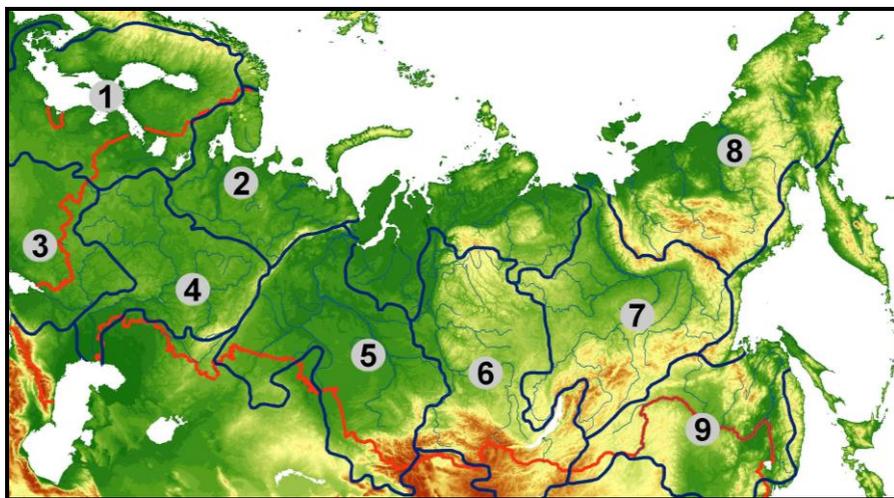


Рис. 8. Речные водосборы в России и на сопредельных территориях:

- 1 — Балтийский; 2 — северные реки Европейской территории (реки Печора, Северная Двина, Мезень, Онега);
- 3 — южные реки (Днепр, Днестр, Дон, Кубань);
- 4 — Волга и Урал; 5 — Обь; 6 — Енисей;
- 7 — реки восточной Сибири (Лена, Хатанга, Оленек);
- 8 — реки Чукотки (Индигирка, Яна, Колыма, Анадырь); 9 — Амур.

Вследствие термической инерции климатической системы, скорость потепления определяется не столько текущим ростом содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере, сколько их накоплением за весь предшествующий период. Сравнение имеющихся сценариев показывает, что потепление на территории России слабо зависит от выбранного сценария роста парниковых газов и аэрозоля в первые несколько десятилетий XXI века; различия в региональных

изменения температуры при разных сценариях сопоставимы с межмодельным разбросом ее изменений при одном и том же сценарии. То же самое можно сказать и о средних изменениях других переменных, например, осадков в первые несколько десятилетий XXI века. Поэтому за основу был принят умеренный сценарий внешнего антропогенного воздействия RCP4.5. Вместе с тем существует ненулевая вероятность того, что в будущем возможны естественные непредсказуемые воздействия на глобальный климат, например, внезапные и длительные извержения вулканов, которые смогут повлиять на приводимые ниже оценки изменения климата.

Другим, более существенным источником неопределенностей будущих климатических изменений, является естественная изменчивость климата, затрудняющая получение статистически значимых оценок на интервалах несколько десятков лет. Наконец, главная причина межмодельного разброса в оценках климата — это различия методов параметризации физических процессов и численных методов решения основных нелинейных уравнений в частных производных, описывающих процессы в атмосфере, океане, криосфере и биосфере. В настоящем исследовании суммарный вклад всех неопределенностей ансамблевого прогноза выражен либо в терминах отношения сигнала к шуму (отношения среднего по ансамблю изменения характеристики к межмодельному разбросу), либо в терминах числа моделей в ансамбле, дающих изменения одного знака. Полагалось, что если рассчитанное абсолютное изменение некоторой характеристики превышает межмодельный разброс (стандартное отклонение), или более 66 % МОЦАО показывают изменение одного знака, то такие изменения следует рассматривать как весьма вероятные. Если же 90 % МОЦАО показывают изменения одного знака, то вероятность таких изменений следует рассматривать как высокую. Если отношение сигнала к шуму оказывается меньшим единицы, или число моделей, дающих изменения одного знака, не превышает 66 % от общего числа моделей в ансамбле, то изменения климата в рассматриваемом регионе принято считать маловероятными.

### 3.3. Изменения климата России в первой половине XXI века по оценкам ансамбля моделей CMIP5

*Температура воздуха.* Сезонные и годовые изменения температуры приземного воздуха на всей территории России и в отдельных административных регионах до середины XXI века даны на рис. 9 и 10 и в таблицах 3 и 4. В течение XXI века все без исключения модели дают потепление климата на территории России, при этом величина потепления зависит от времени года и региона. Важно отметить, что средние изменения температуры превышают межмодельный разброс во все сезоны и во всех федеральных округах в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.). Наибольшее потепление ожидается зимой, оно возрастает к северу, достигая максимальных значений в прибрежной зоне Арктического бассейна. Летом, наоборот, потепление в указанной зоне минимальное, поскольку температура приземного воздуха определяется относительно холодными водами прибрежных морей Арктики. Более заметное потепление летом будет происходить в южных регионах континентальной России.

В целом по России среднее за год потепление к 2030 году составит 1—2 °С, при этом оно составит 2—3 °С зимой в северных регионах сибирских административных округов и около 1 °С летом на остальной части страны. Восточная Сибирь подвержена более быстрому потеплению в течение всего года, чем Европейская часть России. Из таблицы 4 следует, что в середине века среднее за год потепление на всей территории России составит  $2,1 \pm 0,7$  °С, а в Восточной Сибири зимой  $2,8 \pm 1,1$  °С. Важно отметить, что изменения температуры воздуха превышают межмодельный разброс во всех федеральных округах уже в среднесрочной перспективе.

Данные наблюдений и модельных расчетов показывают, что средние тренды температуры приземного воздуха, в целом, по России хорошо согласуются между собой за последние 30 лет и составляют примерно 0,4 °С/10 лет. Такое соответствие трендов позволяет считать достаточно достоверными модельные оценки потепления на ближайшую перспективу.

Таблица 3

Средние изменения температуры (°C), полученные по ансамблю из 16 моделей в административных регионах России за период 2021—2040 гг. по сравнению с базовым периодом 1991—2010 гг.

Регион	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
<b>1</b>	1,5±1,1	1,3±0,7	1,0±0,6	1,2±0,6	1,3±0,5
<b>2</b>	1,4±1,0	1,2±0,6	1,0±0,6	1,0±0,5	1,1±0,5
<b>3</b>	1,6±0,8	1,3±0,6	1,1±0,6	1,0±0,6	1,3±0,5
<b>4</b>	1,0±0,7	1,0±0,4	1,1±0,4	0,9±0,5	1,0±0,4
<b>5</b>	1,7±1,2	1,4±0,8	1,1±0,6	1,4±0,7	1,4±0,6
<b>6</b>	1,6±0,6	1,3±0,7	1,2±0,6	1,2±0,7	1,3±0,6
<b>7</b>	1,4±0,5	1,1±0,7	1,1±0,5	1,2±0,6	1,2±0,5
<b>8</b>	2,1±1,4	1,7±1,3	1,2±0,9	2,2±1,0	1,8±1,0
<b>9</b>	1,8±1,1	1,4±0,9	1,2±0,8	1,6±0,9	1,5±0,7
<b>10</b>	1,6±0,6	1,2±0,8	1,2±0,7	1,4±0,8	1,3±0,6
<b>11</b>	1,8±0,9	1,5±1,0	1,2±0,7	1,7±0,6	1,5±0,7
<b>12</b>	2,0±1,0	1,4±0,8	1,3±0,6	1,7±0,6	1,6±0,7
<b>13</b>	1,5±0,7	1,1±0,6	1,1±0,5	1,2±0,5	1,2±0,5
<b>ЕЧР</b>	1,5±0,9	1,3±0,6	1,1±0,5	1,1±0,5	1,2±0,5
<b>Западная Сибирь</b>	1,7±0,7	1,3±0,8	1,2±0,6	1,4±0,7	1,4±0,6
<b>Восточная Сибирь</b>	1,8±0,8	1,4±0,8	1,2±0,6	1,6±0,6	1,5±0,6
<b>Россия</b>	1,6±0,7	1,3±0,7	1,2±0,5	1,4±0,6	1,4±0,5

*Примечание.*

Названия регионов и соответствующие им номера приведены на рис. 7.

Таблица 4

Средние изменения температуры (°С) полученные по ансамблю из 16 моделей в административных регионах России за период 2041—2060 гг. по сравнению с базовым периодом 1991—2010 гг.

Регион	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
<b>1</b>	2,4±1,1	1,9±0,8	1,7±0,7	1,8±0,7	1,9±0,7
<b>2</b>	2,2±1,1	1,8±0,7	1,6±0,7	1,6±0,6	1,8±0,7
<b>3</b>	2,5±1,1	2,0±0,8	1,6±0,8	1,7±0,7	1,9±0,7
<b>4</b>	1,5±0,7	1,5±0,5	1,8±0,7	1,5±0,6	1,6±0,5
<b>5</b>	2,7±1,2	2,1±0,9	1,8±0,9	2,1±0,9	2,2±0,8
<b>6</b>	2,6±1,0	2,0±0,7	1,7±0,8	1,9±0,9	2,0±0,7
<b>7</b>	2,2±0,8	1,6±0,7	1,8±0,6	2,0±0,8	1,9±0,6
<b>8</b>	3,1±1,6	2,6±1,5	2,0±1,3	3,2±1,1	2,7±1,2
<b>9</b>	2,9±1,1	2,1±0,9	1,9±1,0	2,4±1,0	2,3±0,8
<b>10</b>	2,4±0,9	1,9±0,8	1,9±0,8	2,2±0,9	2,1±0,7
<b>11</b>	2,8±1,2	2,3±1,4	1,8±0,7	2,6±0,8	2,4±0,9
<b>12</b>	3,2±1,3	2,2±1,1	1,9±0,7	2,5±0,8	2,4±0,9
<b>13</b>	2,4±0,8	1,8±0,7	1,8±0,7	2,0±0,7	2,0±0,7
<b>ЕЧР</b>	2,3±1,0	1,9±0,7	1,7±0,7	1,7±0,6	1,9±0,7
<b>Западная Сибирь</b>	2,6±0,9	2,0±0,8	1,8±0,8	2,2±0,9	2,2±0,8
<b>Восточная Сибирь</b>	2,8±1,1	2,1±1,1	1,8±0,7	2,4±0,7	2,3±0,8
<b>Россия</b>	2,6±0,9	2,0±0,8	1,8±0,7	2,2±0,7	2,1±0,7

*Примечание.*

Названия регионов и соответствующие им номера приведены на рис. 7.

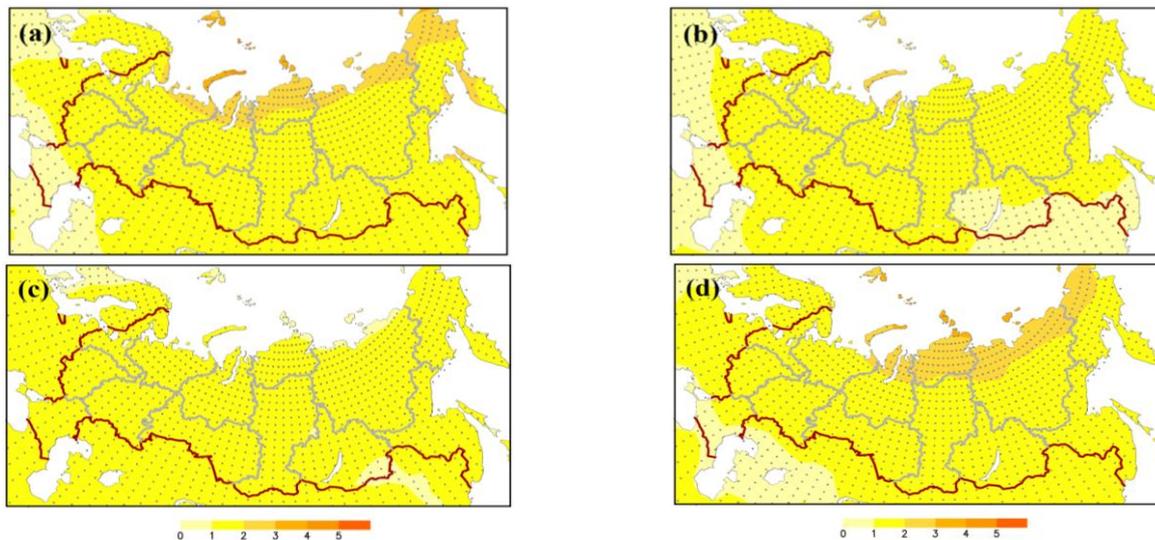


Рис. 9. Изменения температуры приземного воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на территории России (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) по отношению к базовому периоду (1991—2010 гг.), рассчитанные по ансамблю 16 МОЦАО CMIP5.

Точками обозначены области, в которых средние изменения температуры воздуха по ансамблю моделей превышают стандартные отклонения межмодельного разброса, то есть в окрестности рассматриваемого узла сетки отношение сигнала к непредсказуемому шуму больше единицы.

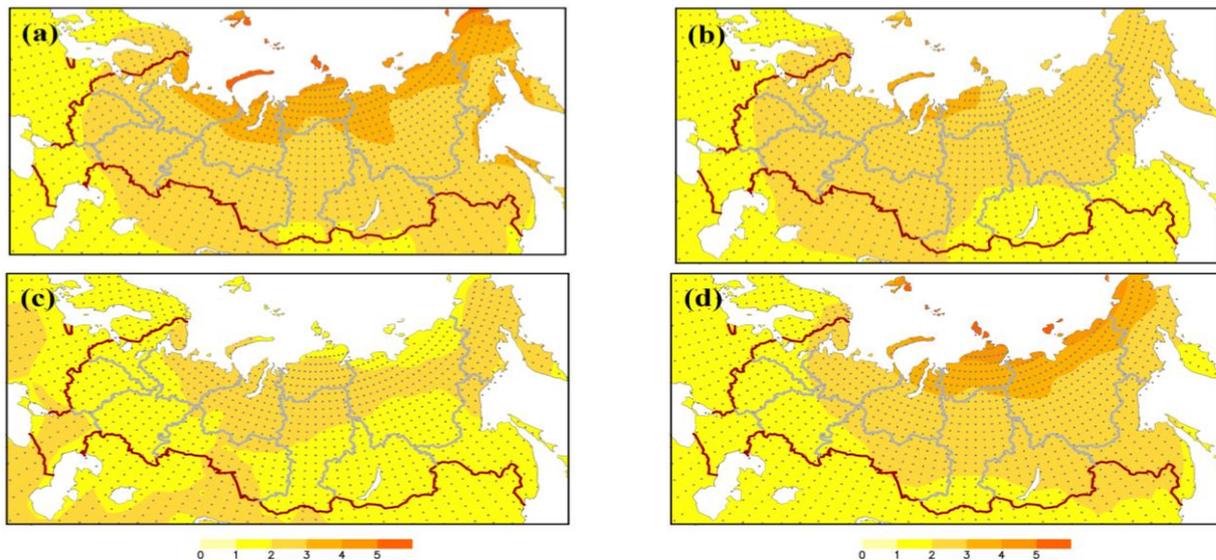


Рис. 10. Изменения температуры приземного воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на территории России (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью в середине XXI века (2041—2060 гг.) по отношению к базовому периоду (1991—2010 гг.), рассчитанные по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5.

*Осадки.* В первой половине XXI века осадки будут возрастать на всей территории России, причем существенный рост приходится на холодное полугодие (см. рис. 11 и рис. 12). Это вызвано ростом влагоемкости атмосферы и интенсификацией гидрологического цикла вследствие общего потепления атмосферы. Сезонные и региональные изменения осадков сильно зависят от региона. Так, рост осадков ожидается повсеместно зимой; в среднесрочной перспективе (до 2030 г.) этот рост составит 7 %, а к середине XXI века примерно 11 %. Летний рост осадков заметно меньше зимнего; на среднесрочную перспективу он составит 2,5 % и на середину века около 4 %. Во многих регионах России существует большая неопределенность в отношении будущих изменений осадков по сравнению с изменениями температуры воздуха. В ряде регионов межмодельный разброс (стандартное отклонение) превышает средние по ансамблю изменения; оба эти параметра существенно зависят от сезона и региона. В летний период до середины века на больших пространствах ЕТР и части Западной Сибири изменения осадков по знаку следует рассматривать как недостаточно надежные, поскольку менее 66 % МОЦАО дают изменения осадков одного знака. Наибольший рост осадков ожидается в Центральной и Восточной Сибири зимой, весной и осенью в первой половине XXI века.

Летом на фоне роста суммарных осадков во многих регионах будут возрастать конвективные и уменьшаться осадки из облаков слоистых форм (Оценочный доклад, 2008). Более двух третей моделей показывают тенденцию роста конвективных осадков на значительной территории России. Это означает, что следует ожидать рост повторяемости таких опасных явлений погоды, как грозы, ливни и паводки. С другой стороны, модели дают большой межмодельный разброс количества конвективных осадков, который превышает средние изменения в середине XXI века, что свидетельствует о значительной неопределенности в отношении их количественного изменения для большинства ФО.

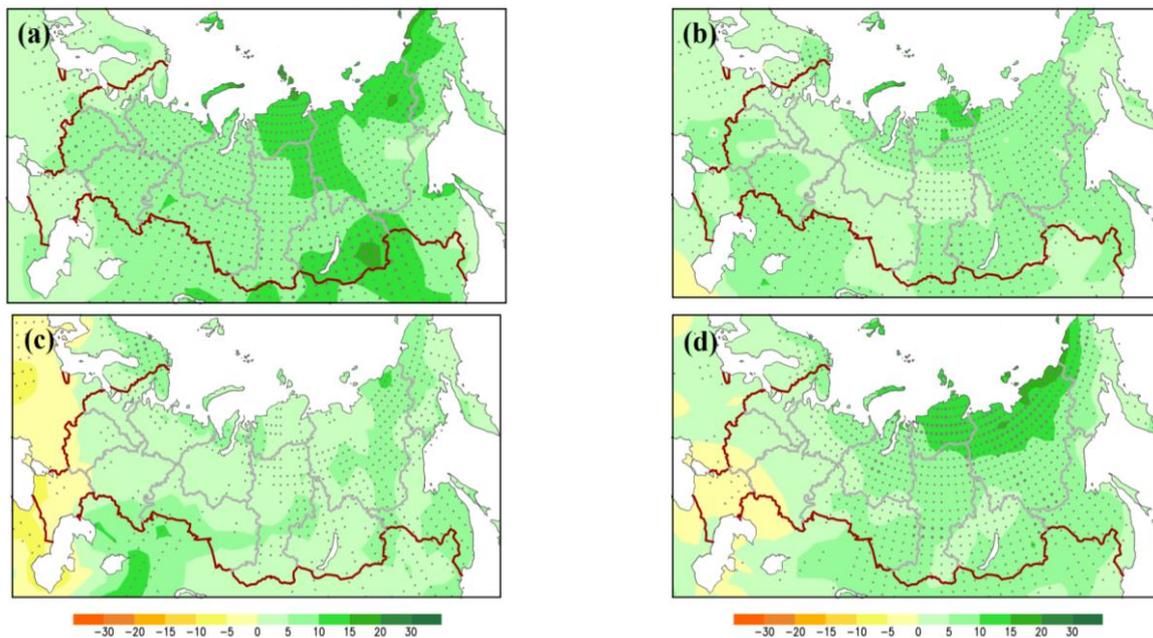


Рис. 11. Изменения суммарных (жидких и твердых) осадков (% по отношению к осадкам в базовый период 1991—2010 гг.): (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.), рассчитанные по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5.

Здесь и далее малыми точками обозначены области, в которых 66 % и более моделей показывают одинаковый знак изменения. Большими точками — 90 % и более моделей показывают одинаковый знак изменения. Без точек — области, в которых менее 66 % моделей дают изменения одного знака.

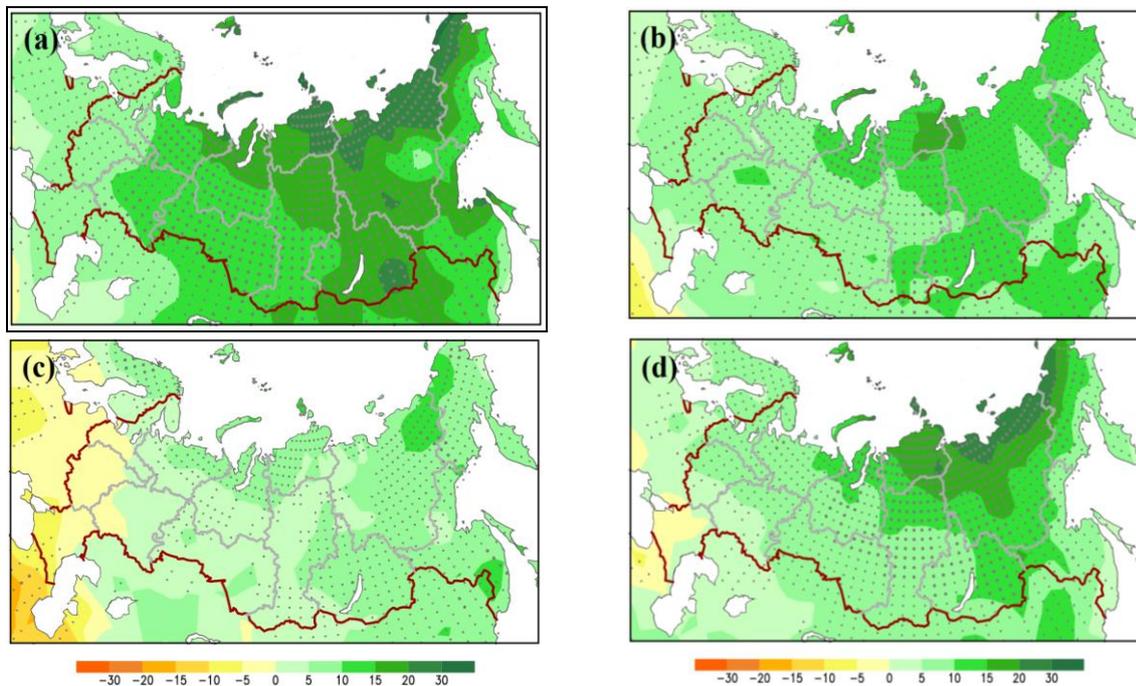


Рис. 12. Изменения суммарных (жидких и твердых) осадков (% по отношению к осадкам в базовый период 1991—2010 гг.): (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью в середине XXI века (2041—2060 гг.), рассчитанные по ансамблю из 16 МОЦАО СМIP5.

С точки зрения количественных показателей изменения водных ресурсов на энергетику России заслуживают внимание восемь административных регионов (см. таблицы 5 и 6), в которых средние за год изменения осадков превышают межмодельный разброс, и большинство из них располагаются в Сибири.

Таблица 5

Средние изменения осадков (в % по отношению к значениям в базовый период), полученные по ансамблю из 16 МОЦАО, в административных регионах России за период 2021—2040 гг.

Регион	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1	7,3±7,1	2,3±5,6	-0,2±5,8	2,6±5,8	2,6±3,6
2	<b>6,7±5,6</b>	4,0±5,3	-4,1±8,8	3,4±7,7	3,2±3,7
3	<b>6,5±5,1</b>	4,3±5,5	0,4±9,2	2,2±6,5	3,1±3,2
4	3,7±7,2	2,3±7,3	-4,5±7,7	0,4±8,4	0,9±3,7
5	<b>8,1±7,5</b>	4,8±6,3	2,6±6,5	4,6±6,0	<b>4,6±3,9</b>
6	<b>6,9±6,5</b>	5,0±5,5	0,4±6,7	3,1±5,5	3,4±3,9
7	<b>8,1±4,2</b>	<b>6,6±5,5</b>	<b>3,1±3,0</b>	<b>6,2±3,7</b>	<b>4,9±2,4</b>
8	<b>10,4±10,1</b>	8,4±11,5	3,9±5,9	8,9±7,7	<b>6,9±6,5</b>
9	<b>8,2±4,9</b>	6,1±6,5	3,4±6,6	4,3±5,4	<b>4,9±4,1</b>
10	<b>7,5±4,1</b>	<b>5,6±5,0</b>	1,8±2,6	4,5±4,4	<b>4,2±2,2</b>
11	<b>11,4±6,5</b>	7,9±8,1	3,6±4,9	<b>8,5±6,4</b>	<b>6,2±4,7</b>
12	<b>9,6±7,2</b>	5,4±6,2	4,1±5,0	6,1±6,6	<b>5,8±4,2</b>
13	5,2±7,5	<b>6,7±5,3</b>	4,3±4,4	3,3±3,3	<b>4,6±2,4</b>
ЕЧР	<b>6,4±3,4</b>	3,6±3,6	0,3±5,2	2,8±4,4	<b>3,1±2,5</b>
Западная Сибирь	<b>7,8±3,4</b>	<b>5,9±4,8</b>	2,3±2,4	<b>5,0±3,5</b>	<b>4,6±2,3</b>
Восточная Сибирь	<b>8,9±4,8</b>	<b>6,7±4,8</b>	<b>3,9±3,3</b>	<b>6,0±4,0</b>	<b>5,5±3,2</b>
Россия	<b>7,3±2,6</b>	<b>5,5±3,5</b>	<b>2,5±2,3</b>	<b>4,6±3,2</b>	<b>4,4±2,1</b>

Примечание.

Названия регионов и соответствующие им номера приведены на рис. 7.

Здесь и далее жирным шрифтом выделены изменения осадков, превышающие стандартное отклонение.

Таблица 6

Средние изменения осадков (в % по отношению к значениям в базовый период), полученные по ансамблю из 16 МОЦАО в административных регионах России за период 2041—2060 гг.

Регион	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1	9,5±7,5	4,8±5,6	0,5±7,9	5,1±6,3	4,5±4,5
2	8,6±6,0	6,5±5,8	-0,3±10,0	1,7±8,6	3,9±4,7
3	9,0±5,5	7,7±6,5	0,4±8,2	3,9±8,1	5,0±4,5
4	4,1±8,0	2,8±5,5	-7,8±9,6	-1,8±9,4	0,2±3,9
5	11,7±7,8	7,0±6,8	1,9±9,2	8,4±5,9	6,7±4,2
6	11,4±7,1	7,8±6,2	1,5±8,3	5,9±6,1	5,9±3,7
7	14,5±6,0	9,2±5,6	4,2±4,1	9,1±4,6	7,2±3,2
8	15,7±8,9	10,2±11,0	5,3±5,6	15,4±7,6	10,3±6,2
9	12,7±5,9	7,6±7,1	3,8±6,8	8,2±5,9	7,2±4,0
10	13,4±6,5	8,3±5,9	2,9±3,5	8,2±4,3	6,9±2,7
11	18,2±10,3	12,4±9,8	5,0±5,1	13,2±7,3	9,5±5,8
12	14,3±9,2	10,7±8,4	9,8±6,3	12,0±6,9	11,3±5,8
13	12,5±7,9	8,9±5,2	5,9±4,1	7,0±6,0	7,3±3,6
ЕЧР	8,5±3,8	5,9±3,9	-0,0±6,4	4,2±5,0	4,4±3,2
Западная Сибирь	13,1±5,3	8,3±5,1	3,4±3,9	8,6±4,0	7,1±2,8
Восточная Сибирь	14,9±7,3	10,4±6,3	6,4±3,8	10,8±5,6	9,2±4,2
Россия	11,5±4,0	8,3±4,1	3,8±3,3	7,9±3,9	7,0±2,9

Годовые стоки. Недавно выполнен ряд исследований, в которых оценивались изменения стоков российских рек (Шикломанов и Георгиевский, 2002; Мохов и др., 2003; Elguindi and Giorgi, 2007; Kattsov et al., 2007; Мелешко и др., 2008б). В этих исследованиях использовались различные по степени сложности и физической полноте методы расчета гидрологического режима отдельных речных бассейнов и регионов: сравнительно простые эмпирические модели, воднобалансовые модели и МОЦАО различного пространственного

разрешения, включающие также встроенные в них региональные модели высокого разрешения. Большинство расчетов показывают, что при потеплении глобального климата на территории России ожидается дальнейший рост водных ресурсов в тех регионах, где существует достаточное или избыточное увлажнение. С другой стороны, уменьшение водных ресурсов будет происходить в регионах, где водообеспеченность оказывается предельной или недостаточной уже в настоящее время. В первую очередь, это касается южных районов ЕТР. При этом на всех крупных реках, впадающих в бассейн Северного Ледовитого океана, и при всех без исключения сценариях ожидается рост годового стока. Вместе с тем, количественные оценки этих изменений существенно различаются между собой и зависят от качества, физической полноты используемых моделей и других принятых гипотез.

Ранее выполненные расчеты по ансамблю МОЦАО СМIP3 показали, что на большей части территории России и особенно в Сибири ожидается заметный рост стока в первой половине XXI века (Оценочный доклад, 2008). Однако в южных регионах Европейской территории России и сопредельных стран, включая водосборы Днепра, Дона и Днестра, следует ожидать уменьшения годовых стоков вследствие уменьшения годовых осадков и увеличения испарения весной и летом.

Ранее отмечалось, что ансамбль МОЦАО СМIP3 имеет больший межмодельный разброс в отношении изменения основных переменных, включая годовые стоки, по сравнению с моделями СМIP5. Расчеты по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5 подтвердили и несколько уточнили ранее полученные результаты. В первой половине XXI века следует ожидать устойчивый рост годовых стоков на реках Западной и Восточной Сибири (рис. 13). Этот рост, составляющий 7 % от стока в базовый период, следует ожидать к середине века на территории всего Дальневосточного ФО (таблица 7). С другой стороны, на Европейской части России достоверность роста рассчитанных стоков оказалась низкой; помимо малой величины роста стока в этом регионе менее 66 % моделей дают тренды изменения стока одного знака, а межмодельный разброс превышает

средние по ансамблю изменения во всех административных областях этого региона. Расчеты по новым данным показывают, что в начале XXI века стандартные отклонения изменений стока на многих водосборах сравнимы со средними по ансамблю изменениями, а на крупных сибирских речных системах они меньше средних по ансамблю. На водосборах Лены, Енисея, северных рек и рек Чукотки изменения годовых стоков значительно превышают величину межмодельного разброса к середине века (таблица 8).

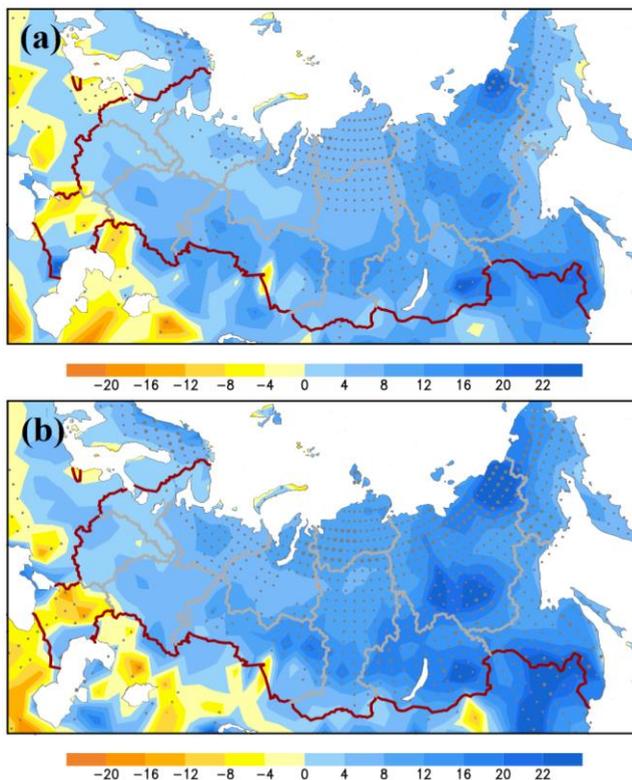


Рис. 13. Изменения среднего за год стока (% по отношению к стоку в базовый период) в ближайшей перспективе (2021—2040 гг.) и в середине XXI века (2041—2060 гг.), рассчитанные по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5.

Таблица 7

Средние изменения годового стока (в % по отношению к базовому периоду), полученные по ансамблю из 16 МОЦАО в регионах России за периоды 2021—2040 гг. и 2041—2060 гг.

Федеральные округа	2021—2040 гг.	2041—2060 гг.
Северо-западный ФО (запад)	0,4±2,6	1,1±2,8
Северо-западный ФО (восток)	0,4±2,5	0,2±3,3
Центральный ФО	-0,0±2,1	0,7±2,8
Южный ФО	-1,5±2,6	-2,4±2,9
Приволжский ФО	2,0±3,3	2,8±2,7
Уральский ФО (север)	0,4±2,2	1,0±1,8
Уральский ФО (юг)	<b>1,9±1,7</b>	<b>2,9±2,4</b>
Сибирский ФО (север)	3,7±3,9	5,2±4,2
Сибирский ФО (центр и юг)	1,9±2,8	2,4±2,7
Сибирский ФО (юго-восток)	1,3±1,8	<b>2,5±1,4</b>
Дальневосточный (северо-запад и центр)	<b>2,9±2,6</b>	<b>4,5±2,9</b>
Дальневосточный (северо-восток)	2,9±2,9	<b>7,1±4,2</b>
Дальневосточный (юго-восток)	1,9±2,3	3,1±3,3
ЕЧР	0,4±1,7	0,7±1,9
Западная Сибирь	<b>1,6±1,0</b>	<b>2,5±0,9</b>
Восточная Сибирь	<b>2,5±1,7</b>	<b>4,7±2,3</b>
Россия	<b>1,5±0,9</b>	<b>2,7±1,1</b>

Таблица 8

Годовые стоки и их изменения ( $\text{км}^3/\text{год}$ ) на основных водосборах России, полученные по ансамблю из 16 МОЦАО за периоды 2021—2040 гг. и 2041—2060 гг.

Водосборы речных систем		Годовой сток за 1991—2010 гг.	2021—2040 гг.	2041—2060 гг.
1	<b>Обь</b>	465,6±203,3	7,5±28,5	16,2±23,1
2	<b>Лена</b>	536,9±149,3	<b>30,1±28,9</b>	<b>46,1±33,4</b>
3	<b>Волга</b>	306,4±162,0	0,7±20,6	5,2±26,7
4	<b>Амур</b>	454,4±193,2	27,7±35,6	40,1±43,9
5	<b>Енисей</b>	561,8±176,3	<b>20,4±19,6</b>	<b>37,3±19,6</b>
6	<b>Чукотка</b>	678,2±189,0	<b>38,2±29,6</b>	<b>81,7±44,2</b>
7	<b>Сев. реки</b>	362,6±73,7	<b>12,6±21,4</b>	<b>18,8±17,5</b>
8	<b>Южн. реки</b>	143,6±119,0	-0,7±12,8	-6,9±19,4

*Примечание.*

Выделены жирным шрифтом значения стоков, превышающие межмодельные стандартные отклонения. Здесь же приводятся расчетные данные о стоках на крупных водосборах.

*Солнечная радиация.* Для определения возможного влияния изменений климата на гелиоэнергетический потенциал России необходимо оценить, насколько изменится приходящий на поверхность Земли сезонный поток солнечной радиации в различных регионах. На поток солнечной энергии оказывают влияние облачность, прозрачность атмосферы, концентрация аэрозоля. Наибольший интерес представляют летние условия, когда поток солнечной энергии на поверхности Земли в средних широтах оказывается наибольшим. Из рис. 14 и 15 следует, что рост потока солнечной энергии в первой половине XXI века будет происходить преимущественно в летний период на Европейской части России и в южных районах Западной Сибири. К середине века этот рост составит 6—8 Вт/м<sup>2</sup> преимущественно в Южном ФО и в центральных областях Европейской части России. Однако количественные оценки изменения потока оказались очень неопределенными из-за большого межмодельного разброса, и лишь в Южном ФО средний рост потока превышает стандартное отклонение.

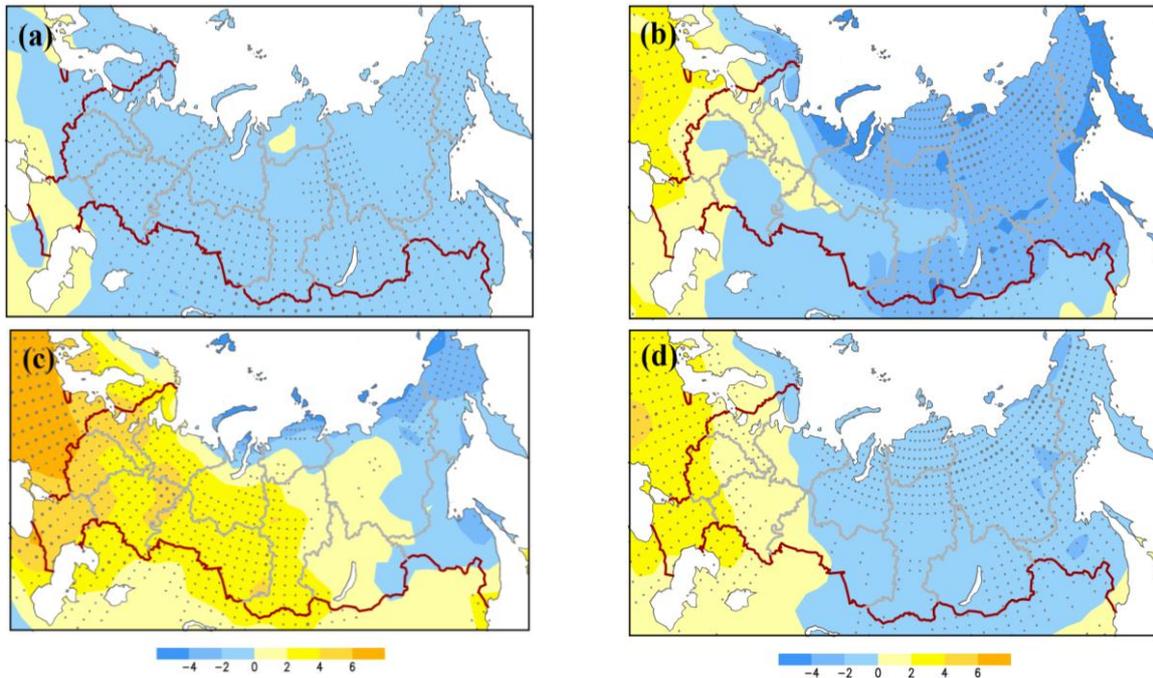


Рис. 14. Изменения потока солнечной радиации ( $\text{Вт/м}^2$ ), приходящего на поверхность Земли (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью, рассчитанного в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5.

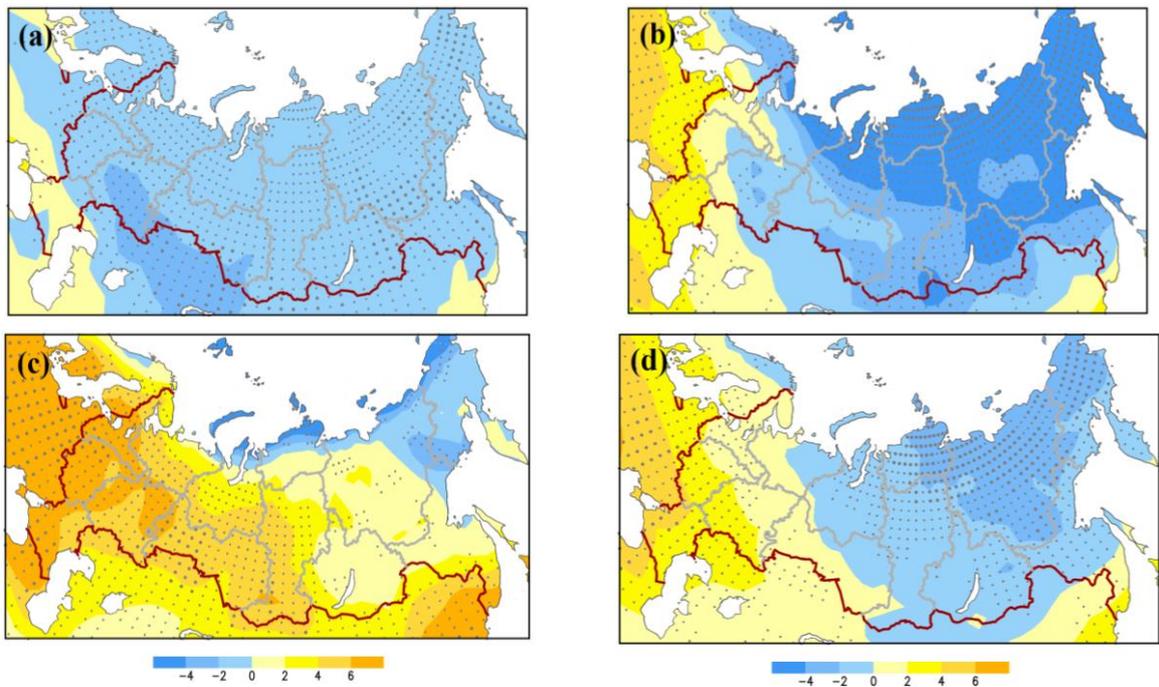


Рис. 15. Изменения потока солнечной радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), приходящего на поверхность Земли (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью, рассчитанного на середину XXI века (2041—2060 гг.) по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5.

Некоторый рост солнечной радиации также ожидается весной и осенью на юго-западе России. В другие сезоны на большей части России следует ожидать уменьшение потока солнечной радиации вследствие преимущественного роста облачности.

*Скорость ветра.* Вторым важным возобновляемым источником энергии, зависящим от климата, является ветер. В модельных расчетах скорость ветра вычислялась на высоте 10 м от поверхности Земли. На рис. 16 и 17 показано, что изменения модуля скорости ветра в приземном слое атмосферы варьируются в достаточно узком диапазоне  $\pm 1$  м/с. Причем на континентальной части страны вдали от побережья скорости ветра, как правило, убывают, особенно весной.

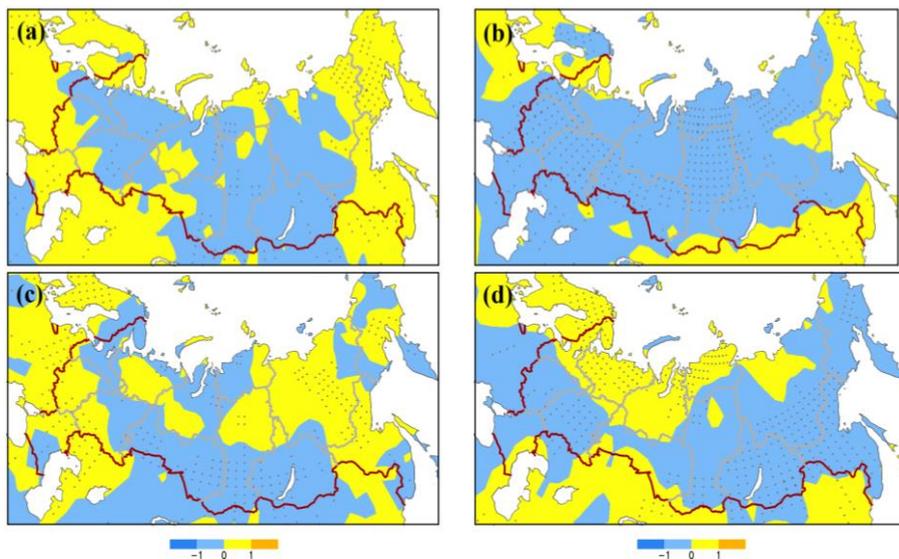


Рис. 16. Изменения модуля скорости в приземном слое (м/с) (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью, рассчитанного на ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5.

Некоторый рост скорости ветра прогнозирует большинство МОЦАО зимой вблизи прибрежной зоны на Дальнем Востоке и

осенью на северо-западе России. Существует большая неопределенность в оценках изменения потенциала ветроэнергетики на территории России по двум причинам — вследствие малых изменений скорости ветра и сравнимых с ними величин межмодельного разброса.

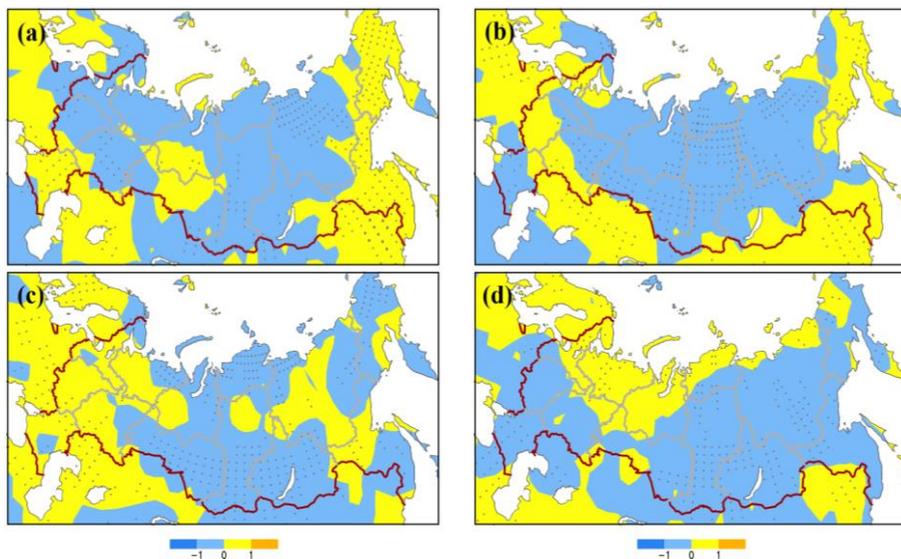


Рис. 17. Изменения модуля скорости в приземном слое (м/с) (а) зимой, (б) весной, (в) летом и (г) осенью, рассчитанного на середину XXI века (2041—2060 гг.) по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5.

## Выводы

Расчеты изменения климата, выполненные по ансамблю 16 моделей СМIP5 при умеренном сценарии радиационного воздействия RCP4.5 показывают, что средняя за год температура приземного воздуха по России повысится на 1—2 °С к 2030 году по отношению к базовому периоду. При этом наибольший рост, до 3 °С, следует ожидать на севере сибирских ФО. Согласно расчету рост температуры

будет превосходить межмодельный разброс во всех ФО в предстоящие 10—20 лет. В последующие годы будет наблюдаться дальнейший рост температуры на всей территории России, и к середине века ее среднее за год значение превысит 2° С (снова по отношению к базовому периоду).

В первой половине XXI века осадки будут возрастать на всей территории России, особенно в холодное время года. Этот рост составит 7 % к 2030 году и примерно 11 % к середине XXI века по отношению к базовому периоду (1991—2010 гг.). Наибольший рост осадков ожидается в Центральной и Восточной Сибири зимой, весной и осенью. Существует несколько бóльшая неопределенность в отношении будущих изменений осадков по сравнению с изменениями температуры воздуха, особенно летом. Эта неопределенность зависит от сезона и региона. Что касается потенциала влияния изменения водных ресурсов на энергетику России, то заслуживает внимания ряд административных регионов, в которых средние за год изменения осадков превышают межмодельный разброс. Все эти регионы располагаются на востоке России.

Расчеты по ансамблю 16 МОЦАО CMIP5 подтвердили и несколько уточнили ранее полученные результаты расчетов стока рек в XXI веке. В первой половине XXI века следует ожидать рост годового стока на 7 % на реках Западной и Восточной Сибири. В то же время на Европейской части России получена большая неопределенность его роста. Расчеты по моделям CMIP5 показали, что в начале XXI века неопределенность изменений стока на многих водосборах велика и только на крупных сибирских речных системах, таких как Лена, Енисей, северные реки и реки Чукотки, изменения годового стока значительно превышают величину межмодельного разброса.

В результате потепления климата ожидается рост потока солнечной энергии у поверхности Земли летом на ЕТР и в Западной Сибири. К середине века этот рост составит 6—8 Вт/м<sup>2</sup> в Южном ФО. Однако из-за большого межмодельного разброса изменений надежность оценок невелика в центральных районах ЕТР. Рост солнечной радиации на ЕТР в другие сезоны незначительный, а

неопределенность оценки велика. В Центральной и Восточной Сибири ожидается уменьшение солнечной радиации вследствие роста облачности во все сезоны.

При потеплении климата изменения модуля скорости ветра в приземном слое атмосферы варьируются в узком диапазоне  $\pm 1$  м/с. Некоторый рост скорости ветра ожидается зимой в прибрежной зоне Дальнего Востока и осенью на северо-западе России. Однако существует большая неопределенность в оценке изменения потенциала ветроэнергетики в этих регионах вследствие небольших изменений скорости ветра и сравнимых с ними величин межмодельного разброса.

#### **4. Обзор текущей ситуации производства и потребления энергии на региональном уровне на основе анализа имеющихся аналитических отчетов и отчетов, посвященных энергетической стратегии**

##### **4.1. Производство электроэнергии**

Энергетический комплекс России включает около 600 электростанций (ЭС). По состоянию на 1 января 2012 г. общая установленная мощность ЭС составляет 218145,8 МВт. Структуры установленной мощности и выработки электроэнергии различными видами ЭС представлены на рис. 18.

Основными видами топлива для тепловых электростанций являются газ и уголь. Наиболее мощные ТЭС расположены в местах добычи топлива. Тепловые электростанции, использующие местные виды топлива (торф, сланцы, низкокалорийные и многозольные угли), находятся у источников топливных ресурсов, а ТЭС, работающие на мазуте, — в центрах нефтеперерабатывающей промышленности. Строительство и функционирование ТЭС (прежде всего ТЭС, использующих уголь, мазут, низкокалорийное топливо) сопряжено со значительным изменением режима регионального загрязнения атмосферы. Этот фактор в условиях климатических изменений может существенно повлиять на жизнедеятельность общества. Поэтому ввод

в строй новых мощностей ТЭС необходимо проводить с привлечением оценок будущих изменений климата.

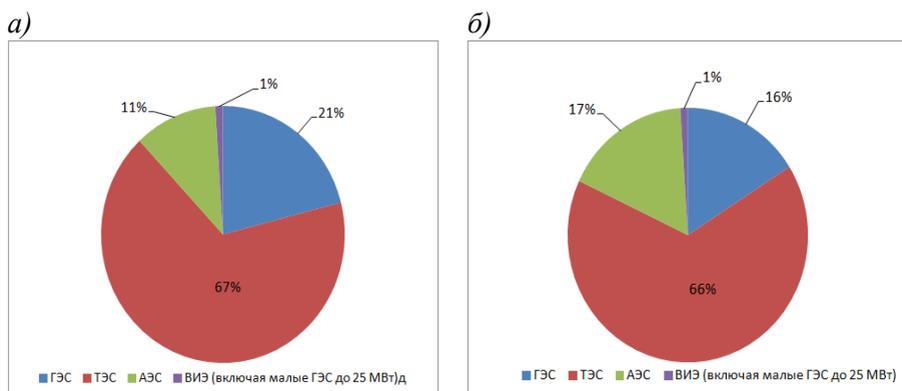


Рис. 18. Структура установленной мощности (а) и структура выработки электроэнергии (б) на 1 января 2012 г.

**Лидирующее положение *теплоэлектростанций* является исторически сложившейся закономерностью развития российской энергетики.**

*Атомная энергетика* России включает 10 АЭС — в общей сложности 32 энергоблока установленной мощностью 23,2 ГВт, которые вырабатывают около 16 % всего производимого электричества. В стадии строительства находятся еще 5 АЭС. В настоящее время наибольшее развитие атомная энергетика получила в центре европейской части России (30 %) и на северо-западе (37 % от общего объема выработки электроэнергии). Производство энергии на АЭС в течение последних лет постоянно возрастает. В 2012 г. концерн «Росэнергоатом» увеличил выработку электроэнергии почти на 2 %, до 176 млрд кВтч. Преимуществом АЭС по сравнению с ТЭС является ее относительная экологическая чистота. Так, например, на ТЭС годовые выбросы вредных веществ (сернистого газа, оксидов азота и углерода, углеводородов, альдегидов и золы) на 1000 МВт

установленной мощности составляют от 13000 тонн на газовых до 165000 на пылеугольных ТЭС. Подобные выбросы на АЭС отсутствуют. Кроме того, при эксплуатации АЭС существует возможность отводить часть тепла на нужды отопления и горячего водоснабжения городов, что снижает непродуктивные тепловые потери. Недостатками АЭС являются риски аварий с исключительно тяжелыми последствиями, а также невозможность функционирования в маневренных режимах для покрытия переменной части графика электрической нагрузки. Сейчас наиболее важной задачей в сфере эксплуатации российских АЭС является повышение коэффициента использования установленной мощности уже работающих станций, а также повышение их безопасности. В условиях изменения климата возрастает важность достоверной оценки климатических рисков для ядерных объектов России, включающих определение их уязвимости для опасных и неблагоприятных явлений погоды.

**Гидроэнергетика России имеет огромный потенциал, который оценивается примерно в 852 млрд кВт·ч в год. Это так называемый экономический потенциал, пригодный для промышленного использования. По его величине Россия занимает 2-е место в мире, уступая только Китаю, но используется этот потенциал только на 19 %.**

В настоящее время на территории России работают 102 гидроэлектростанции мощностью свыше 100 МВт каждая. Общая установленная мощность гидроагрегатов на ГЭС в России составляет примерно 46 ГВт. Запасы гидроэнергоресурсов сосредоточены в основном в Восточной Сибири (35 %) и на Дальнем Востоке (более 30 %). Преимущества ГЭС заключаются в выработке дешевой, возобновляемой энергии, не связанной с вредными выбросами в атмосферу. Кроме того, ГЭС наиболее маневренны при изменении нагрузки, поэтому этот тип энергоустановок имеет важнейшее значение для пиковых режимов работы энергосистем, когда возникает

необходимость в резервных объемах электроэнергии. ГЭС является наиболее климатозависимым из традиционных источников энергии, т. к. выработка энергии на каждой отдельной ГЭС, как будет показано ниже, определяется наполнением водохранилища, зависящим от погодных условий конкретного года. При наблюдающихся изменениях климата учет ожидаемых климатических условий может повысить эффективность эксплуатации ГЭС и обеспечить безопасность их функционирования.

**В настоящее время во всем мире уделяется большое внимание развитию *малой гидроэнергетики*. К малым ГЭС в России условно относят гидроэнергетические агрегаты мощностью от 100 кВт до 25 МВт.**

Малые ГЭС могут быть построены как на малых и средних реках, так и на крупных реках (при низконапорных гидроузлах или при неполном использовании стока). При сравнительно низкой стоимости электроэнергии и коротком инвестиционном цикле МГЭС позволяют обеспечить автономное электроснабжение отдаленных районов, являющихся энергодефицитными и занимающих около 40 % территории страны. В России число малых рек превышает 2,5 млн, а их суммарный сток составляет более 1 тыс. км<sup>3</sup> в год. Экономический потенциал МГЭС и микро ГЭС составляет около 200 ТВт·ч, но используется он пока менее чем на 1—2 %. Ресурсы малой гидроэнергетики по федеральным округам РФ представлены в таблице 9 (Климатические факторы, 2010).

**Теоретический** (валовой) потенциал возобновляемых источников энергии (ВИЭ) зависит от природных условий и является фактически природным потенциалом.

**Технический** потенциал ВИЭ — это суммарная (электрическая и тепловая) энергия, которая может быть получена при современном уровне развития науки и техники и соблюдении экологических норм. Технический потенциал ВИЭ (без учета потенциала больших рек) оценивается в 24 млрд тонн условного топлива (т у.т.)/год, что более

чем в 20 раз превышает ежегодное внутреннее потребление первичных энергоресурсов в стране. В настоящее время доля ВИЭ в общей выработке электроэнергии в стране крайне мала (около 0,9 %). Статистика производства тепла из возобновляемых источников энергии отсутствует, однако, согласно экспертным оценкам, тепло от ВИЭ составляет 4 % общего производства тепла в России.

**Экономический** потенциал ВИЭ — это величина выработки энергии, получение которой экономически оправдано для региона при существующем уровне цен на оборудование и строительство с учетом транспортировки выработанной энергии потребителю и соблюдения экологических норм. Экономический потенциал меняется во времени и должен специально оцениваться в ходе подготовки и реализации конкретных программ и проектов по развитию возобновляемой энергетики. На сегодняшний день он составляет порядка 300 млн т у.т./год (это 30 % от ежегодного потребления первичных энергоресурсов в России).

На рис. 19—21 представлены фоновые оценки валового, технического и экономического потенциалов малой гидроэнергетики по субъектам РФ по данным (Васильев и др., 2008).

Разработанная ОАО «Ленгидропроект» программа развития малой гидроэнергетики предусматривает ввод МГЭС общей мощностью 1750 МВт к 2020 г. Среди факторов, тормозящих развитие малой гидроэнергетики в России, большинство экспертов называют недостаточную информированность потенциальных пользователей о преимуществах малых гидроэнергетических объектов; недостаточную изученность гидрологического режима и объемов стока малых водотоков. Кроме того, для повышения надежности работы МГЭС необходимы также дополнительные исследования их функционирования в условиях глубокого промерзания русла рек, анализ воздействия малых ГЭС на популяции наиболее ценных рыб и т. д. Массовое строительство объектов малой гидроэнергетики возможно лишь в случае серийного производства оборудования, отказа от индивидуального проектирования и качественно нового подхода к надежности и стоимости оборудования, по сравнению со старыми объектами, выведенными из эксплуатации.

Таблица 9

**Оценки ресурсов малой гидроэнергетики в РФ и по федеральным округам (ТВт·ч / млн т у.т.)**

Регион	Категория потенциала		
	теоретический	технический	экономический
<b>Россия</b>	1180,32	371,83	205,09
	401,6	126,5	69,7
<i>в том числе по федеральным округам:</i>			
<b>Центральный</b>	8,41	2,91	1,57
	2,9	1	0,5
<b>Северо-Западный</b>	54,55	15,02	8,89
	18,7	5,1	3
<b>Южный</b>	60,6	18,8	10,3
	20,6	6,4	3,5
<b>Приволжский</b>	35	11,4	6,3
	11,9	3,9	2,1
<b>Уральский</b>	135	42,1	23,13
	45,9	14,3	7,9
<b>Сибирский</b>	435,06	135,8	74,8
	147,9	46,2	25,4
<b>Дальневосточный</b>	451,7	145,8	80,1
	153,7	49,6	27,3

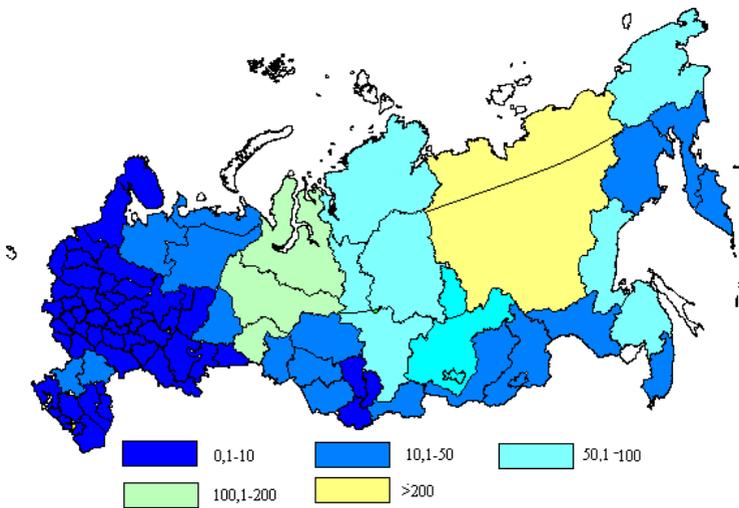


Рис. 19. Валовой потенциал малой гидроэнергетики по субъектам РФ, ТВт·ч.

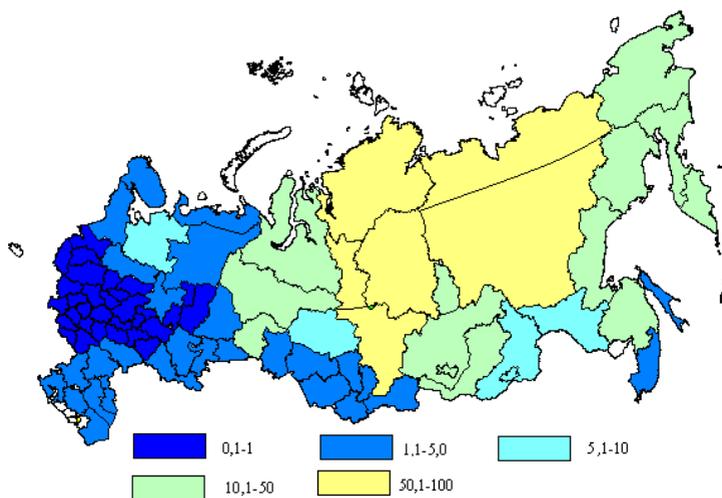


Рис. 20. Технический потенциал малой гидроэнергетики по субъектам РФ, ТВт·ч.

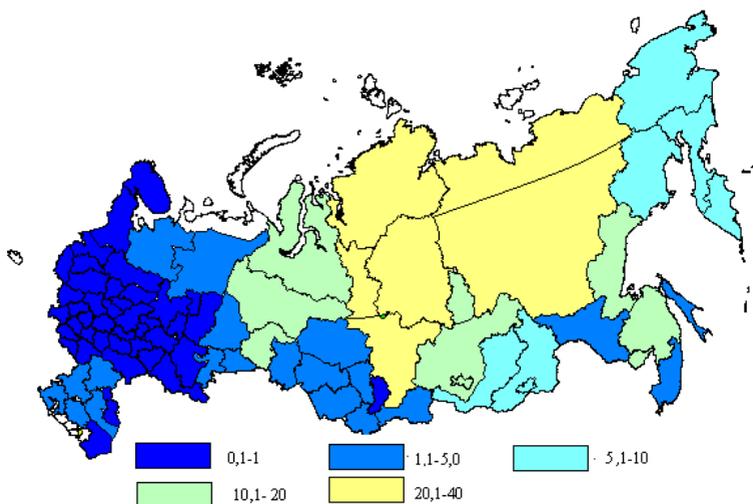


Рис. 21. Экономический потенциал малой гидроэнергетики по субъектам РФ, ТВт·ч.

*Возобновляемые источники энергии.* Как отмечено выше, в настоящее время основными источниками энергоснабжения большинства стран мира, в том числе и России, являются ресурсы ископаемого органического топлива. Доля невозобновляемых источников энергии и атомной энергии в мировом балансе энергопотребления составляет свыше 90 %, а возобновляемых — лишь около 10 %. Такое соотношение в энергопотреблении сложилось исторически под воздействием ряда объективных причин развития энергетики. Среди них важнейшую роль сыграли сравнительно низкие цены на нефть, легкость выделения энергии и другие.

Несмотря на то, что углеводороды остаются преобладающими источниками, их доля на рынке энергии в последние несколько десятилетий начала снижаться. Тенденции к росту имеют природный газ, ядерная энергия и возобновляемые источники энергии (рис. 22).

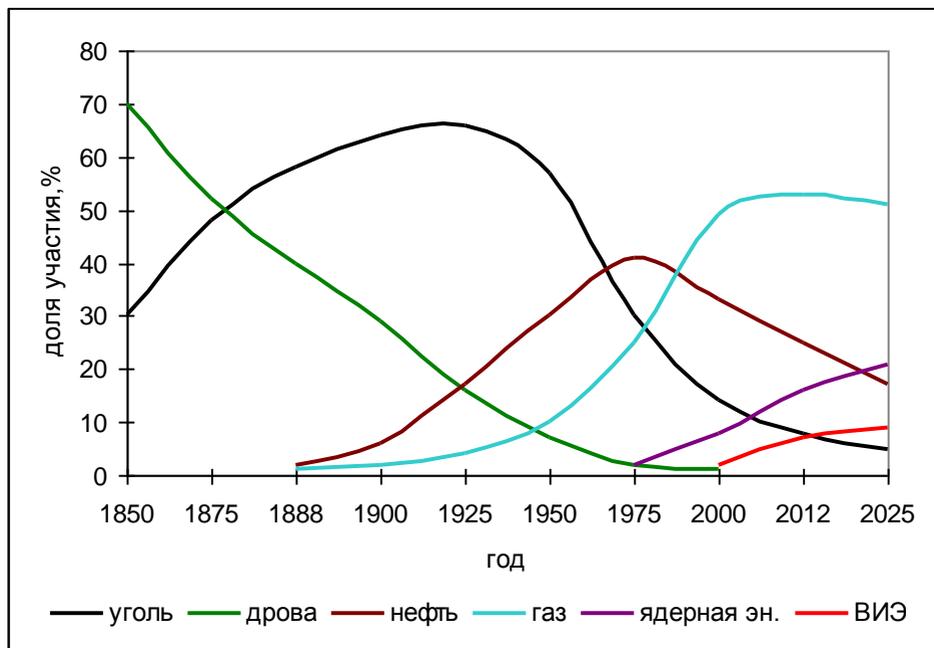


Рис. 22. Участие различных источников энергии в энергопотреблении.

По прогнозу Международного энергетического агентства в период 2000—2020 годов общий прирост мощности составит 1380 ГВт, в том числе за счет природного газа — 210 ГВт, нефтепродуктов — 49 ГВт, ядерной энергии — 30 ГВт, за счет возобновляемых источников энергии — 133 ГВт (гидроэнергия — 124 ГВт, другие виды — 9 ГВт). Таким образом, доля ВИЭ в процентном отношении существенно увеличивается.

Запасы ископаемого топлива ограничены. Даже если будут открыты новые запасы ископаемых ресурсов, на внедрение новых разработок и новых структур энергопотребления, учитывая большую инертность внедрения, требуется много времени. Каждый новый источник энергии требует от 30 до 50 лет для того, чтобы его доля в общем энергобалансе возросла от 1 до 10 % (Бальзаминов и Елистратов, 2008).

**Нарастающий интерес к возобновляемым энергетическим ресурсам связан с неуклонным ростом энергопотребления, а также с ростом выбросов парниковых газов в атмосферу.**

ВИЭ действуют на основе существующих в природе постоянных процессов — вода, солнце, энергия земных недр или периодически возникающих — ветер, волны, приливы, а также благодаря процессам жизненного цикла растительного, животного мира и человека (биомасса).

Потенциал ВИЭ в России огромен (табл. 10), но его использование далеко от желаемого.

По данным Международного энергетического агентства производство электроэнергии в России с использованием ВИЭ (без ГЭС) в 2000 г. составляло 0,3 % от ее общего производства против 4 % за счет нефти, 18 % — гидроэнергии, 16 % — атомной энергии, 20 % — угля и 42 % за счет газа.

К 2003 г. благодаря введению в эксплуатацию Мутновской геотермальной электростанции мощностью 50 МВт, ветроэнергетических установок в Калининградской области (3,6 МВт) и на Чукотке (1,5 МВт), около десятка малых ГЭС, в том числе на Камчатке (2 МВт), в Республике Алтай (0,4 МВт), республике Тыва (0,165 МВт) выработка электрической энергии электростанциями, работающими на ВИЭ, составила 5,4 млрд кВт·ч (Статистический сборник, 2007).

Доля ВИЭ в общем производстве электроэнергии в 2003 году достигла 0,6 %, что вдвое превысило показатель 2000 года. В 2009 г. производство электроэнергии от ВИЭ уже превысило 7 млрд кВт·ч, а их удельный ее в общей выработке достиг 0,7 %. Установленные мощности (Статистический сборник, 2007) электростанций на ВИЭ составили: ветроэнергетических установок — 0,02 ГВт, геотермальных станций - 0,08 ГВт. Для сравнения: доля и мощности ГЭС — 18,7 % и 45,6 ГВт соответственно.

Таблица 10

## Ресурсы возобновляемых источников энергии России (ТВт·ч/год)

Вид источника энергии	Потенциал		
	теоретический	технический	экономический
Вода (малая гидроэнергетика)	2930	1017	529
Недра Земли (геотермальная энергетика)	180	20	936
Солнце (гелиоэнергетика)	18700000	18720	102
Ветер (ветроэнергетика)	212000	16280	81
Биомасса	81400	431	285
<b>Итого по ВИЭ</b>	<b>18996510</b>	<b>36468</b>	<b>1933</b>

Примечание: Данные заимствованы из работы (Бальзаминов, Елистратов, 2008).

Предполагаемый рост ввода ВИЭ в России до 2020 г., согласно Энергетической стратегии РФ, представлен в таблице 11.

Таблица 11

## Предполагаемый рост ввода ВИЭ в России до 2020 г., согласно Энергетической стратегии РФ (Энергетическая стратегия, 2009)

	2005	2010	2015	2020
Доля ВИЭ с крупными ГЭС, %	19,9	15,6	15,5	20,6
Доля ВИЭ без крупных ГЭС, %	0,88	1,50	2,47	4,51

Структура выработки энергии на базе возобновляемых источников энергии в России и ее себестоимость значительно отличается от общемировой (рис. 23).

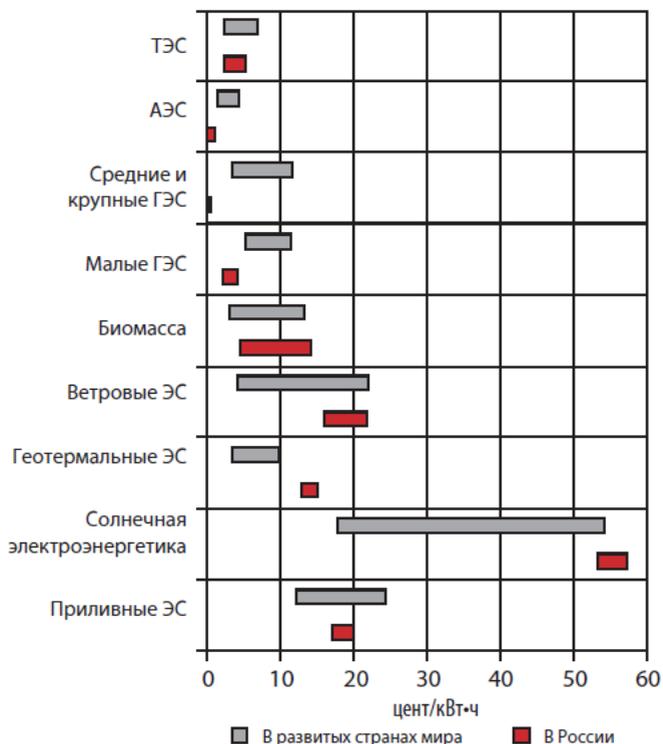


Рис. 23. Себестоимость производства электроэнергии в развитых странах мира и в России (2007 г.).

Источники: МЭА, ЗАО «АПБЭ», ОАО «РусГидро».

В России наиболее активно используются ресурсы тепловых электростанций на биомассе, а также потенциал малой гидроэнергетики. При этом крайне мало используются ресурсы ветровой и солнечной энергетики.

**Мировой опыт показывает, что первоначальный толчок к развитию возобновляемой энергетики, особенно в странах, богатых традиционными источниками, должен быть дан государством. В России же серьезной поддержки этому сектору пока не оказывается.**

Доля электростанций различных типов в выработке энергии испытывает значительные *межгодовые колебания* в зависимости от климатических и гидрологических условий (табл. 12).

Таблица 12

**Доля выработки электроэнергии российскими ТЭС, АЭС и ГЭС в общем объеме, % (Электроэнергетика, 2012)**

Год	ТЭС	ГЭС	АЭС
<b>2005</b>	66,0	18,3	15,7
<b>2006</b>	66,6	17,6	15,8
<b>2007</b>	66,6	17,6	15,8
<b>2008</b>	68,3	16,0	15,7
<b>2009</b>	65,7	17,8	16,5
<b>2010</b>	67,3	16,2	16,5
<b>2011</b>	67,8	15,7	16,5

Уменьшение доли ГЭС в выработке энергии в 2008, 2010 и 2011 годах объясняется неблагоприятной гидрологической ситуацией (неполное заполнение водохранилищ ГЭС из-за малого количества осадков) на значительной территории страны. Для восполнения недостающей электроэнергии было увеличено производство энергии на ТЭС. Поэтому объем производства электроэнергии на ТЭС в 2011 году достиг рекордного значения 713 млрд кВт·ч. Доля выработки электроэнергии на АЭС оставалась стабильной в течение трех последних лет в связи со сложностью маневрирования режимом работы этого типа электростанций.

*Особенности производства электроэнергии в РФ на региональном уровне.* Более 90 % производственного потенциала электроэнергетики России объединено в Единую энергетическую систему (ЕЭС), которая охватывает всю населенную территорию страны и является одной из крупнейших в мире централизованно управляемых энергосистем. Для изолированных энергосистем характерны ограничения системных связей с другими территориями, из которых возможны межрегиональные перетоки электроэнергии. На конец 2011 года в составе ЕЭС России работали семь Объединенных энергосистем (ОЭС): ОЭС Центра, Средней Волги, Урала, Северо-Запада, Юга,

Сибири и Востока. Структура установленной мощности электростанций ЕЭС РФ представлена в таблице 13, а производство энергии по ОЭС России в 2011 гг. — в таблице 14.

Таблица 13

**Структура установленной мощности ОЭС России  
на 1 января 2012 года (Анализ итогов, 2012)**

Энергообъединения	Всего, МВт	ТЭС		ГЭС		АЭС	
		МВт	%	МВт	%	МВт	%
<b>ЕЭС России</b>	218 146	149 284	68	44 596	20	24 266	11
<b>ОЭС Центра</b>	50 323	36 650	73	1 839	4	11 834	24
<b>ОЭС Средней Волги</b>	25 818	14 9450	58	6 796	26	4 072	16
<b>ОЭС Урала</b>	45 631	43 197	95	1 834	4	600	1
<b>ОЭС Северо-Запада</b>	22 467	13 772	61	2 935	13	5 760	26
<b>ОЭС Юга</b>	17 773	10 189	57	5 584	31	2 000	11
<b>ОЭС Сибири</b>	46 925	24 656	53	22 270	48	-	-
<b>ОЭС Востока</b>	9 210	5 870	64	3 340	36	-	-

Из табл. 13 видно, что наибольшее количество энергии производится в Центральной России, на Урале и в Сибири. В 2011 году практически во всех ОЭС (кроме Сибири) произошло увеличение производства электроэнергии по сравнению с 2010 годом. Снижение производства в Сибири на 1,6 % было обусловлено тем, что 2011 год здесь был почти на 2 градуса теплее, чем 2010 год, тогда как в целом по ЕЭС России превышение температуры составило 0,2 градуса.

В первую очередь непосредственному воздействию климатических факторов подвержено функционирование ГЭС. Обобщения, сделанные в IPCC (2007), показывают, что при снижении притока воды к водохранилищу следует ожидать отрицательного влияния на производство гидроэлектроэнергии, а при увеличении притока, если он правильно регулируется во времени, — положительного. Кроме того, внутригодовое перераспределение притока воды с увеличением

доли зимнего притока может увеличить гидроэнергетический потенциал в большей степени зимой, т. е. в тот период, когда потребление энергии максимально.

Таблица 14

Производство энергии по ОЭС России (Анализ итогов, 2012)

Энерго- объединения	Всего	ТЭС		ГЭС		АЭС	
		Млрд кВт·ч	%	Млрд кВт·ч	%	Млрд кВт·ч	%
ЕЭС России	1040	703	68	164	16	173	17
ОЭС Центра	239	154	64	4	2	81	34
ОЭС Средней Волги	110	58	53	20	18	33	30
ОЭС Урала	256	247	96	5	2	4	2
ОЭС Северо- Запада	106	55	52	12	11	39	37
ОЭС Юга	79	45	57	18	23	16	20
ОЭС Сибири	207	115	56	92	44	-	-
ОЭС Востока	43	29	67	14	33	-	-

**Климатические условия во многом определяют как технико-экономические показатели, так и особенности функционирования всех типов электростанций; поэтому изменение климата вызовет необходимость корректировки проектирования и эксплуатации объектов электроэнергетики.**

**Климатические условия в значительной мере определяют экологические последствия деятельности электростанций.**

**Косвенное влияние изменений климата на гидроэнергетику выражается в необходимости введения корректив в нормативные климатические показатели при проектировании и строительстве ГЭС, что может вызвать удорожание строительства.**

Гидроэнергетические проекты обычно разрабатываются с некоторым запасом на экстремально высокие значения притока воды для обеспечения сохранности плотин. Предполагаемые изменения климата могут изменить режим притока за пределы этого допустимого запаса, т. к. согласно модельным прогнозам экстремальность климата в целом, включая повторяемость и интенсивность опасных гидрологических явлений, может возрастать под влиянием глобального потепления. Возможное усиление экстремальности гидрологического режима в регионах в настоящее время еще не нашло отражения в соответствующих нормативных документах, регламентирующих строительство и эксплуатацию гидроэнергетических объектов.

**Электростанции, работающие на возобновляемых источниках энергии, таких как солнце, ветер, энергия геотермальных источников и биомассы, находятся под непосредственным воздействием изменений климата.**

Солнечные термоэлектрические станции и многие геотермальные системы, так же как ГЭС, нуждаются в охлаждении и зависят от наличия водных ресурсов, их качества и температуры. Зависимость энергоустановок, работающих на биомассе, от изменений климата аналогична чувствительности к колебаниям климата сельского и лесного хозяйств. Однако биоустановки могут быстрее адаптироваться к возможным изменениям климата, т. к. обычно имеют более диверсифицированные источники топлива.

Влияние климатических изменений на функционирование АЭС и ТЭС носит в основном опосредованный характер и заключается, прежде всего, в учете ожидаемого изменения температурного, влажностного и ветрового режимов данного района на этапе проектирования и строительства электростанций, что обеспечивает надежность и долговечность сооружения. При этом особенно важно принимать во внимание возможное изменение повторяемости высоких температур воздуха, вызывающих перегрев энергоблоков, и штилей, способствующих загрязнению воздуха. Кроме того, необходим мониторинг опасных явлений погоды (смерчей, пыльных бурь и т. д.) для выявления изменения их повторяемости (Руководство, 2008). Однако в целом выработка энергии на АЭС и ТЭС в меньшей степени подвержена прямому воздействию изменения климата, чем выработка энергии на ГЭС. В настоящем докладе основной упор в оценках делается на наиболее климатозависимых механизмах выработки энергии, которыми являются, прежде всего, различные виды возобновляемых энергетических источников.

#### **4.2. Потребление электроэнергии**

Потребление электроэнергии в России, как и ее производство, в 2011 г. достигло рекордного уровня 1021,1 млрд кВт·ч. Около 70 % в структуре потребления электроэнергии занимают промышленные потребители, более 20 % — бытовой сектор.

**Воздействие климата на потребление электроэнергии выражается, прежде всего, в том, что именно климатические условия в большой степени определяют потребность в энергии.**

Следовательно, изменения климата могут существенно повлиять на энергопотребление во многих регионах России. Кроме того, специфика энергетики заключается в том, что продукцию этой отрасли практически невозможно накапливать и сохранять, поэтому

потребности в энергии должны быть спрогнозированы и учтены заранее.

Степень зависимости потребления энергии от температурных условий на территории России в конкретном году может быть проиллюстрирована схемами на рис. 24 и 25.

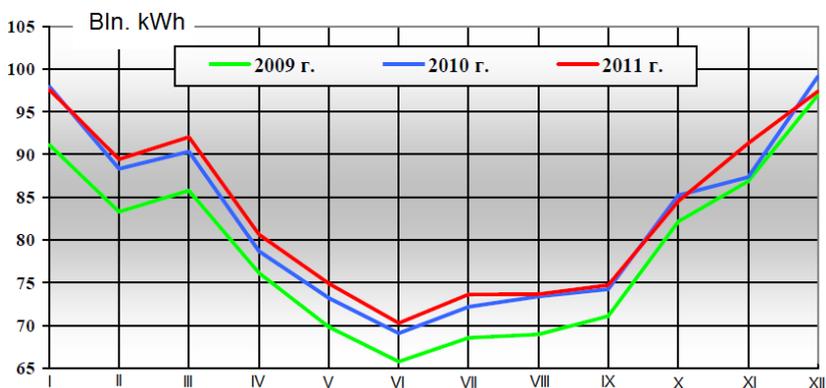


Рис. 24. Динамика потребления электроэнергии (млн кВт·ч) в ЕЭС России по месяцам 2011 года в сравнении с 2010 и 2009 годами (Отчет, 2012).

Так, например, в октябре 2011 года температура наружного воздуха в среднем по России превышала среднее многолетнее значение на 3,5 °С и на 1,7 °С среднемесячную температуру аналогичного периода прошлого года. В связи с этим в октябре 2011 года электропотребление в целом по ЕЭС России снизилось на 0,8 %. По сравнению с теплым ноябрем 2010 года (отклонение среднемесячной температуры по ЕЭС России от нормы составило +5,4 °С) прирост электропотребления в 2011 году составил 4,5 %. В декабре 2010 года среднемесячная температура по ЕЭС России соответствовала норме -11,9 °С, в декабре 2011 года наблюдалось значительное повышение температуры, так среднемесячная температура по ЕЭС России на 5,4 °С превысила температурную норму. Снижение объема электропотребления в декабре 2011 года по ЕЭС России в сравнении с аналогичным периодом 2010 года составило 1,8 % (рис. 25).

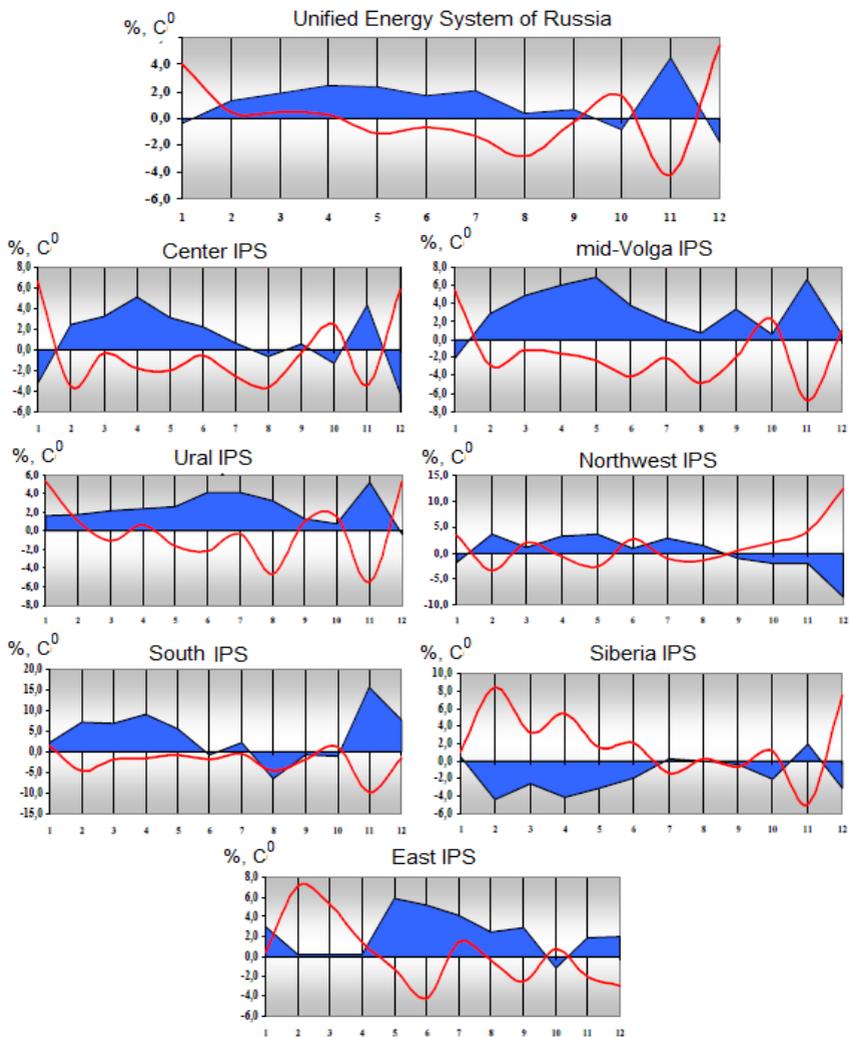


Рис. 25. Динамика изменения относительной величины потребления электроэнергии и отклонения фактической температуры наружного воздуха по месяцам 2011 года (Отчет, 2012).

Красным цветом обозначены отклонения среднемесячной температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) от 2010 г., синим — относительная величина изменения месячного потребления электроэнергии, в процентах от 2010 г.

Важным аспектом влияния изменений климата на энергетику является сокращение потребностей в тепловой энергии, особенно в зимний период. Для России это имеет особое значение, т. к. большая часть ее территории расположена в зонах с суровым климатом, где электро- и теплоснабжение осуществляется преимущественно за счет привозного органического топлива. При повышении глобальной температуры воздуха к 2020 году на 2 °С уменьшение потребностей в органическом топливе для производства тепловой энергии в России составит приблизительно 2,8 % от суммарных затрат этого вида топлива в электро- и теплоэнергетике (Малик, 2005). Изменение потребностей в теплоснабжении (самой энергоемкой отрасли экономики — до 40 % общего энергопотребления) ставит задачу обязательного учета этого обстоятельства в планах развития топливно-энергетического комплекса. Принимая во внимание вероятное повышение летних температур (прежде всего в Южном федеральном округе) необходимо учитывать и возможный рост затрат электроэнергии на кондиционирование как жилых, так и производственных помещений.

Таким образом, одной из важнейших задач становится оценка ожидаемой продолжительности и температуры отопительного периода, а также таких климатических показателей, как дефицит тепла и дефицит холода в регионах России.

### **4.3. Энергетический баланс**

В итоге работа российской электроэнергетики в 2011 г. характеризуется следующими основными показателями (табл. 15).

Электропотребление в 2011 г. увеличилось по сравнению с 2010 г. в основном из-за повышенного спроса на электроэнергию, которое было вызвано постепенным восстановлением объемов промышленного производства, сниженных в кризисные 2008—2009 гг. Рост потребности в электроэнергии и резкое увеличение объемов экспорта электроэнергии привели к увеличению объемов производства электроэнергии. Гидроэлектростанции из-за неблагоприятных гидрологических условий на большей части территории страны (недостаточное наполнение водохранилищ из-за

малого количества осадков) снизили объемы производства электроэнергии. Основное увеличение выработки электроэнергии обеспечили тепловые и атомные электростанции.

Таблица 15

**Энергетический баланс России в 2011 г. (Анализ итогов, 2012)**

<b>Статья баланса</b>	<b>Количество электроэнергии, млрд кВт·ч</b>
<b>Потребление электроэнергии</b>	1021,1
<b>Производство электроэнергии:</b>	
<b>всего,</b>	1040,4
<b>в т. ч.</b>	
<b>ТЭС</b>	703,2
<b>ГЭС</b>	164,2
<b>АЭС</b>	173,0
<b>Экспорт (сальдо)</b>	19,3

**4.4. Стратегия развития производства и потребления энергии (ЭС-2030)**

В рамках ЭС-2030 создана модель поэтапного перспективного развития энергетического сектора с учетом объективно существующих рисков. Намечены следующие этапы развития: I этап — 2009—2015 гг., II этап — 2015—2022 гг., III этап — 2022—2030 гг. Основные цели I этапа: преодоление кризиса, выход на потерянные темпы модернизации ТЭК, освоение 12 % инвестиций на энергоснабжение; цели II этапа: начало модернизации экономики, освоение 23 % инвестиций на энергосбережение; цели III этапа: освоение 65 % инвестиций на энергосбережение, освоение 70 % инвестиций в ВИЭ (Основные положения, 2008).

**Климатическая составляющая в ЭС-2030, кроме указания на развитие ВИЭ, практически отсутствует.**

Однако меры в области смягчения климатических воздействий и адаптации к ним могут способствовать достижению целей ЭС-2030.

Условием обеспечения энергетической безопасности полагается рост душевого потребления энергии на 45—85 % к уровню 2005 г., снижение износа производственных фондов и ликвидация дефицита электро- и теплогенерирующих мощностей.

**В настоящее время, несмотря на значительный запас энергетических ресурсов и реформирование базовых отраслей энергетики, при недостаточном уровне инновационных процессов вследствие изменений климата могут возникнуть угрозы энергетической безопасности на национальном уровне.**

Так, например, в северных районах РФ происходит таяние вечной мерзлоты, создавая риски для любых линейных сооружений (транспортные магистрали, здания и др.). Совершенствование прогноза опасных явлений, разработка надежного метода их раннего предупреждения и другие методы адаптации могут ослабить влияние изменений и изменчивости климата на энергетическую отрасль.

Стратегической целью государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности экономики является максимально рациональное использование энергетических ресурсов на основе обеспечения заинтересованности производителей и потребителей энергии в энергосбережении, а также инвестирования в эту сферу. Для реализации этой цели намечено не менее чем двукратное снижение энергоемкости ВВП, ежегодное снижение удельных потерь и расходов на нужды предприятий ТЭК, 10 %-ое снижение расходов топлива на производство тепла котельными. Ежегодный объем экономии энергоресурсов по сравнению с современным уровнем должен быть доведен до 300 млн т у.т./год и более.

В настоящее время в связи с изменением климата и принятием адаптационных мер в строительной индустрии достигнута экономия

энергии выше 10 %. Такая экономия объясняется тем, что обновленные параметры температуры воздуха, рассчитанные за период до 2010 г., выявили сокращение продолжительности и повышение температуры отопительного периода во многих регионах России. Адаптационные меры состояли в актуализации нормативных документов по строительной климатологии и их гармонизации с Еврокодами. Преобразования климатической информации для обеспечения отопления и кондиционирования позволят получить экономию энергии на 50—100 % (Савин, 2011).

На рис. 26 показаны структура и потребление первичных ресурсов и стратегическое развитие топливной и нетопливной энергетики до 2030 г.

Структура производства и потребления природных ресурсов в соответствии с принятой стратегией существенно изменится: в производстве вырастет доля газа и уменьшится доля жидких ресурсов (нефть и конденсат); в потреблении, напротив, уменьшится доля газа и возрастет доля нефти. В обоих случаях увеличится доля угля, что может привести к увеличению нагрузки на окружающую среду. В этой ситуации учет климатических факторов приобретает дополнительное значение.

Базовыми задачами в сфере экологической безопасности является двукратное снижение удельной нагрузки ТЭК на окружающую среду (выбросов в атмосферу, сброса сточных вод в водоемы и т. п.). Выбросы парниковых газов к 2030 г. планируется привести примерно к уровню 1990-го года.

Для ограничения нагрузки на окружающую среду важной инициативой ЭС-2030 является развитие нетопливной энергетики (атомной, возобновляемой, включая гидроэнергетику). Производство электроэнергии на базе возобновляемых источников энергии и гидроаккумулирующих электростанций к 2030 г. должно составить около 319—422 млрд кВт·ч (18—19 % от общего объема).

Таким образом, успешная реализация ЭС-2030 как в области производства, так и в области потребления энергии невозможна без привлечения современной климатической информации и детального учета наблюдаемых и ожидаемых климатических изменений.

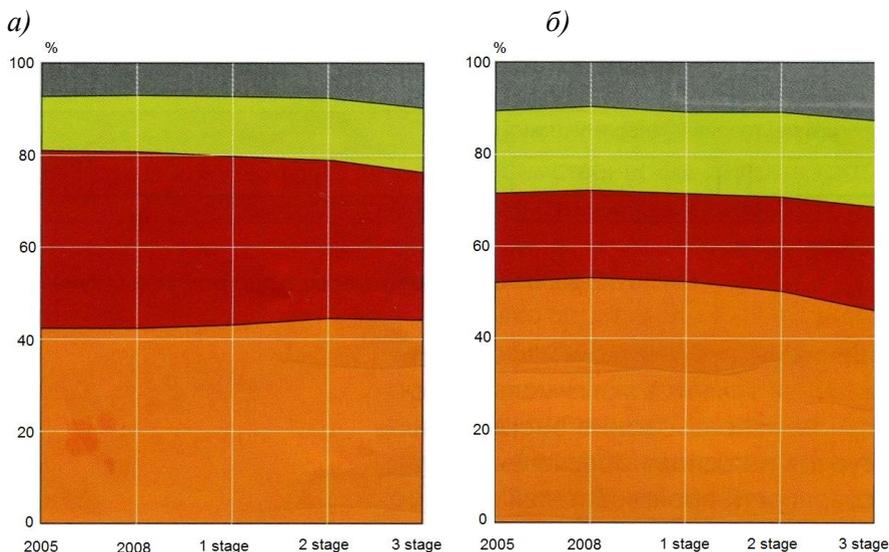
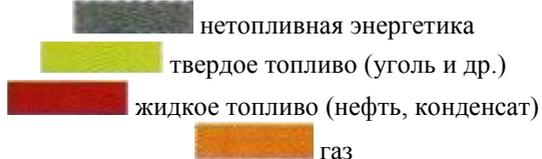


Рис. 26. Структура производства и потребления первичных энергоресурсов:

(а) производство; (б) потребление. Обозначения:



## 5. Воздействие климата на обогрев и охлаждение зданий и соответствующие сезонные изменения энергопотребления

Изменение уровня потребления энергии для создания оптимальных условий внутри зданий различного назначения обоснованно считается одним из значимых проявлений изменений климата, весьма существенным для территории России.

**Россия в целом является очень холодной страной, где температура воздуха — в среднем за год и по территории — является отрицательной ( $-4,1$  °С). Поэтому в контексте изменений климата первоочередное значение имеет потенциальное изменение величины энергозатрат на отопление помещений.**

В Первом Оценочном докладе (2008) даны некоторые оценки, свидетельствующие о тенденции сокращения продолжительности отопительного периода<sup>1</sup> и уменьшения индекса потребления энергии на обогрев зданий (дефицита тепла), которая стала проявляться во второй половине XX в. на территории России. В Докладе приведены также ожидаемые к середине XXI в. оценки изменения этих двух характеристик, которые получены по результатам применения небольшого числа глобальных климатических моделей, разработанных в 90-х годах XX в.

**Особенности изменений климата на территории России в начале XXI в. отчетливо продемонстрировали актуальность более широкой постановки задачи об анализе климатически обусловленных изменений энергопотребления — как наблюдаемых, так и ожидаемых на протяжении XXI в.**

Такой анализ должен учитывать перспективу изменения энергопотребления зданий не только в зимнее время, но и в летний

---

<sup>1</sup> Началом отопительного периода считается дата устойчивого опускания средней суточной температуры воздуха ниже уровня  $+8$  °С осенью, а окончанием периода — дата устойчивого увеличения температуры выше этого уровня 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 5 последующих суток.

сезон, когда возникает потребность в охлаждении помещений. При этом необходимо опираться на современные возможности физико-математического моделирования климата (см. раздел 1) и сценарии антропогенного воздействия, рекомендованные для использования при подготовке 5-го Оценочного Доклада МГЭИК.

Реализация поставленной задачи включала в себя оценку наблюдаемых и ожидаемых изменений энергопотребления с привлечением данных наблюдений за последние годы и использованием современных глобальных климатических моделей, а также региональный анализ ожидаемых изменений энергопотребления с учетом численности населения. Полученные количественные оценки дают достаточно полное представление о влиянии климатических факторов на изменение структуры энергопотребления в различных регионах России в первой половине XXI в.

### **5.1. Климатические воздействия на энергопотребление зданий и их изменения в конце XX — начале XXI столетий**

Для получения современных оценок наблюдаемых климатически обусловленных сезонных изменений энергопотребления зданий были привлечены ряды данных наблюдений за средней суточной температурой воздуха для 530 метеорологических станций. Как видно из рис. 27а, продолжительность отопительного периода очень неодинакова в различных регионах России, приближаясь к 360 дням на прибрежных территориях арктических морей. Сравнительный анализ значений средней продолжительности отопительного периода для двух 20-летних интервалов (1971—1990 гг. и 1991—2010 гг.) отчетливо демонстрирует отрицательную тенденцию в изменении этой величины с характерной скоростью уменьшения 3—4 дня/10 лет (рис. 27б).

Отметим, что на объемах потребляемой энергии сказывается не только сокращение продолжительности, но и изменение средней температуры отопительного периода. Сравнение полей этой величины для 1971—1990 гг. и 1991—2010 гг. (рис. 28) показывает, что практически на всей территории России произошло повышение средней температуры отопительного периода (за исключением

небольших по площади областей со статистически незначимыми отклонениями от нулевых значений).

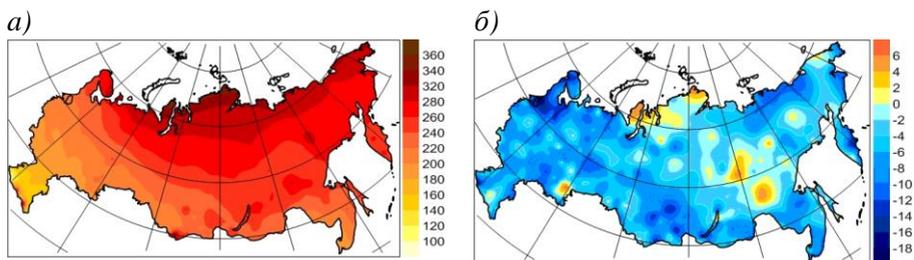


Рис. 27. Средняя продолжительность отопительного периода (дни) за 1991—2010 гг. (а) и ее изменение по отношению к 1971—1990 гг. (б).

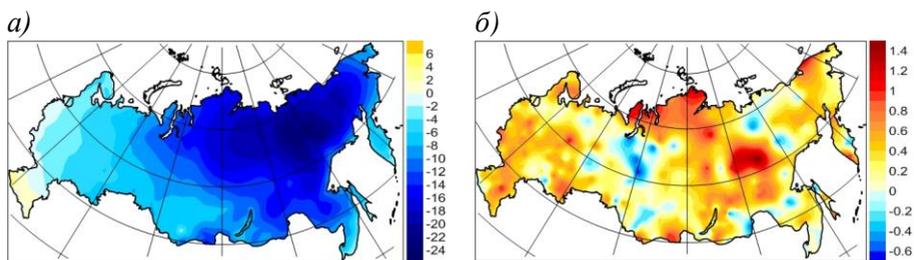


Рис. 28. Средняя температура отопительного периода (°C) за 1991—2010 гг. (а) и ее изменение по отношению к 1971—1990 гг. (б).

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, является довольно широко обсуждаемым (Day et al., 2003; Krese et al., 2012). В Великобритании при расчете величины HDD в качестве базовой температуры используется величина  $+15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при расчете CDD — значение  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Isaac, van Vuuren, 2009).

Широко используется в качестве базовой температуры значение  $18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рассматриваемое как порог комфортности. В России основное внимание уделяется оценке дефицита тепла, рассчитываемого с использованием базовой температуры  $18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  для отопительного периода. Соответствующая величина — «градусо-сутки отопительного периода» (HDD) — может быть определена по данным о продолжительности и средней температуре отопительного периода. Эта величина является в России нормативным параметром и используется в расчетах теплового режима зданий.

Анализ данных наблюдений отчетливо показал тенденцию к уменьшению изменения дефицита тепла, проявляющуюся 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  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сутки}$  (см. рис. 29).

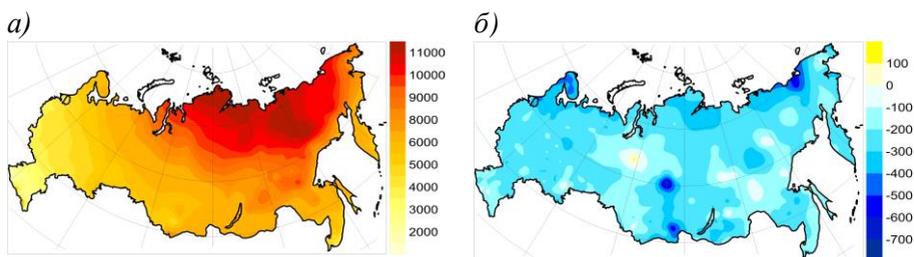


Рис. 29. Среднее значение дефицита тепла (градусо-сутки) за 1991—2010 гг. (а) и его изменение по отношению к 1971—1990 гг. (б).

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. В настоящее время, в силу особенностей климата России, эта характеристика не относится к нормативным параметрам, однако в контексте происходящих и ожидаемых изменений ее анализ заслуживает самого пристального внимания. Практически на всей территории, расположенной южнее  $60^{\circ}$  с. ш., среднее значение дефицита холода за 1991—2010 гг. превысило соответствующее значение за 1971—1990 гг. (рис. 30).

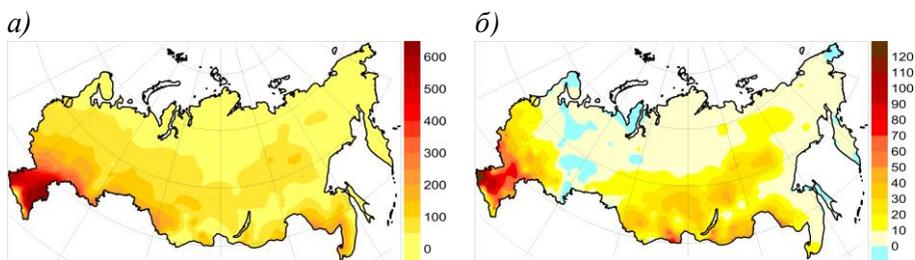


Рис. 30. Среднее значение дефицита холода (градусо-сутки) за 1991—2010 гг. (а) и его изменение по отношению к 1971—1990 гг. (б).

Особенно заметным оказался рост дефицита холода на юге Европейской части России. При этом важно подчеркнуть, что отмечаемый рост не связан с единичной крупной аномалией, а является отражением тенденции, наблюдаемой в течение двух десятилетий (рис. 31).

## 5.2. Изменение климатического воздействия на энергопотребление зданий к середине XXI столетия: оценки по ансамблю моделей СМIP5

Для обеспечения учета климатически обусловленных изменений энергопотребления зданий при разработке стратегических планов развития энергетики были выполнены модельные расчеты значений

дефицита тепла (HDD) и дефицита холода (CDD) для двух временных интервалов: 2021—2040 гг. и 2041—2060 гг.

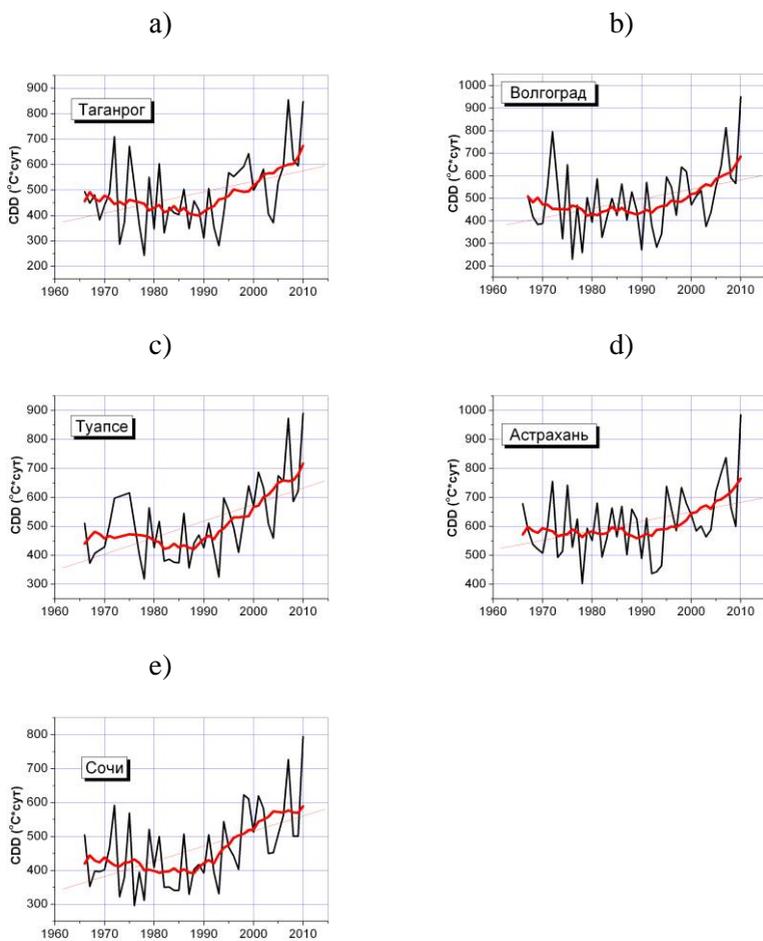


Рис. 31. Тенденция изменения дефицита холода на станциях Южного региона.

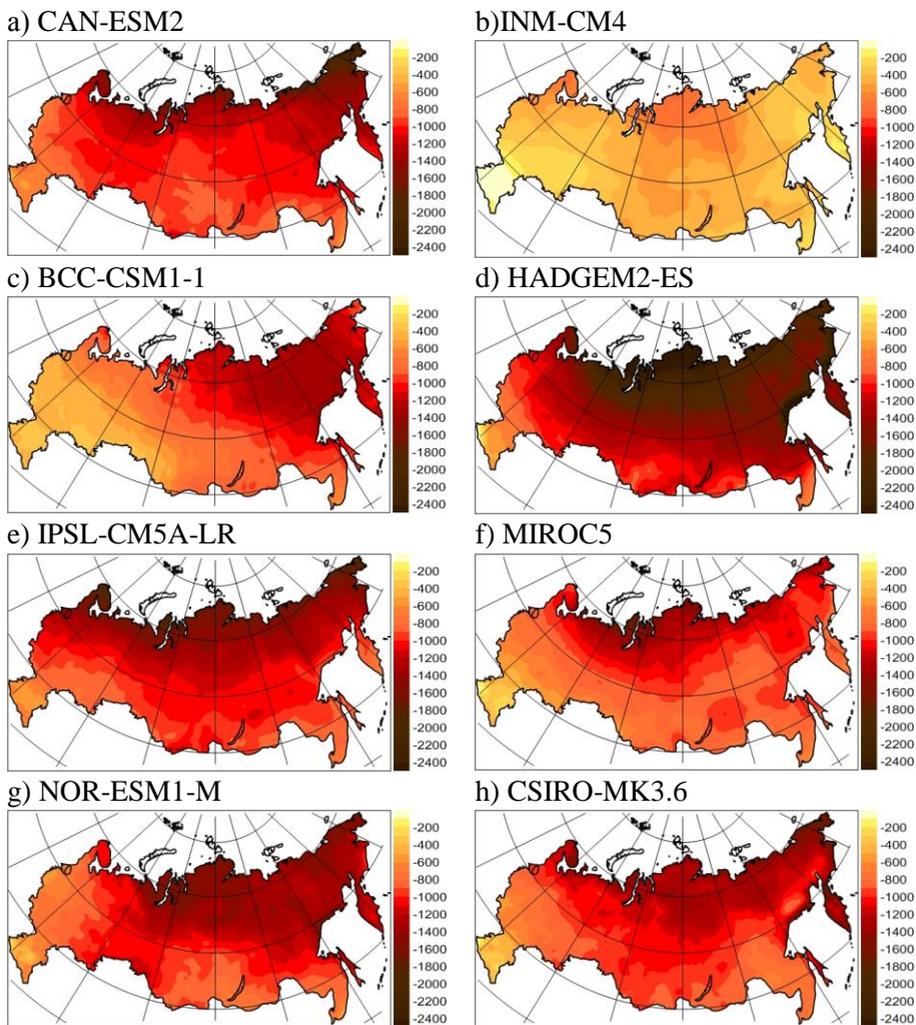


Рис. 32. Оценки изменений дефицита тепла (градусо-сутки) в 2041—2060 гг. по отношению к 1991—2010 гг., рассчитанные по модельным результатам CMIP5 суточного разрешения:

- a) CAN-ESM2, b) INM-CM4, c) BCC-CSM1-1, d) HADGEM2-ES, e) IPSL-CM5A-LR, f) MIROC5, g) NOR-ESM1-M, h) CSIRO-MK3.6.

Обозначения — см. (Taylor et al., 2011).

**Перспективные оценки изменений дефицита тепла и дефицита холода на территории России базируются на современных климатических моделях (см. раздел 1) и отвечают сценариям антропогенного воздействия, рекомендованным для использования при подготовке 5-го Оценочного Доклада МГЭИК.**

На рис. 32 представлены оценки изменений дефицита тепла, ожидаемых к середине XXI в. по отношению к периоду 1991—2010 гг. Эти оценки основаны на использовании результатов численных экспериментов с суточным разрешением по сценарию RCP4.5 для восьми климатических моделей CMIP5 (Taylor et al., 2011). На период выполнения проекта данные суточного разрешения были доступны только для указанного числа моделей.

Как можно видеть, наиболее слабую чувствительность проявляет модель INM-CM4, а наиболее сильную — модель HADGEM2-ES. Однако исключение этих двух моделей из совокупности практически не отражается на средних оценках изменений.

Осредненные по совокупности моделей значения ожидаемых к середине XXI в. изменений индексов потребления энергии за отопительный период (рис. 33) варьируют по территории России весьма значительно, но знак изменений рассматриваемых характеристик по территории не меняется.

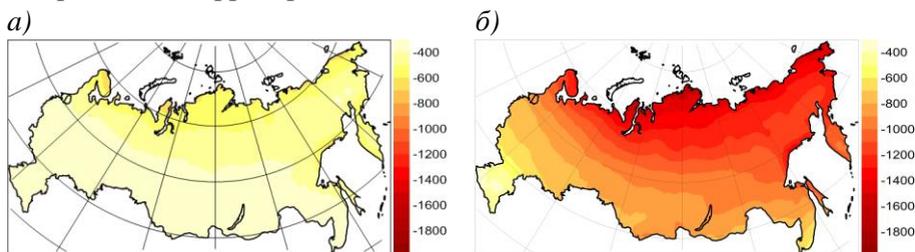


Рис. 33. Изменения индекса теплопотребления за отопительный период (HDD, °C·сут), рассчитанные по модельным данным CMIP5 суточного разрешения, в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) (а) и в середине XXI века (2041—2060 гг.) (б).

Заметное увеличение индексов дефицита холода (рис. 34) обнаруживается к середине столетия почти всеми моделями на юге Европейской части России и Западной Сибири, а также на юге Приморья (модель INM-CM4 диагностирует слабое увеличение, сопоставимое со средним квадратическим отклонением только на Кавказе).

Осредненные по моделям оценки выявляют значимые изменения дефицита холода (по отношению к базовому периоду 1991—2010 гг.) и на интервале 2021—2040 гг. Важно отметить, что модельные различия двадцатилетних средних (ср. рис. 35а и 35б) сопоставимы по величине с наблюдаемыми в конце XX столетия.

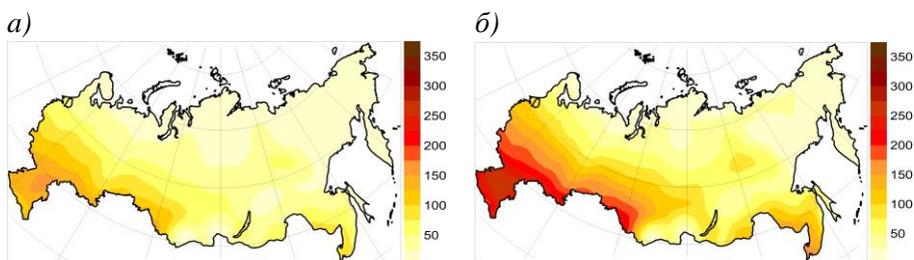


Рис. 35. Изменения индекса энергопотребления в теплый сезон (CDD, °C·сут), рассчитанные по модельным данным CMIP5 суточного разрешения, в ближайшие десятилетия (2021—2040 гг.) (а) и в середине XXI века (2041—2060 гг.) (б)

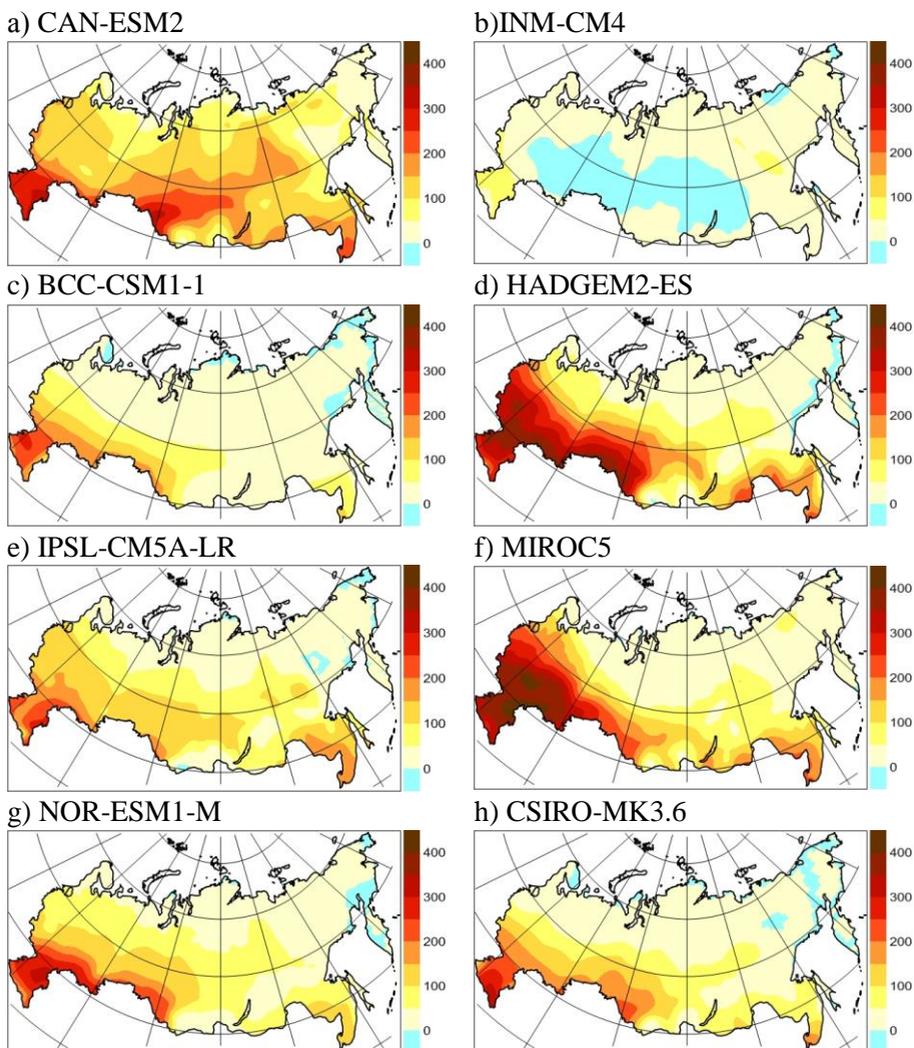


Рис. 34. Оценки изменений дефицита холода в 2041—2060 гг. по отношению к 1991—2010 гг., рассчитанные по модельным данным CMIP5 суточного разрешения.

Пояснения — см. рис. 32.

### 5.3. Региональные особенности ожидаемых сезонных изменений энергетических потребностей

**Население распределено по территории России крайне неравномерно, и наибольшее сокращение дефицита тепла ожидается именно в малонаселенных районах с суровыми климатическими условиями, где характерное значение дефицита тепла в течение отопительного периода приближается к величине  $10000^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$ . При этом осредненное по территории России — с учетом плотности населения — значение дефицита тепла для конца XX в. составляет менее  $5000^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$  (см., например, (Isaac, van Vuuren, 2009)).**

Представляют интерес взвешенные по численности населения оценки изменения индексов потребления энергии (т. е. размер изменения рассматриваемого индекса HDD, приходящегося на одного человека). Относительные изменения величины теплотребления для крупных регионов России (таблица 16) показывают, что в наибольшей степени эффект зимнего потепления отразится на совокупном теплотреблении в Северо-Западном регионе — в среднем на 20 % по сравнению с современным уровнем.

В отличие от индекса HDD, относительные оценки изменений индекса CDD являются малоинформативными, поскольку в настоящее время обеспеченность кондиционерами населения России крайне низкая. Анализ абсолютных изменений индекса энергопотребления CDD показывает, что наиболее заметно потребность в кондиционировании помещений изменится в Южном регионе (табл. 17), где к середине XXI в. в среднем ожидается увеличение индекса CDD до  $700^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$ . Соответствующее увеличение энергопотребления в летнее время при одновременном уменьшении индекса HDD до величины  $2200\text{—}2300^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$  (рис. 36) существенно изменит внутригодовой ход энергопотребления (рис. 37), и его необходимо учитывать при развитии региональных энергетических систем.

Таблица 16

Региональные оценки изменения индекса энергопотребления за отопительный период (HDD) в 2041—2060 гг. по отношению к 1991—2010 гг., рассчитанные с учетом численности населения, и их межмодельный разброс

Регион	Доля в общей численности населения (%)	Изменения (°С·сутки)			Относительные изменения (%)		
		Среднее	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.
Северо-Западный	10,0	-886	-511	-1296	-20	-12	-29
Центральный	24,6	-699	-330	-1018	-18	-8	-26
Южный	15,1	-431	-83	-617	-16	-3	-22
Приволжский	22,3	-736	-263	-1049	-16	-6	-23
Уральский	8,9	-827	-271	-1214	-15	-5	-22
Сибирский	14,3	-828	-459	-1064	-14	-8	-19
Дальневосточный	4,8	-812	-317	-1090	-14	-6	-19
Вся Россия	100,0	-720	-307	-968	-16	-7	-22

Таблица 17

Региональные оценки изменения индекса энергопотребления на охлаждение (CDD) в 2041—2060 гг. по отношению к 1991—2010 гг., рассчитанные с учетом численности населения, и их межмодельный разброс

Регион	Доля в общей численности населения (%)	Изменения (°С·сутки)			Относительные изменения (%)		
		Среднее	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.
Северо-Западный	10,0	88	15	174	127	22	251
Уральский	8,9	131	−14	251	138	−15	264
Сибирский	14,3	135	8	224	109	6	181
Дальневосточный	4,8	113	31	167	82	22	121
Центральный	24,6	158	28	320	115	20	233
Приволжский	22,3	170	−4	365	88	−2	190
Южный	15,1	243	66	367	53	14	80
Вся Россия	100,0	159	19	286	85	10	153

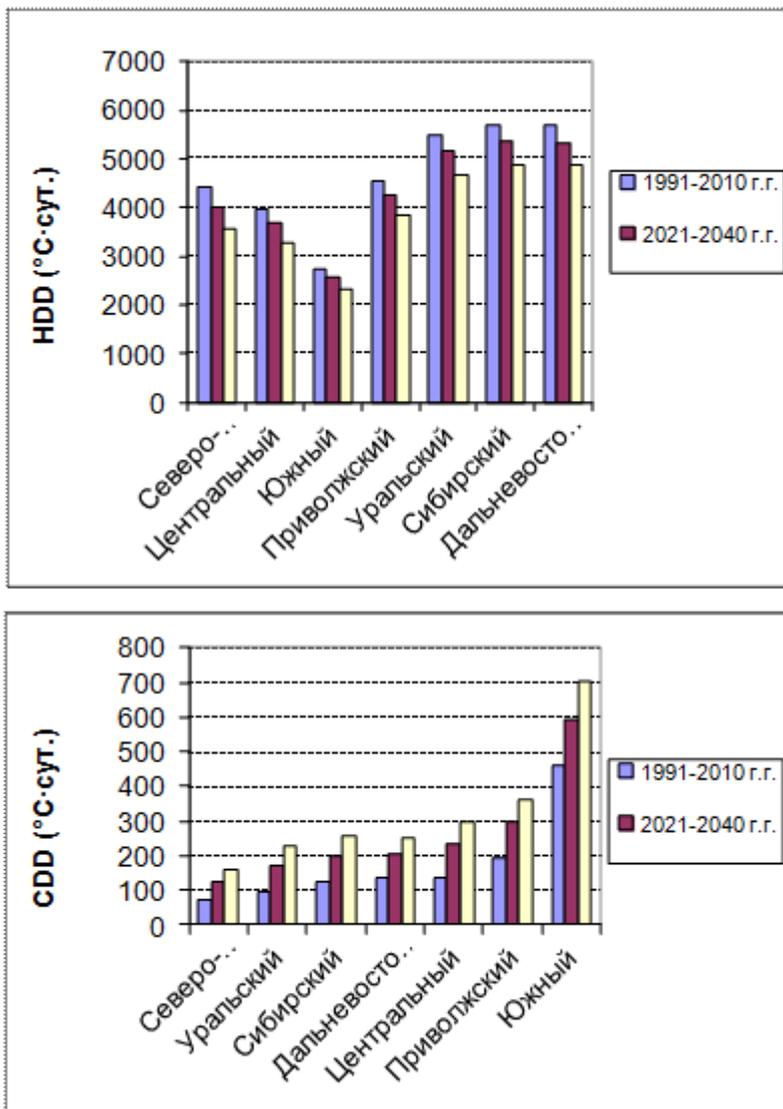


Рис. 36. Тенденции изменения индексов энергопотребления в холодный (HDD, °C·сут) и теплый (CDD, °C·сут) сезоны в различных регионах России, рассчитанные по модельным данным CMIP5 суточного разрешения с учетом численности населения.

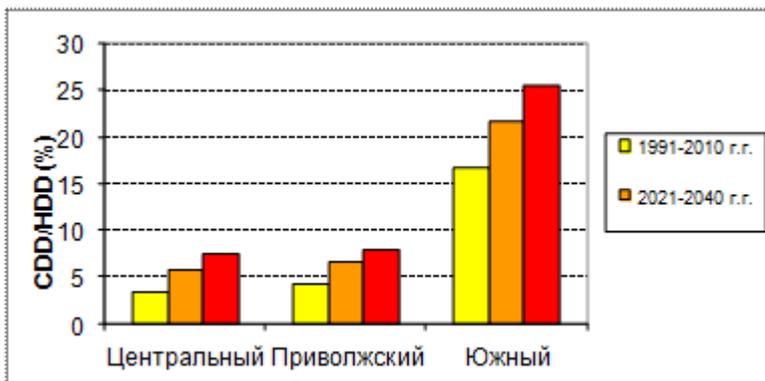


Рис. 37. Изменение соотношения между климатически обусловленным энергопотреблением на обогрев (HDD) и охлаждение (CDD) зданий в регионах с высокой подверженностью риску перегрева зданий и большой плотностью населения.

Соотношение между величинами HDD и CDD не дает возможности точно судить о соответствующих расходах первичных энергоресурсов и связанной с ними эмиссии парниковых газов, так как это определяется не только видом первичных ресурсов, но и техническими характеристиками различного оборудования. Заметим, что согласно (Wilbanks, 2007 а,б), значение  $HDD = 2200 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$  близко к пороговому, а именно: 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.

## 6. Воздействие климата на потенциал гидроэнергетики

### 6.1. Влияние изменений климата на выработку энергии на ГЭС в современный период

Энергия рек возобновляема, причем цикличность ее воспроизводства полностью зависит от речного стока, изменения

которого тесно связаны с изменениями климата. Поэтому при разработке стратегии развития как крупной, так и малой гидроэнергетики необходимо учитывать перспективу уязвимости водных ресурсов вследствие изменения климата, причем не только с точки зрения изменения общего количества воды и объема ее потребления в различных областях (коммунальное водоснабжение, сельское хозяйство и др.), но и по возможности учитывая изменения режимов водных потоков в течение года.

При изменении климатических условий гидроэнергетический потенциал, проектная стоимость и условия эксплуатации ГЭС конкретного района могут изменить свою величину в связи со следующими факторами:

- изменения сумм осадков и испарения приведут к изменению объема стока и его годового хода (например, сдвиг весеннего половодья на более ранний период);

- изменения интенсивности и частоты экстремальных погодных явлений (наводнений и засух) могут увеличить стоимость гидроэнергетических проектов и условия эксплуатации ГЭС;

- изменения в режиме донных отложений могут увеличить изнашиваемость турбин и уменьшить выработку электроэнергии;

- изменение ледового режима повлияет на условия эксплуатации ГЭС.

**Для гидроэнергетики наибольшее значение имеет климатообусловленное изменение стока рек.**

При этом, прежде всего, подвергаются воздействию следующие характеристики функционирования и развития гидроэнергосистем:

- изменение потенциальных гидроэнергоресурсов страны;

- изменение фактической выработки энергии на существующих ГЭС;

- изменение потребной гарантированной выработки электроэнергии, связанной с климатическими изменениями (например, вследствие снижения энергозатрат на отопление зданий)

или уменьшения энергопотребления орошаемого земледелия при снижении оросительных норм).

Оценка и прогноз влияния изменений климата на гидроэнергетику затрудняется тем, что в современных условиях ГЭС приходится рассматривать не только как объект энергосистем, но и в качестве одного из объектов комплексных водохозяйственных систем, использующих речной сток для достижения одновременно или последовательно нескольких целей.

Изменение выработки гидроэлектроэнергии на конкретных ГЭС в отдельные годы при неизменности технических условий функционирования их оборудования и стабильности экономической ситуации в основном зависит от изменения притока воды к водохранилищу. При снижении притока производство гидроэлектроэнергии сократится, а при его увеличении возрастет. В качестве примера на рис. 38 приведен пример зависимости выработки электроэнергии на Камской ГЭС от объема стока через турбины, в значительной мере определяемого притоком воды в водохранилище.

Понятно, что уравнение связи между указанными характеристиками для каждой ГЭС имеет свой вид. Однако если рассматривать не абсолютные, а относительные значения изменений этих характеристик, то можно получить примерно одинаковый вид зависимости для нескольких ГЭС, находящихся в аналогичных природных условиях и имеющих сходный режим регулирования. Так, увеличение суммарного среднего годового притока воды в 10 крупнейших водохранилищах Европейской части территории России на 10—30 % приводит к увеличению выработки электроэнергии лишь на 3—10 % по сравнению с проектными значениями, что является следствием неполного использования стока и повышения уровня воды нижнего бьефа. Для ГЭС Ангаро-Енисейского каскада, обладающих большими регулирующими возможностями водохранилищ, высокими значениями установленных мощностей и высокими напорами на ГЭС, коэффициент снижения прироста выработки энергии относительно прироста стока равен примерно 0,98. (Резниковский и др., 1995; Шикломанов и др., 1991).

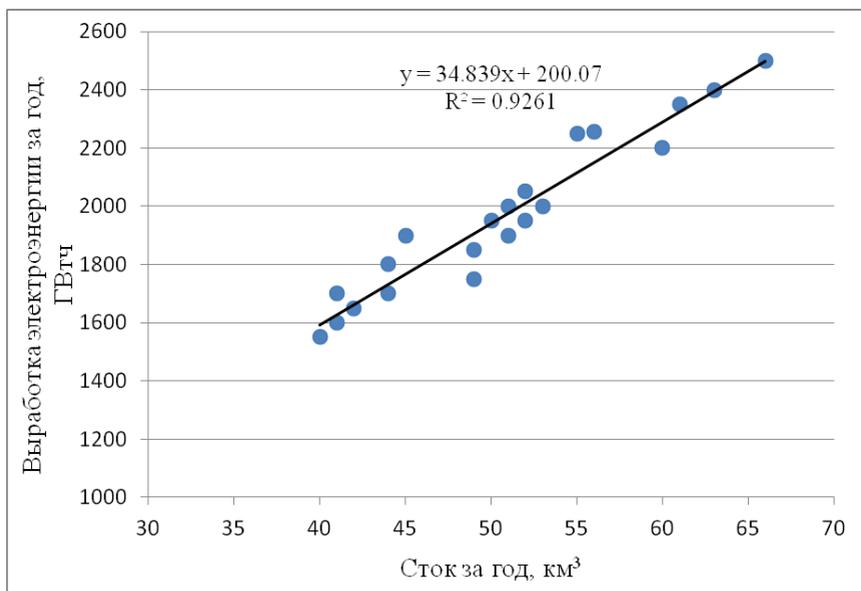
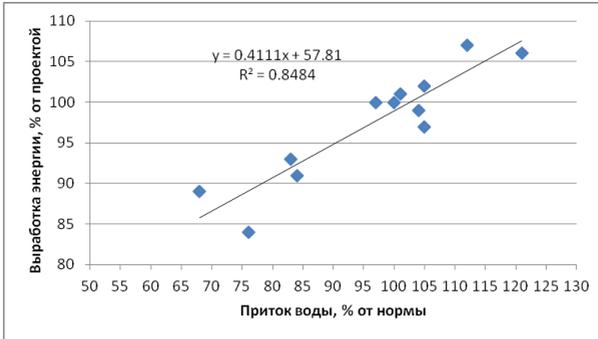


Рис. 38. Зависимости выработки электроэнергии на Камской ГЭС от объема стока через турбины с 1982 по 2011 гг.

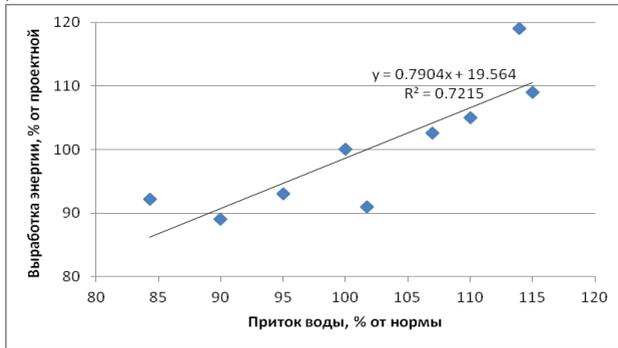
В данном отчете был выполнен анализ изменений выработки энергии на крупных ГЭС (Волжско-Камский, Ангаро-Енисейский каскады, Зейская и Бурейская ГЭС) (по данным компании Русгидро <http://www.rushydro.ru/>) и соответствующих изменений притока воды к водохранилищам в период 1995—2010 гг. (по данным Государственного водного кадастра). В результате были установлены ориентировочные соотношения между этими характеристиками в различных регионах страны (рис. 39).

Полученные зависимости являются фоновыми, т. к. ГЭС, расположенные даже в одном и том же регионе, обладают различными возможностями для увеличения выработки энергии при дополнительном притоке воды. Тем не менее, представляется возможным использовать представленные зависимости для определения возможных тенденций будущего изменения выработки энергии на ГЭС в различных регионах РФ.

а)



б)



в)

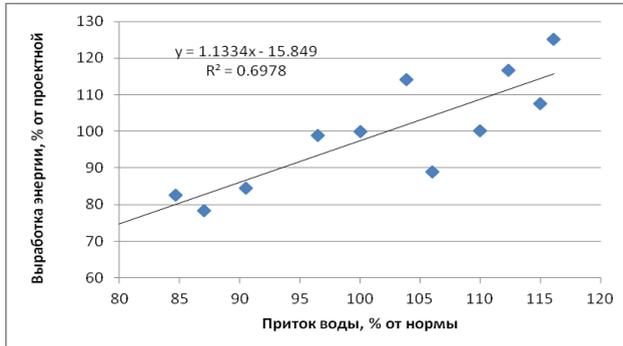


Рис. 39. Зависимость годовой выработки электроэнергии от среднего годового притока воды в водохранилища: равнинная территория ЕТР и Западной Сибири (а), Восточная Сибирь (б) и Дальний Восток (в).

Современные изменения среднего годового притока воды в водохранилища России носят в основном циклический характер. Средний приток воды за период 1980—2005 гг. для водохранилищ Кольского полуострова был на 1—7 %, а для водоемов Карелии — на 2—13 % выше нормы. Более существенное увеличение среднего годового притока воды было характерно для Волховского водохранилища — 25 %. Для южных водохранилищ ЕТР в последние два десятилетия наблюдалось понижение притока воды (в частности, к Цимлянскому водохранилищу: -5 %, а приток в Краснодарское водохранилище был близок к норме). Суммарный приток воды к водохранилищам Камского каскада (до створа Нижнекамской ГЭС) в среднем увеличился на 13 %, а в целом для водохранилищ Волжско-Камского каскада (до створа Волгоградской ГЭС) увеличение составило 15 %. Изменения притока воды к крупнейшим водохранилищам Азиатской территории России в период 1980—2005 гг. варьировались в широких пределах от уменьшения притока воды в пределах -4...-7 % для Новосибирского, Братского (боковой приток), Колымского и Зейского водохранилищ до увеличения на 7—14 % для Саяно-Шушенского, Иркутского и Вилюйского водохранилищ. При этом наибольшее увеличение притока воды наблюдалось к Вилюйскому водохранилищу (14 %). В целом для Ангарского каскада водохранилищ увеличение притока не превысило 5 %, а для Енисейского каскада — 1 % (Шикломанов и др., 2007, 2008).

Период 2006—2011 гг. на территории ЕТР в целом характеризовался как маловодный. Особенно неблагоприятная гидрологическая ситуация сложилась в 2010 и 2011 гг. Так, суммарный приток в водохранилища Волжского каскада ГЭС в этот период был примерно на 25 % меньше, чем в среднем за годы функционирования каскада (1959—2011 гг.). В Сибири и на Дальнем Востоке отмечались разнонаправленные тенденции. В частности, в 2009—2011 гг. приточность в водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС и Новосибирской ГЭС существенно (на 5—10 %) превышала среднеголетние значения. Такая же ситуация сложилась на водохранилищах Иркутскэнерго и Красноярской ГЭС. В 2011 году

наихудшая гидрологическая ситуация имела место на Дальнем Востоке. За год приток воды на местных водохранилищах был на 24 % ниже среднемноголетнего значения. К концу года наполнение Зейского водохранилища было на 3,4 метра ниже нормы (Аналитический бюллетень, 2011, 2012).

## **6.2. Влияние ожидаемых климатических изменений на гидроэнергетический потенциал регионов РФ**

По данным большинства исследований (Оценка, 2011) при потеплении глобального климата ожидается дальнейший рост водных ресурсов в тех регионах России, где существует достаточное или избыточное увлажнение. Уменьшение водных ресурсов будет происходить в регионах, где водообеспеченность в настоящее время оказывается предельной или недостаточной. При этом на всех крупных реках бассейна Северного Ледовитого океана ожидается увеличение годового стока.

*Изменение гидроэнергетического потенциала РФ в ближайшей перспективе.* Расчеты по ансамблю климатических моделей показывают, что на большей части России и особенно в Сибири заметный рост стока ожидается уже в первой четверти XXI в. В южных регионах ЕТР и сопредельных стран наблюдается тенденция к уменьшению стока, особенно выраженная во всей Украине и Северном Кавказе. В южном бассейне, включающем водосборы Днепра, Дона и Днестра, следует ожидать уменьшения годовых стоков вследствие уменьшения годовых осадков и увеличения испарения весной и летом.

Ожидаемое в ближайшее десятилетие изменение притока воды в существующие водохранилища большинства ГЭС России в основном благоприятно скажется на выработке электроэнергии. Исключение составляют Цимлянская и Новосибирская ГЭС, на которых уменьшение выработки электроэнергии под воздействием изменений климата может составить до 3—7 % от проектной. Ситуация на этих ГЭС может усугубиться до критической, если на фоне уменьшения стока будут наблюдаться затяжные маловодья в пределах водосборов их водохранилищ.

**Принимая во внимание прогнозируемое климатическими моделями повышение зимних температур воздуха и увеличение среднего годового притока воды в водохранилища, а также изменение распределения стока по сезонам, в осенне-зимний период можно ожидать повышенного притока практически ко всем существующим водохранилищам России.**

Такое изменение внутригодового распределения стока благоприятно для большинства районов России, так как в зимнее время возрастают бытовые нагрузки на энергетические системы страны. Увеличение притока воды в зимний период и выравнивание внутригодового распределения стока также благоприятно для выработки электроэнергии, но требует пересмотра режима работы отдельных водохранилищ и каскадов для создания оптимальных условий регулирования стока с учетом запросов всех водопользователей и при минимизации возможных неблагоприятных экологических и социальных последствий. К таким последствиям относятся возможное затопление и подтопление населенных пунктов, увеличение длины полыньи в нижних бьефах, что вызовет ухудшение климатических условий в береговой зоне (увеличение влажности воздуха, повторяемости туманов, ухудшение видимости и т. п.). Возможно также повышенное образование шуги и развитие зажорных явлений на участках рек ниже полыньи, появление трещин и разводов на льду водохранилищ.

*Изменение гидроэнергетического потенциала РФ к 2021—2040 гг. и 2041—2060 гг.* На основе полученных зависимостей между изменением притока воды в водохранилища и обусловленной этим изменением выработкой электроэнергии (рис. 39) были проведены ориентировочные оценки возможного изменения выработки энергии на ГЭС в различных регионах РФ к 2021—2040 гг. и 2041—2060 гг. с использованием данных по ансамблю из 16 климатических моделей. Расчеты были выполнены с учетом того, что изменение годовых значений слоя стока, рассчитанного моделями, определяет изменение

годового притока к водохранилищу, а, следовательно, и изменение теоретически возможной выработки электроэнергии.

В работе были использованы результаты моделирования будущего климата по сценарию RCP8.5. Выбор этого «агрессивного» сценария был обусловлен тем, что в условиях значительной неопределенности будущей ситуации наиболее информативной и оправданной является оценка «сверху» ожидаемых изменений климатических параметров. Результаты расчетов представлены в таблице 18.

Жирным шрифтом выделены изменения выработки электроэнергии, превышающие межмодельный разброс или равные ему. Курсивом выделены изменения меньшие, чем межмодельный разброс, что указывает на высокую неопределенность (невысокую достоверность) прогноза. Границы рассматриваемых районов представлены на рис. 7.

Данные таблицы 18 представляют собой, прежде всего, оценку возможных изменений технического гидроэнергетического потенциала регионов РФ. Что касается изменений теоретического потенциала, то по своей величине эта характеристика близка к изменению потенциала поверхностного стока. Ожидаемые изменения этого показателя в регионах РФ, выраженные в процентах, по сути дела представляют собой изменения стока, рассчитанные по климатическим моделям, и представлены в разделе 1.

**Ожидаемые к середине XXI в. изменения потенциала гидроэнергетических ресурсов в целом благоприятны для дальнейшего развития гидроэнергетического строительства на большей части территории страны.**

Так, например, среднее увеличение годовой выработки электроэнергии на крупнейшем в России Ангарском каскаде ГЭС к 2021—2040 гг. может достигнуть 6,6 млрд кВт·ч, а к 2041—2060 гг. — до 10,6 млрд кВт·ч. На Бурейской ГЭС соответствующие значения составляют 1 млрд кВт·ч и 1,3 млрд кВт·ч, а на Зейской ГЭС — 0,7 млрд кВт·ч и 0,9 млрд кВт·ч.

Таблица 18

**Ожидаемое изменение выработки электроэнергии на ГЭС регионов РФ (%) к 2021—2040 гг. и 2041-2060 гг. по сравнению 1991—2010 гг. по оценкам ансамбля моделей МГЭИК**

<b>Регион</b>	<b>2021—2040 гг.</b>	<b>2041—2060 гг.</b>
Северо-Западный ФО (запад)	$-0\pm3$	$0\pm3$
Северо-Западный ФО (восток)	$1\pm3$	$3\pm4$
Центральный ФО	$-1\pm4$	$-1\pm4$
Южный ФО	$-3\pm5$	$-4\pm6$
Приволжский ФО	$1\pm4$	$1\pm5$
Уральский ФО (север)	$1\pm3$	<b><math>3\pm3</math></b>
Уральский ФО (юг)	$4\pm11$	$6\pm11$
Сибирский ФО (север)	<b><math>3\pm2</math></b>	<b><math>5\pm4</math></b>
Сибирский ФО (центр и юг)	$3\pm5$	<b><math>6\pm5</math></b>
Сибирский ФО (юго-восток)	<b><math>5\pm5</math></b>	<b><math>10\pm6</math></b>
Дальневосточный (северо-запад и центр)	<b><math>5\pm5</math></b>	<b><math>6\pm5</math></b>
Дальневосточный (северо-восток)	$3\pm6$	$7\pm9$
Дальневосточный (юго-восток)	<b><math>7\pm7</math></b>	<b><math>9\pm9</math></b>
ЕЧР	$0\pm2$	$1\pm3$
Западная Сибирь	<b><math>2\pm2</math></b>	<b><math>4\pm3</math></b>
Восточная Сибирь	<b><math>4\pm3</math></b>	<b><math>6\pm5</math></b>
Россия	<b><math>3\pm3</math></b>	<b><math>5\pm3</math></b>

В южных районах Европейской части территории России возможно некоторое уменьшение слоя стока, и как следствие этого — уменьшение электроэнергии, вырабатываемой на ГЭС. В частности, на Цимлянской ГЭС уменьшение годовой выработки к 2021-2040 гг. может составить 54 млн кВт·ч, а к 2041—2060 гг. — 68 млн кВт·ч.

Надо отметить, что представленные оценки получены только с учетом ожидаемого увеличения (или уменьшения) годового притока речных вод в водохранилища. Однако очевидно, что на выработку электроэнергии ГЭС, наряду с общей водностью, воздействуют как положительно, так и отрицательно и другие факторы.

**Положительным фактором, связанным с климатическими изменениями, является изменение внутригодового распределения стока.**

Происходящее в последние 20—25 лет (особенно значительное на ЕТР) климатообусловленное увеличение естественной зарегулированности стока, связанное с ростом стока в летне-осенний и зимний сезоны, уже привело к дополнительной выработке энергии на ГЭС Волжско-Камского каскада и на Цимлянской ГЭС. Подтверждением этому являются сведения о выработке энергии за отдельные годы. В частности, в аномальную теплую зиму 1990—1991 гг., в течение которой значительно возрос приток к водохранилищам Волжско-Камского каскада, сверх нормы на ГЭС было выработано 10 млрд кВтч и сэкономлено 300 тыс. тонн органического топлива. По данным ансамбля климатических моделей на территории Волжско-Камского каскада к середине XXI века зимний сток может увеличиться на 30—50 %, весенний сток уменьшится на 10—15 %, летний сток уменьшится на 3—5 %. Кроме того, ожидается смещение пика весеннего половодья на более ранние сроки. В районе Ангаро-Енисейского каскада величина зимнего стока может возрасти на 50—60 %, а на водосборах рек Зеи и Буреи — на 20—30 %.

**Действующие правила эксплуатации водохозяйственных и энергетических систем разработаны без учета происходящих и ожидаемых изменений внутригодового распределения стока рек.**

В результате не только не используется полностью возможность для увеличения выработки энергии, но и создается опасность чрезвычайных ситуаций.

**Отрицательным последствием климатических изменений, вероятно, будет увеличение межгодовой изменчивости характеристик стока практически на всей территории РФ (Оценка, 2011).**

В итоге могут возрасти экстремальные показатели стока при более мощных паводках, участятся наводнения и одновременно засухи. Как показывает практика, эти процессы могут значительно затруднять эксплуатацию гидротехнических сооружений и уменьшать выработку электроэнергии. Например, в аномально жаркое и сухое лето 2010 г. из-за неблагоприятной гидрологической обстановки на реках Волжско-Камского каскада выработка электроэнергии уменьшилась на 6 млрд кВт·ч (на 14,2 %). В 2011 г. из-за недостаточного наполнения водохранилищ спад производства на дальневосточных ГЭС составил почти 10 %. Зимой 2004—2005 гг. очень высокий приток к водохранилищам Волжско-Камского каскада привел к преждевременному их наполнению, что поставило под угрозу возможность безопасного пропуска весеннего половодья.

**В условиях изменения климата увеличивается изменчивость выработки электроэнергии на ГЭС, снижается безопасность гидроузлов и повышается риск повреждения и разрушения гидротехнических сооружений.**

Наиболее опасно повреждение больших плотин. По данным Международной комиссии по большим плотинам (Малик, 2005), основной причиной прорыва больших плотин является именно недостаточная пропускная способность водосбросов. В связи с этим среди факторов риска, которые должны быть оценены, обязательным является переоценка водопропускной способности сооружений. Особый вид гидрологического риска — это таяние ледников, питающих реки. По мере того, как ледники в высокогорных районах тают, они могут сформировать большие озера за временными дамбами из камней и льда. Когда эти естественные дамбы разрушатся, может освободиться огромная масса воды.

При изменении климата произойдут значительные изменения и в процессах замерзания и вскрытия рек. Основная тенденция, которая наблюдается уже сейчас и, очевидно, будет усиливаться в будущем — это ледообразование преимущественно внутри водного потока. При этом могут возникать затруднения в работе водозаборных сооружений, которые забиваются внутриводным льдом.

Изменение климата является важным фактором, влияющим на устойчивость и эксплуатационные особенности энергетических сооружений в зоне распространения многолетнемерзлых пород, занимающих в России 60 % территории. Состояние этих пород требует особого внимания, т. к. область многолетней мерзлоты обладает высокой чувствительностью к изменениям климата и, прежде всего, термической составляющей.

Климатические изменения скажутся на размерах, структуре и характере водопотребления и водопользования, с которыми тесно связаны проблемы управления водными ресурсами, экономические и экологические последствия. Возможны усиления конкурентных столкновений в борьбе за воду различных отраслей хозяйства и отдельных потребителей. В итоге трансформация стока рек может привести к изменению функции ГЭС и возможностям удовлетворения требований неэнергетических потребителей водных ресурсов. Так, при повышении температуры воздуха увеличится расход воды на водоснабжение, при увеличении стока уменьшатся его затраты на ирригацию. При уменьшении стока могут возникнуть проблемы с

удовлетворением запросов водного хозяйства, что отразится на использовании ГЭС в энергосистемах. Неодинаковые изменения стока на реках потребуют оптимизации совместной работы ГЭС, в том числе многоступенчатых каскадов ГЭС в энерго- и водохозяйственных системах.

## 7. Влияние изменений климата на потенциал солнечной и ветровой энергии

### 7.1. Гелиоэнергетика

Согласно разработанной в ГГО методике районирования по природному гелиоэнергетическому потенциалу с использованием комплекса показателей, на территории России выделено 10 радиационно-однородных районов, которые были ранжированы по потенциалу солнечной энергии (рис. 40) (Стадник, Шанина, 2008; Климатические факторы, 2010).

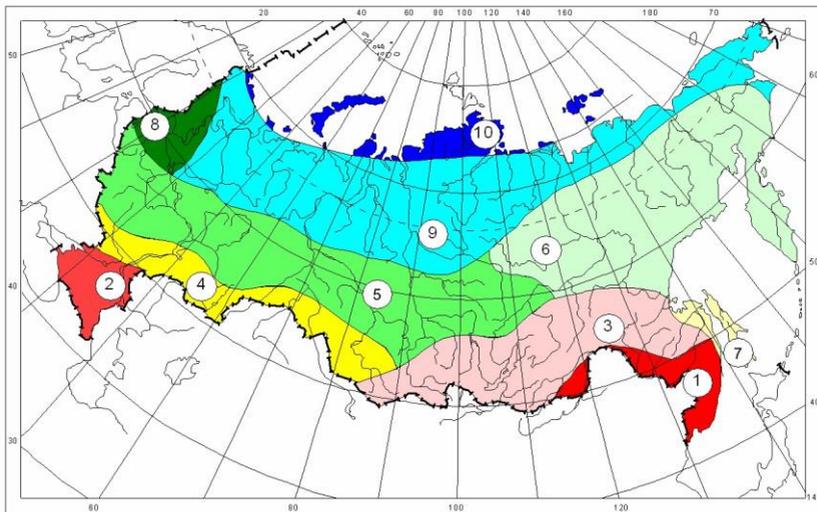


Рис. 40. Районирование территории России по природному солнечному потенциалу.

Комплексный анализ показал, что выделенные районы можно разделить на 5 групп: наиболее перспективные (1, 2); перспективные (3, 4); менее перспективные (5, 6); малоперспективные (7, 8); не перспективные (9, 10).

**Наиболее благоприятными условиями для практического использования энергии Солнца обладают южные районы Хабаровского края, Амурской области и Приморский край, а также южные районы Европейской части России.**

Большим потенциалом обладают южные районы Алтайского и Красноярского краев, Иркутской области и Забайкалье (3). В районах 1 и 3, в связи с большим количеством солнечной радиации в зимнее время, возможно круглогодичное использование гелиоустановок. В южных районах Дальнего Востока (район 1) с  $1 \text{ м}^2$  приемной поверхности фотоэлектрической установки, имеющей КПД 15 %, можно получить до 200 кВт·ч электроэнергии за год (рис. 41).

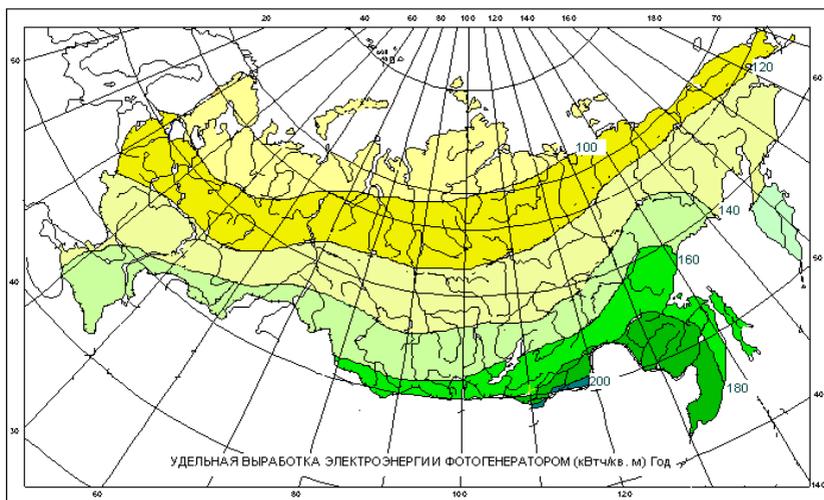


Рис. 41. Удельная выработка ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  год) электрической энергии фотоэлектрическим генератором (КПД 15 %).

Однако в настоящее время, исходя из капитальных затрат в установившихся рыночных условиях в России, и существующего уровня цен на фотоэлектрические модули, себестоимость солнечной электроэнергии составляет 0,65—0,70 Евро/кВт·ч или 28—30 руб./кВт·ч, что более чем в 10 раз превышает современные российские и в 5 раз германские тарифы (Николаев, 2008).

Солнечная энергия, преобразованная в тепловую, используется для отопления и горячего водоснабжения жилых и производственных зданий, сушки сельскохозяйственной продукции, подогрева воды в бассейнах и др.

Существующие методики позволили оценить возможную выработку тепловой энергии в разных регионах страны с использованием отечественных солнечных коллекторов (рис. 42).

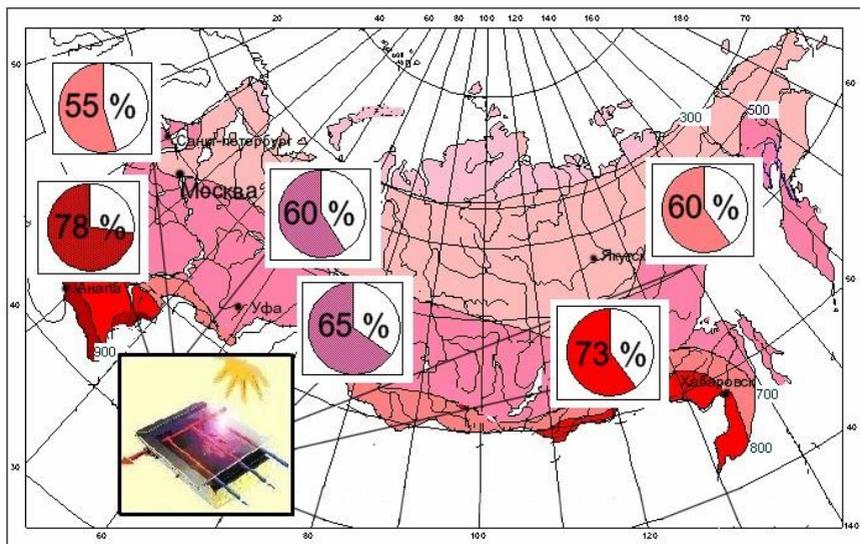


Рис. 42. Удельная выработка тепловой энергии плоским солнечным коллектором ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ) и коэффициент замещения тепловой нагрузки горячего водоснабжения за счет солнечной энергии (%).

В Южном и Северо-Кавказском федеральных округах, обладающих высоким солнечным потенциалом, удельная выработка тепловой энергии солнечным коллектором с жидким теплоносителем за безморозный период достигает 850—900 кВт·ч/м<sup>2</sup>. 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/м<sup>2</sup>, что позволяет применять солнечные коллекторы в качестве приставок для котельных и ТЭЦ, а также для разработок новых современных проектов «гелиоархитектуры».

**Коэффициент замещения нагрузки горячего водоснабжения за счет энергии Солнца в южных широтах России составляет более 75 %, а в средних — 55—60 % (Шетов, Бутузов, 2008).**

Показателем развития солнечной тепловой энергетики является суммарная площадь солнечных коллекторов. На 2000 г. в мире эксплуатировалось 70 млн м<sup>2</sup> солнечных коллекторов. В России солнечные коллекторы пока не получили столь широкого применения. В настоящее время работает около 15 тыс. м<sup>2</sup> гелиоустановок, что ровно на порядок меньше, чем было в СССР в 1990 году (Шетов, Бутузов, 2008). 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, который может быть заменен гелиоустановками. Для этого потребуется построить 100 тыс. м<sup>2</sup> солнечных коллекторов. В последние годы в Краснодарском крае введено в эксплуатацию более 100 гелиоустановок с общей площадью солнечных коллекторов, превышающей 6000 м<sup>2</sup>. Половина из них применяется для горячего водоснабжения санаториев и пансионатов. В Бурятии действует 70 установок площадью 3000 м<sup>2</sup> (Шетов, Бутузов, 2008).

**Низкое использование гелиоустановок связано в значительной мере с экономическими причинами. Стоимость установок находится в пределах 30—90 тыс. руб. Срок окупаемости — около 7 лет. Однако перспективы использования энергии Солнца в России связываются именно с выработкой тепловой энергии на базе плоских солнечных коллекторов.**

## **7.2 Влияние изменений климата на гелиоэнегетику**

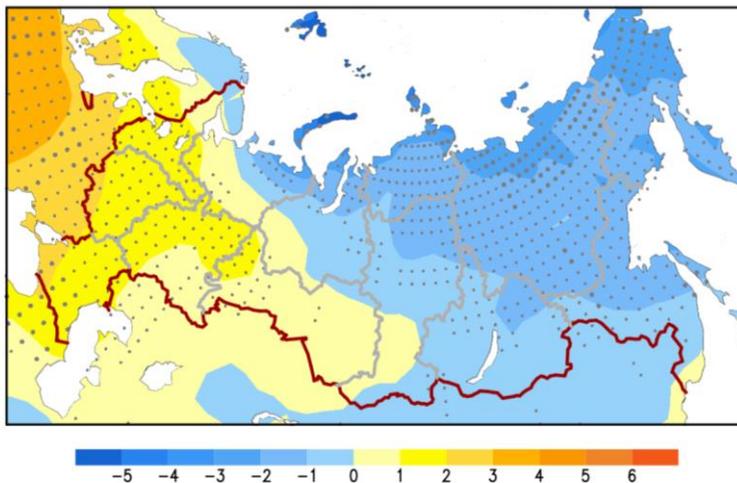
Согласно (IPCC, 2007), в настоящее время нет убедительных оценок, указывающих на существенное влияние глобального потепления на региональные солнечные ресурсы Земли.

По оценкам (рис. 43), полученным по ансамблю моделей СМIP5, изменения суммарной солнечной радиации, как в краткосрочной, так и в среднесрочной перспективе, будут находиться в диапазоне от +2 до -4 % относительно величин суммарной солнечной радиации в базовый период (1991—2010 гг.) (IPCC, 2007).

Небольшое увеличение потока (до 2 %) ожидается на Европейской территории России, юге Западной Сибири и юге Приморского края. На Азиатской территории прогнозируется снижение приходящей к земной поверхности солнечной радиации. Наиболее заметное снижение (до 3 %) ожидается на побережье северных морей и Чукотке. При этом уменьшение годового количества солнечной энергии на 1 м<sup>2</sup> не превысит 30—40 Квт·ч, а годовая выработка полезной энергии снизится не более, чем на 2—3 %. В остальных регионах ожидаемые изменения в потоке приходящей солнечной радиации на производительности солнечных установок скажутся еще меньше.

Как показывают модельные оценки, существенных изменений в величине потока солнечной радиации не ожидается и в среднесрочной перспективе (2041—2060 гг.).

а)



б)

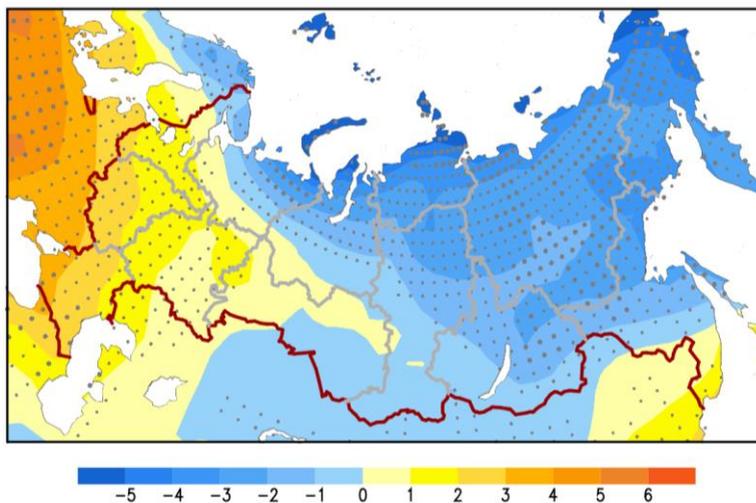


Рис. 43. Изменения годового потока суммарной солнечной радиации, рассчитанные на ближайшие (а) десятилетия (2021—2040 гг.) и середину (б) XXI века (2041—2060 гг.) по ансамблю 16 МОЦАО СМIP5 в % от значения базового периода (1991—2010 гг.).

Осредненные значения природного потенциала солнечной энергии (из расчета на  $1 \text{ м}^2$ ) по федеральным округам и прогнозируемое изменение потенциала на ближайшие десятилетия приведены в таблице 19. Наряду с величиной природного потенциала указана величина технического потенциала, относящаяся к  $1 \text{ м}^2$  гелиоприемника — фотоэлектрической батареи и солнечного коллектора. Если не учитывать изменения технических параметров, которые будут происходить при усовершенствовании гелиоустановок, то удельные технические ресурсы солнечной радиации будут изменяться в соответствии с прогнозируемым изменением в поступлении солнечной энергии.

Предварительная количественная оценка последствий изменения климата на гелиоэнергетику может быть проиллюстрирована на примере изменения выработки тепловой энергии солнечными коллекторами в Южном федеральном округе, где принята и реализуется региональная программа развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Если согласно модельному «прогнозу» изменение суммарной радиации практически не повлияет на работу тепловых солнечных станций, то при прогнозируемом повышении средней дневной температуры воздуха на 2 градуса можно ожидать увеличения эффективности работы солнечных коллекторов для горячего водоснабжения. Выработка тепловой энергии возрастет на 6 % (50 кВтч с каждого квадратного метра солнечного коллектора). Так, например, если на десяти ТЭЦ будут установлены солнечные приставки площадью по  $100 \text{ м}^2$ , то ежегодная экономия топлива будет эквивалентна 6 тоннам условного топлива (рис. 44).

Таблица 19

Удельные (на 1 м<sup>2</sup>) природные и технические солнечные ресурсы

Федеральные округа	Потенциал солнечной энергии			
	природный		технический (1981—2000 гг.)	
	по данным наблюдений 1981—2000 гг., кВт·ч·м <sup>-2</sup> ·год	прогнозируемая аномалия (%) на период до 2040 гг.	электрическая энергия, кВт·ч·м <sup>-2</sup> ·год	тепловая энергия, тыс. ккал·м <sup>-2</sup> ·год
Северо-Западный	900—1100	+1,25	135—165	250—470
Центральный	1000—1400	+2	165—210	430—690
Южный	1400—1600	+2,1	210—240	690—780
Приволжский	1100—1500	+1,25	165—225	430—600
Уральский север	800—1200	-0,8	120—180	170—470
Уральский юг	1200—1650	+1,25	180—250	470—645
Сибирский юг	1200—1650	+1,0	180—250	470—645
Сибирский север	850—1100	-0,8	130—165	215—345
Дальневосточный, северо-запад и центр	900—1400	-1,5	135—200	215—430
Дальневосточный, северо-восток	1000—1400	-2,5	210—260	260—470

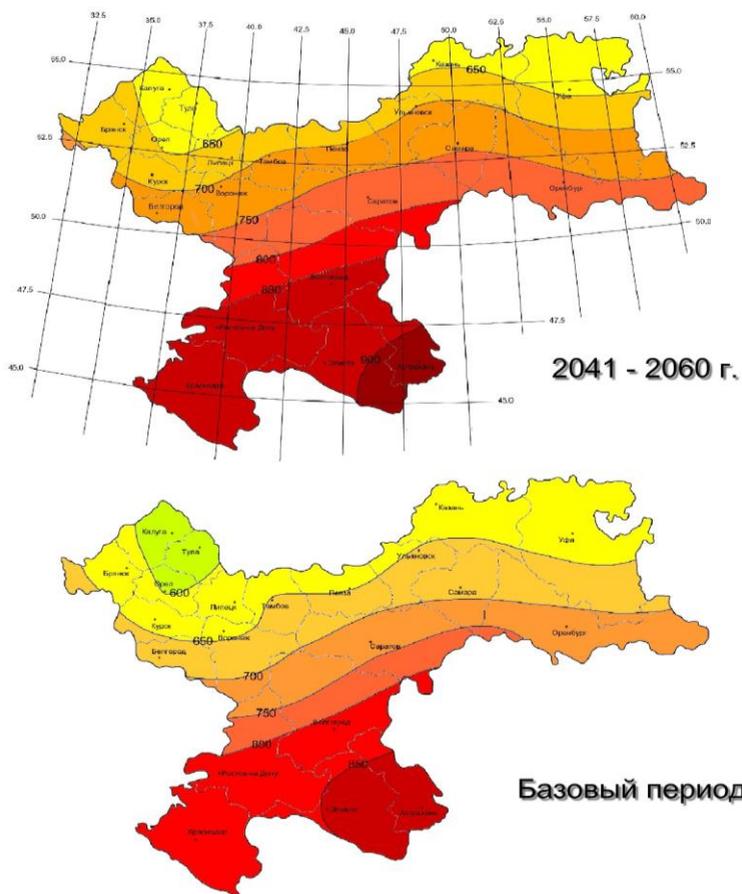


Рис. 44. Изменение удельной выработки тепловой энергии солнечным коллектором к середине XXI века по отношению к базовому периоду (1991—2010 гг.), кВт·ч/м<sup>2</sup>.

### 7.3. Ветроэнергетика

Ветер является одним из мощных энергетических источников и может быть утилизирован в значительных масштабах. Ветровая

энергия - наиболее дешевая из возобновляемых источников энергии. В местах с хорошими ветровыми условиями ветроэнергетика успешно конкурирует с традиционными ТЭС и АЭС. Согласно статистическим данным Европейской Ассоциации ветроэнергетики, на конец 2009 года, благодаря ветроэнергетике, в мире было получено 157 гигаватт электроэнергии (Стадник, Шанина, 2008). Этот показатель превышает в шесть раз данные на 2000 год.

**Оценка технического ветроэнергетического потенциала России, основанная на многолетних метеорологических и аэрологических данных, исходя из минимального расстояния между ветроэнергетическими установками (ВЭУ) и принимая допустимую площадь отвода земли под ВЭУ (12 % от общей площади территории страны), показала, что он почти в 14 раз превышает сегодняшнюю годовую выработку всех электростанций страны ( $\approx 1000$  ТВт·ч/год).**

Суммарная выработка установленных в России ВЭУ составляет  $\approx 180$ — $200$  ТВт·ч/год, что примерно в 70 раз меньше полученной оценки технического потенциала ветроэнергетических ресурсов (Николаев, 2008). Согласно «Атласу ветров России» существует множество районов, благоприятных для использования ВЭУ мегаваттного класса мощности, предназначенных для работы в составе энергосистем, и для ВЭУ малой мощности, которые могут использоваться автономными потребителями.

Для оценки природно-климатического ветроэнергетического потенциала используется средняя годовая удельная мощность ветрового потока через единицу площади ветроколеса, перпендикулярного направлению ветра. В соответствии с этим определением природно-климатический потенциал энергии ветра  $N_e$  имеет размерность Вт/м<sup>2</sup>.

В связи с созданием и внедрением, как в настоящее время, так и в перспективе, ВЭУ мегаваттного класса мощности  $\sim 2$ — $5$  МВт с

высотой башен 80—130 и более метров наибольший практический интерес представляет расчет удельной мощности ветрового потока на высоте 100 м. Фоновое районирование России по значениям удельной мощности ветрового потока на уровне 100 м над земной поверхностью приведено на рис. 45.

**Наибольшим ветроэнергетическим потенциалом обладают районы вдоль берегов Карского, Берингова и Охотского морей. Значительные ресурсы находятся в районах Среднего и Нижнего Поволжья, степных районах Западной Сибири.**

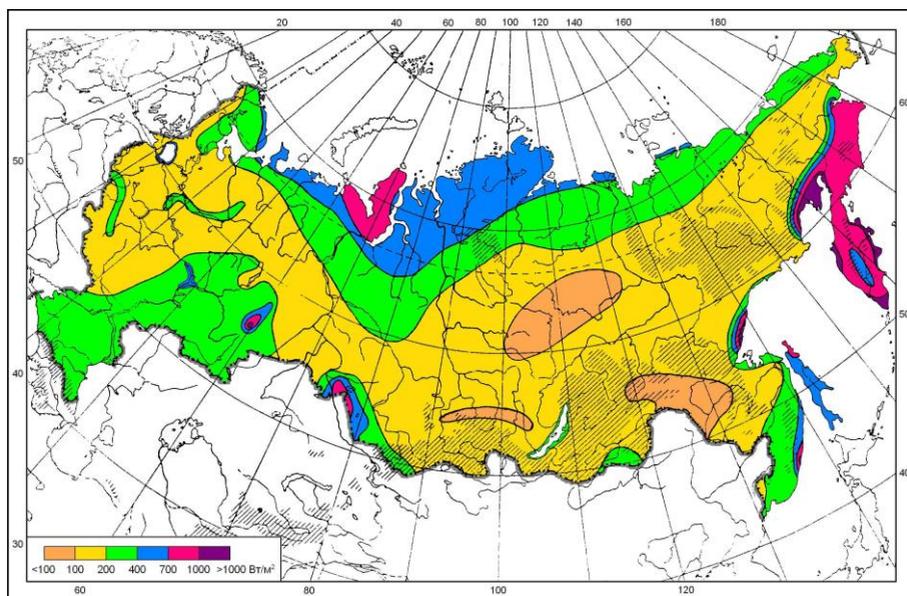


Рис. 45. Фоновое районирование России по значениям удельной мощности ветрового потока на уровне 100 м над земной поверхностью.

Богатый ветроэнергетический потенциал во многих районах России, высокий уровень его изученности, наличие эффективных отечественных методик экономического обеспечения

ветроэнергетических проектов создают предпосылки для расширения сети ветроэнергетических станций и включения их в Единую Энергетическую Систему России.

В то же время необходимо отметить, что на сегодняшний день вклад ветроэнергетических установок в общем объеме производимой в России энергии незначителен. В таблице 20 приведены показатели работы действующих ВЭУ.

*Таблица 20*

**Технико-экономические показатели работающих  
ветроэнергетических установок**

<b>Регион</b>	<b>Установленная мощность, кВт</b>	<b>Выработано электроэнергии, тыс. кВт·ч/год</b>
<b>Республика Коми</b>	1200	151
<b>Калининградская обл.</b>	5100	5198
<b>Республика Башкортостан</b>	200	1210
<b>Камчатская обл.</b>	500	270
<b>Чукотский АО</b>	2500	6767
<b>Ростовская обл.</b>	200	230
<b>Мурманская обл.</b>	200	230
<b>Ленинградская обл.</b>	75	50

Эффективность работы ветроэнергетических установок напрямую зависит от средней скорости ветра. Скорости ветра на высоте приземных метеорологических наблюдений (10—14 м) из-за влияния рельефа подстилающей поверхности не точно отражают количественную характеристику ветроэнергетического потенциала, но осредненные по району и по достаточному числу метеорологических станций они являются важным качественным, а зачастую и единственным количественным показателем наличия или отсутствия ветрового потенциала в районе для практического использования.

Поскольку скорость ветра, влияющая на объем вырабатываемой электроэнергии, обладает выраженной временной изменчивостью,

остановимся на особенностях векового хода скорости ветра в различных регионах России.

#### 7.4. Изменение скорости ветра

Исследование временной изменчивости скорости ветра показало заметное ослабление его скорости во внутриконтинентальных частях Евразийского материка, начавшееся с конца 1960-х годов XX века (Климатические факторы, 2010; Palutikov, 1985).

На территории России в последнее двадцатилетие XX столетия отмечено уменьшение скорости ветра на большей части территории, расположенной к западу от Урала, а также на юге Западной Сибири, севере Иркутской области, большей части Республика Саха — Якутия, в Хабаровском крае, на северо-востоке побережья Охотского моря.

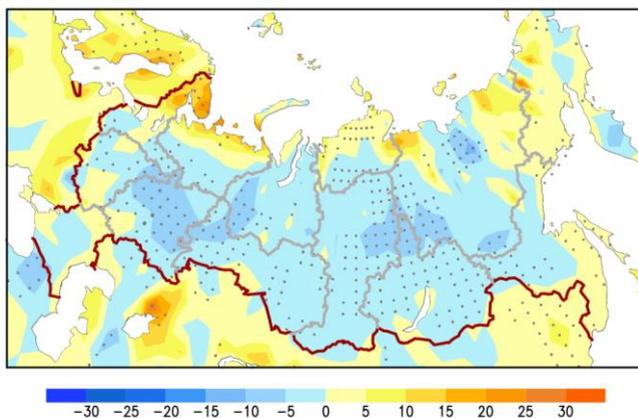
Особо следует отметить, что общий уровень падения скорости ветра сочетался с одновременным увеличением повторяемости слабых ветров (так называемых «энергетических» штилей) и уменьшением повторяемости «буревых» скоростей, за исключением прибрежных зон (побережья Камчатки и Приморского края, о. Сахалин, побережья Ладоги и Финского залива), где уменьшение повторяемости сильных ветров ( $\geq 20$  м/с) не наблюдалось. В то же время следует отметить, что повторяемость диапазона «энергоактивных» скоростей ветра ( $\geq 5$  м/с), то есть ветров умеренных, при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, в последние 20 лет XX столетия мало изменилась по сравнению с предшествующими десятилетиями.

**Как показывают модельные оценки, существенных изменений в приземных скоростях ветра на ближайшие десятилетия XXI века и на середину века не прогнозируется.**

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 и оно не превысит 10 %. На побережьях северных морей, в Магаданской области, на Чукотке, на побережьях Охотского моря скорости ветра возрастут до 5—10 %, а на Кольском полуострове до 15 %. Такой характер поля приземного ветра сохранится и к середине XXI века (рис. 46).

а)



б)

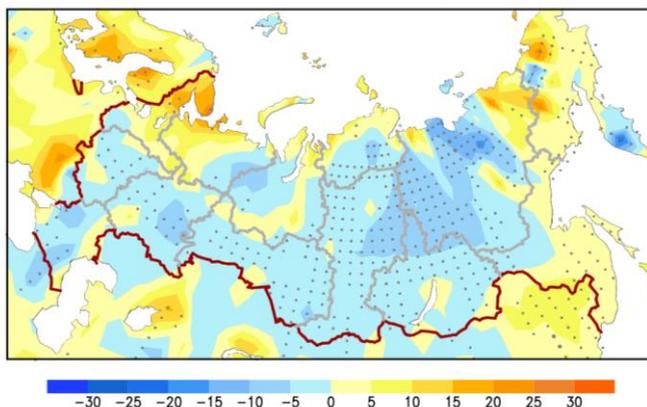


Рис. 46. Ожидаемое изменение (%) модуля скорости ветра в ближнесрочной (2021—2040 гг.) и среднесрочной (2041—2060 гг.) перспективе по отношению к базовому периоду 1991—2010 гг.

Оценки природного гелио- и ветропотенциала России, выполненные в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, показали, что в России солнечная и ветровая энергетика могут быть серьезной альтернативой сжиганию ископаемого топлива уже в настоящее время.

Особенно это относится к установкам на базе солнечных коллекторов, которые могут быть конкурентоспособны в сфере децентрализованного теплоснабжения, где источником тепла являются мелкие котельные и индивидуальные отопительные и водогрейные устройства.

## **8. Оценка потенциала загрязнения воздуха, обусловленного изменениями климата**

В разделе 2 уже отмечалось, что производство электроэнергии в России в 2011 г. увеличилось по сравнению с 2010 г. на 1,4 %, причем увеличение это было обеспечено главным образом тепловыми и атомными электростанциями. По прогнозу Международного энергетического агентства (World Energy Outlook, 2011), темпы роста производства электроэнергии в России вплоть до 2035 г. сохранятся на уровне 1,5 % в год, и к 2035 г. общее производство электроэнергии достигнет 1440 млрд кВт·ч. Согласно Энергетической стратегии РФ, доля нетопливных источников в производстве электроэнергии, составлявшая 32 % в 2008 г., должна будет увеличиться примерно до 38 %. Однако даже при успешной реализации этого плана производство энергии тепловыми электростанциями увеличится примерно на 27 %. Одновременно в прогнозе упомянута готовность России сократить эмиссию углерода на 20—25 % к 2020 г., если будет достигнуто глобальное соглашение, обязывающее другие страны к сопоставимым уменьшениям.

В то же время известно, что рост мощности энергоносителей сопровождается увеличением выброса загрязняющих веществ в атмосферу, т. е. загрязнением воздуха и связанной с ним нагрузкой на окружающую среду и на здоровье населения. Как следствие, требования соблюдения экологических норм в районах размещения

тепловых электростанций являются одним из основных факторов, сдерживающих наращивание их мощности.

В соответствии с национальным законодательством, в России при строительстве и эксплуатации теплоэлектростанций требуется обеспечить соблюдение санитарно-гигиенических нормативов качества атмосферного воздуха. На практике необходимо выполнение неравенства  $C \leq \text{ПДК}$ , где  $C$  — суммарная (с учетом фонового загрязнения воздуха) концентрация каждого из рассматриваемых загрязняющих веществ, а ПДК — установленная для этого вещества Минздравом РФ предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе населенных мест. В настоящее время нормативы ПДК или их аналоги установлены в РФ более, чем для 2000 примесей, причем для основной части этих примесей приведены два значения ПДК, соответствующих периоду осреднения концентраций 20—30 мин («ПДК максимальные разовые») и длительному (сезон, год) периоду осреднения («ПДК среднесуточные»). Поэтому возможное загрязнение воздуха для той или иной территории (т. е. потенциал ее загрязнения) также должно оцениваться по двум показателям, соответствующим краткосрочному (20—30 мин) и долгосрочному (годовому) времени осреднения концентраций. В работах специалистов Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова было, однако, показано, что для вредных примесей, содержащихся в выбросах тепловых электростанций, определяющим является «максимальный разовый» потенциал.

Расчеты полей максимальных разовых концентраций при проектировании и реконструкции тепловых электростанций и других промышленных источников загрязнения атмосферы в России проводятся на основе действующей национальной методики расчета загрязнения воздуха ОНД-86 (Guideline, 1987), разработанной в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Данная методика позволяет установить связь между максимальной приземной концентрацией в окрестности одиночного точечного источника (например, дымовой трубы тепловой электростанции) и комплексом текущих значений метопараметров с помощью коэффициента пропорциональности  $A$ . В свою очередь, этот коэффициент

определяется параметром  $\lambda = [K_z / (zU(z))]_{z=z_1}$ , характеризующим турбулентное перемешивание в атмосфере (здесь:  $z$  — высота над уровнем земной поверхности;  $z_1$  — фиксированная высота,  $z_1 = 1$  м;  $K_z$  и  $U(z)$  — коэффициент турбулентности и измеренная скорость ветра на высоте  $z_1$ ).

**В окрестности крупных теплоэлектростанций загрязняющие вещества поступают в атмосферу, как правило, через высокие дымовые трубы и под влиянием перегрева и начального импульса могут подниматься вверх. Для таких выбросов максимальные значения приземных концентраций достигаются при критических скоростях ветра порядка 3—5 м/с. В этом случае подъем примеси в воздухе ограничен, ее «разбавление» при выбросе из дымовой трубы не слишком велико, и при наличии развитого турбулентного перемешивания выброшенные на значительной высоте примеси сравнительно быстро транспортируются в «слой дыхания», расположенный вблизи подстилающей поверхности.**

На рис. 47 показано установленное в (Guideline, 1987) пространственное распределение коэффициента  $A$  по территории России, полученное в результате климатологической обработки многолетних данных метеонаблюдений, проводившихся на так называемых теплосбалансовых станциях. Как следует из этого рисунка, коэффициент  $A$ , характеризующий рассеивающую способность атмосферы, имеет диапазон изменений примерно 2 раза, причем его наиболее высокие значения достигаются в Забайкалье, а наиболее низкие — в центральных областях Европейской территории России.



Рис. 47. Пространственное распределение коэффициента А, характеризующего рассеивающую способность атмосферы (Guideline, 1987): (1) Бурятия, Читинская область; (2) Сибирь и Дальний Восток; (3) Бассейн р. Волга (южная часть), Северный Кавказ, другие европейские регионы России к югу от 50° с. ш.; (4) Европейская часть России и Урал до 50° с. ш.; (5) Европейская часть России и Урал к северу от 50° с. ш.; (6) Москва, Тула, Рязань, Владимир, Калуга и Иваново.

В связи с возможными изменениями климата возникает вопрос о том, в какой степени эти изменения могут повлиять на рассеивающую способность атмосферы. Ответ на этот вопрос имеет важное практическое значение, поскольку от него в значительной степени зависят выбор стратегии развития российской теплоэнергетики, оценка затрат, необходимых для обеспечения соблюдения санитарно-гигиенических критериев качества атмосферного воздуха, и др. Поскольку при строительстве и реконструкции тепловых электростанций мероприятия по охране воздушного бассейна от загрязнения выбираются по результатам проведения вариантных расчетов на основе нормативного документа (Guideline, 1987), задача сводится к оценке возможных изменений коэффициента  $A$  вследствие предполагаемого изменения климата. В свою очередь, для получения такой оценки необходимо определить, как при этом изменятся функции распределения метеопараметров, определяющих ожидаемые максимальные значения приземных концентраций, т. е. функции распределения скоростей ветра и параметра  $\lambda$ .

В рамках данного исследования с этой целью были построены распределения скоростей ветра и параметра  $\lambda$ , полученные с использованием региональной климатической модели ГГО, а также проведено их сопоставление с функциями распределения, вычисленными по данным инструментальных наблюдений на сети метеостанций. Данная модель имеет значительно лучшее пространственное разрешение по сравнению с глобальными моделями. Поэтому ее использование представляется наиболее целесообразным при оценках локального потенциала загрязнения атмосферы.

Обработка данных инструментальных наблюдений проводилась с использованием методики, развитой в работах (Genikhovich, Osipova, 1984; Groisman, Genikhovich, 1997; Sofiev et al., 2010). Выполненные оценки показали, что для различных станций мониторинга, расположенных на территории России, качество аппроксимации измеренных функций распределения скоростей ветра  $F(u)$  модельными различается. Так, удовлетворительное согласие отмечено для метеостанций Архангельск, Благовещенск, Чита, Екатеринбург, Игарка, Казань, Кемерово, Ханты-Мансийск и некоторых других. Существенные различия обнаружены, в частности, для метеостанций

Анадырь, Грозный, Иркутск, Москва, Санкт-Петербург и др. Проведенное сравнение показало также, что модельные функции распределения  $F(u)$ , рассчитанные на 2000 г. и на 2050 г., практически не различаются. Примеры сравнения  $F(u)$  для станций Москва, Санкт-Петербург, Мурманск и Тюмень представлены на рис. 48. Аналогичное исследование, выполненное для функций распределения  $F(\lambda)$ , показало, однако, что модельные  $F(\lambda)$  повсеместно отличаются от полученных по данным инструментальных измерений. При этом изменчивость модельных  $\lambda$  была меньше, чем полученных по данным измерений. Полученные модельные значения  $\lambda = 0,03—0,04$  соответствовали нейтральной стратификации приземного слоя. В результате дополнительного анализа результатов модельных расчетов было установлено, что, по-видимому, этот эффект связан с систематическим занижением в модели величины  $\Delta T$  — разности температур на «подстилающей поверхности» и на «уровне метеобудки». В данной связи был применен метод корректировки модельных значений  $\Delta T_{\text{mod}}$  с использованием формулы

$$\Delta T_{\text{corr}} = F_{\text{meas}}^{-1} (F_{\text{mod}} (\Delta T_{\text{mod}})),$$

где  $F_{\text{meas}}$  и  $F_{\text{mod}}$  — построенные по данным измерений и по модельным данным функции распределения  $\Delta T$ . Следует отметить, что и здесь значимые различия между откорректированными модельными функциями распределения за 2000 г. и 2050 г. не были обнаружены.

**На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что ожидаемые изменения климата в период до 2050 г. не приведут к значимым изменениям функций распределения скоростей и параметров устойчивости. Это означает, что оценку воздействия на окружающую среду в России и нормирование выбросов от тепловых электростанций можно проводить без того, чтобы корректировать коэффициенты в нормативных методиках расчета загрязнения воздуха, учитывающих климатические условия рассеивания примесей в атмосфере.**

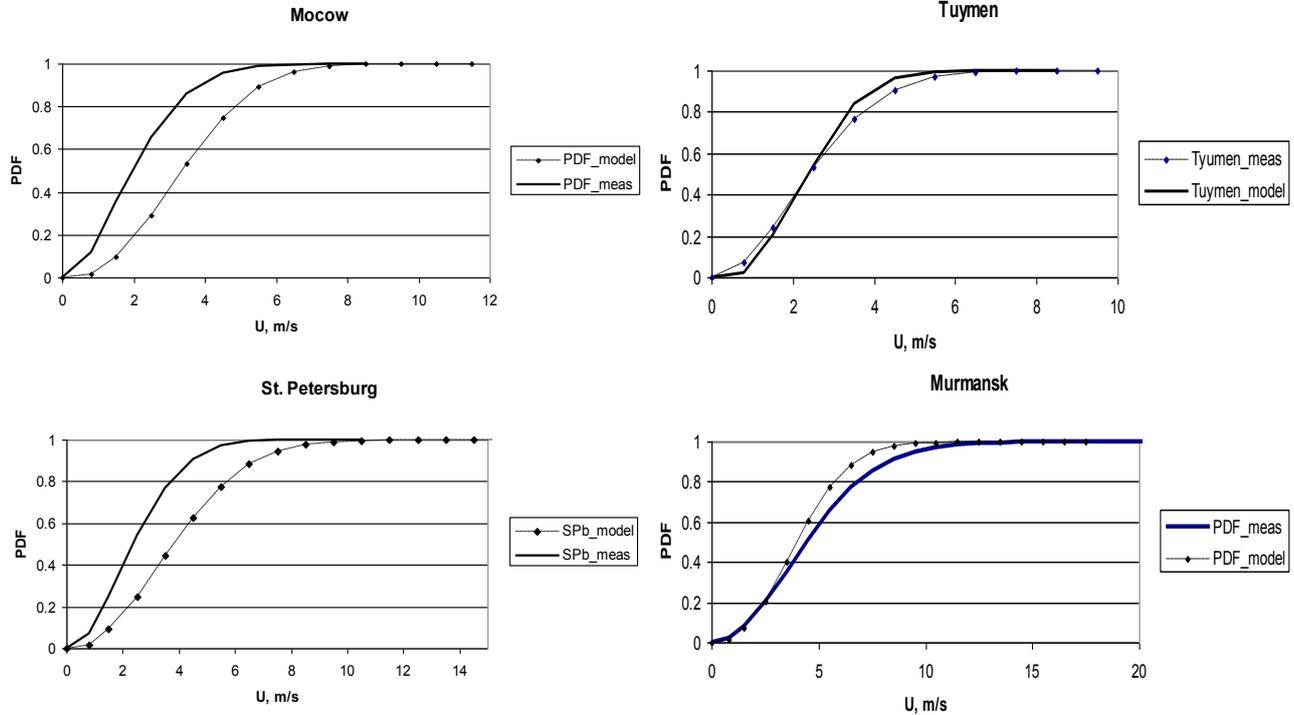


Рис. 48. Модельные функции распределения, соответствующие 2000 г., для метеостанций Москва, Тюмень, Санкт-Петербург и Мурманск — измеренные (сплошная линия) и модельные (пунктир).

## 9. Заключение и рекомендации по адаптации к изменениям климата

Отмеченные средствами мониторинга значительные изменения климата последних десятилетий уже вносят и вынудят вносить в будущем коррективы в различные сферы человеческой активности, в первую очередь, в хозяйственную деятельность. Именно поэтому так важно предвидеть, какие изменения климата, вероятно, произойдут в ближайшем будущем, и сколь интенсивны они будут<sup>2</sup>. Выполненное исследование позволило оценить особенности и интенсивность эволюции климата на территории России в первой половине XXI века. Остановимся на наиболее значимых результатах.

**Температура воздуха.** В течение трех ближайших десятилетий наибольшее потепление ожидается зимой. Наиболее интенсивно оно в высоких северных широтах, его максимальные значения приходится на прибрежную зону Арктического бассейна. Летом, напротив, потепление в указанной зоне минимальное, поскольку температура приземного воздуха определяется относительно холодными водами прибрежных морей Арктики. Наиболее заметное потепление летом будет происходить в южных регионах континентальной России. В целом, по России среднее за год потепление к 2030 году составит 1—2 °С, при этом оно составит 2—3 °С зимой в северных регионах сибирских административных округов и около 1 °С летом на остальной части страны. Восточная Сибирь подвержена более быстрому потеплению в течение всего года, чем Европейская часть России.

**Осадки.** В первой половине XXI века осадки будут возрастать на всей территории России, причем их существенный рост приходится на холодное полугодие. Это вызвано ростом влагоемкости атмосферы и

---

<sup>2</sup> Напомним, что все климатические прогнозы, основанные на модельных исследованиях, всегда носят вероятностный характер, т. е. дают ответ на вопрос, какие *наиболее вероятные* изменения характеристик климатической системы (температуры, скорости ветра, осадков и пр.) ожидаются в будущем.

интенсификацией гидрологического цикла вследствие общего потепления атмосферы. Ожидается, что рост осадков составит зимой в среднесрочной перспективе (до 2030 г.) 7 %, а к середине XXI века примерно 11 %. Летний рост осадков заметно меньше зимнего: 2,5 % к 2030 г. и около 4 % к середине века. Прослеживается тенденция роста конвективных осадков на значительной территории России. Это означает, что следует ожидать рост повторяемости таких опасных явлений погоды, как грозы, ливни и паводки.

**Водные ресурсы (сток рек).** При потеплении глобального климата на территории России ожидается дальнейший рост водных ресурсов в тех регионах, где существует достаточное или избыточное увлажнение. В первую очередь это касается всех крупных, главным образом, сибирских рек, впадающих в бассейн Северного Ледовитого океана. Уменьшение водных ресурсов будет происходить в регионах, где водообеспеченность оказывается предельной или недостаточной уже в настоящее время, — в южных районах Европейской Территории России и сопредельных стран, включая водосборы Днепра, Дона и Днестра (вследствие уменьшения годовых осадков и увеличения испарения весной и летом).

**Солнечная радиация.** Увеличение солнечной энергии в первой половине XXI века будет происходить преимущественно в летний период на Европейской части России и в южных районах Западной Сибири. К середине века этот прирост составит до 2 % преимущественно в Южном ФО и в центральных областях Европейской части России. Некоторое увеличение солнечной радиации также ожидается весной и осенью на юго-западе России. В другие сезоны на большей части территории России следует ожидать уменьшения солнечной радиации за счет увеличения облачности. Наиболее заметное снижение (до 3 %) ожидается на побережье северных морей и Чукотке.

**Скорость ветра.** Наиболее вероятен некоторый рост скорости ветра зимой вблизи прибрежной зоны на Дальнем Востоке и осенью на северо-западе России. Отметим невысокую надежность этой

оценки (изменения модуля скорости ветра в приземном слое атмосферы варьируются в достаточно узком диапазоне  $\pm 1$  м/с).

В свете вышеперечисленных ожидаемых изменений климатических характеристик обратим внимание на следующие факторы, сказывающиеся на структуре производства и расходования энергии на территории России.

**Тепловая и атомная энергетика.** В целом выработка энергии на АЭС и ТЭС в меньшей степени, по сравнению с ГЭС, гелио- и ветроустановками, подвержена прямому воздействию изменения климата. Тем не менее, важно принимать во внимание возможное изменение повторяемости высоких температур воздуха, вызывающих перегрев энергоблоков, и штилей, способствующих загрязнению воздуха, а также необходим мониторинг опасных явлений погоды (смерчей, пыльных бурь и т. д.). Проведенное нами исследование показало, что прогнозируемые изменения климатических характеристик не приведут к заметному ухудшению экологической ситуации (росту загрязнения атмосферного воздуха продуктами выбросов ТЭС).

**Гидроэнергетика.** Ожидаемое в ближайшее десятилетие изменение притока воды в существующие водохранилища большинства ГЭС России в основном благоприятно скажется на выработке электроэнергии. Исключение составляют Цимлянская и Новосибирская ГЭС, на которых уменьшение выработки электроэнергии под воздействием изменений климата может составить до 3—7 % от проектной. Ситуация на этих ГЭС может стать критической, если на фоне уменьшения стока будут наблюдаться затяжные маловодья в пределах водосборов их водохранилищ.

В условиях изменения климата нужен пересмотр режима работы отдельных водохранилищ и каскадов для создания оптимальных условий регулирования стока с учетом запросов всех водопользователей и при минимизации возможных неблагоприятных экологических и социальных последствий. К таким последствиям относятся возможное затопление и подтопление населенных пунктов,

увеличение длины полыньи в нижних бьефах, повышенное образование шуги и развитие зажорных явлений на участках рек ниже полыньи, появление трещин и разводов на льду водохранилищ. Увеличение выработки электроэнергии на ГЭС снижает безопасность гидроузлов и повышает риск повреждения и разрушения гидротехнических сооружений.

**Гелиоэнергетика.** Наиболее благоприятными условиями для практического использования энергии солнца обладают южные районы Хабаровского края, Амурской области и Приморский край, а также южные районы Европейской части России. Большим потенциалом обладают также южные районы Алтайского и Красноярского краев, Иркутской области и Забайкалье, где в связи с большим количеством солнечной радиации в зимнее время возможно круглогодичное использование гелиоустановок. Однако для того, чтобы массовое применение гелиоустановок стало рентабельным, необходимо значительное снижение себестоимости производства солнечной электроэнергии. В более северных густонаселенных промышленных областях России (до 60° с. ш.), где весьма актуальным является вопрос об энергосбережении, целесообразно применять солнечные коллекторы в качестве приставок для котельных и ТЭЦ, а также для разработок новых современных проектов «гелиоархитектуры».

**Ветроэнергетика.** В целом на территории России в конце XX столетия отмечено уменьшение скорости ветра на большей части территории, расположенной к западу от Урала, а также на юге Западной Сибири, севере Иркутской области, большей части Республика Саха — Якутия, в Хабаровском крае, на северо-востоке побережья Охотского моря. Модельные оценки показывают, что существенных изменений в приземных скоростях ветра на ближайшие десятилетия и на середину XXI века не прогнозируется. 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 и оно не превысит 10 %. Наибольшим ветроэнергетическим потенциалом обладают районы вдоль берегов Карского, Берингова и Охотского морей. Значительные ресурсы находятся в районах Среднего и Нижнего Поволжья, степных районах Западной Сибири. На побережьях северных морей, в Магаданской области, на Чукотке, на побережьях Охотского моря скорости ветра возрастают до 5—10 %, а на Кольском полуострове до 15 %.

**Особенности ожидаемых сезонных изменений энергетических потребностей.** Население распределено по территории России очень неравномерно, и наибольшее сокращение дефицита тепла ожидается именно в малонаселенных районах с суровыми климатическими условиями, где характерное значение дефицита тепла HDD в течение отопительного периода приближается к величине 10000 °С·сут. При этом осредненное по территории России, с учетом плотности населения, значение дефицита тепла для конца XX в. составляет менее 5000 °С·сут. Относительные изменения величины теплопотребления для крупных регионов России показывают, что в наибольшей степени эффект зимнего потепления отразится на совокупном теплопотреблении в Северо-Западном регионе — в среднем на 20 % по сравнению с современным уровнем. Относительные оценки изменений индекса дефицита холода CDD являются малоинформативными, поскольку в настоящее время обеспеченность кондиционерами населения России крайне низкая. Анализ абсолютных изменений этого индекса показывает, что наиболее заметно потребность в кондиционировании помещений изменится в Южном регионе, где к середине XXI в. в среднем ожидается увеличение индекса CDD до 700 °С·сут. Соответствующее увеличение энергопотребления в летнее время при одновременном уменьшении индекса HDD до величины 2200—2300 °С·сут. существенно изменит внутригодовой ход энергопотребления, и его необходимо учитывать при развитии региональных энергетических систем.

Таким образом, в новой версии Энергетической стратегии России должны найти отражение вероятные грядущие изменения температурного режима, режима осадков и других характеристик

климата в течение ближайших десятилетий. В связи с этим целесообразно рассмотреть следующие меры.

## **10. Рекомендации по адаптации к изменениям климата на федеральном и региональном уровнях**

**Потребление и выработка энергии.** Климатически обусловленное изменение энергопотребления в теплый и холодный сезоны сильно различается в различных регионах России.

Пространственное обобщение оценок, выполненное с учетом неравномерности размещения населения, показывает, что по сравнению с существующим уровнем наибольшее 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 в Южном регионе (около 150 градусо-суток/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. эта тенденция приведет к заметному изменению внутригодовой структуры энергопотребления и увеличению риска возникновения критических ситуаций.

На большей части территории России потенциальное уменьшение энергопотребления на обогрев зданий является доминирующим. Однако, 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, необходимо широкое внедрение современных технологий производства энергии.

Полученные количественные оценки необходимо учесть при составлении перспективных прогнозов динамики энергопотребления

(до 2050 г.), а также при обосновании экономической эффективности проведения конкретных мероприятий по технологической модернизации энергетики и развитию систем когенерации энергии.

**Гидроэнергетика.** В целях адаптации гидроэнергетики к происходящим и ожидаемым в перспективе климатическим изменениям представляется наиболее целесообразным принятие следующих мер:

1. Пересчет максимальных проектных расходов и уровней воды с учетом данных за последние годы. Внесение в СНиП строительства гидротехнических сооружений изменений, предусматривающих повышение их устойчивости к росту нагрузок, а также изменений в Правила регулирования ГЭС и их каскадов в связи с увеличением стока и скорости снеготаяния весной.

2. Пересмотр регулирования работы ГЭС и сложившихся сроков ремонта (в связи с увеличением зимнего стока).

3. Разработка комплексных мероприятий для регулирования высоких вод, обвалования территорий, берегозащитных мероприятий и т. д.

4. Выполнение подробной количественной оценки влияния на функционирование ГЭС происходящих изменений водного режима. Очевидно, наиболее перспективный подход к оценке выработки энергии на ГЭС в условиях изменения климата состоит в моделировании многолетних рядов составляющих водного баланса конкретных водохранилищ при различных климатических сценариях и соответствующих водно-энергетических расчетах по этим рядам.

**Возобновляемые источники энергии.** География распределения возобновляемых источников энергии на территории России такова, что во многих субъектах Российской Федерации имеются те или иные виды таких источников, при комплексном использовании которых удаленные неэлектрифицированные потребители могут быть в значительной степени обеспечены местными энергоресурсами.

Районы Крайнего севера (от Кольского полуострова до Камчатки), прибрежные районы Тихого океана, в которых ежегодно тратится более половины бюджета на топливо и его завоз, обладают значительными энергоресурсами ветра. Их использование позволит обеспечить устойчивое тепло- и электроснабжения населения и производства.

Зоны с благоприятными климатическими условиями для использования солнечной энергии (ежегодный приход солнечной радиации более 1000 кВт·ч на м<sup>2</sup>) составляют около половины территории России, где проживает около 49 млн сельских жителей и производится около 60 % валового объема сельскохозяйственной продукции. Частые отключения потребителей от ФОРЭМ (федеральный оптовый рынок энергии и мощности) в этих районах в связи с необходимостью экономии энергетических ресурсов, перерывы в энергоснабжении из-за аварийных отключений наносят ущерб, оцениваемый миллиардами долларов в год. Использование в этих районах солнечных приставок к существующим котельным, солнечных систем горячего водоснабжения позволит за короткий срок повысить надежность энергоснабжения, снизить потери в сетях, предотвратить ущербы от аварийных и ограничительных отключений, снизить вредные выбросы от традиционных энергетических установок в отдельных городах и населенных пунктах со сложной экологической обстановкой, а также в местах массового отдыха населения. В России необходимо восстановление разрушенной советской системы развития солнечного теплоснабжения. Необходима доработка существующих государственных стандартов на оборудование гелиоустановок.

Развитию энергетики на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) в России препятствует целый комплекс барьеров психологического, экономического, законодательного, информационного и технического аспектов.

Приоритет принадлежит психологическому аспекту, связанному с привычкой к централизованным поставкам топлива, тепла и

электричества, а также с традиционными представлениями об обеспеченности России всеми видами органического топлива, что создает иллюзию невозможности энергетического кризиса.

**Потенциал режима загрязнения атмосферы.** При решении задач развития в России теплоэнергетики на период до 2050 г. разработку мероприятий по охране воздушного бассейна от загрязнения следует проводить на основе требований действующего нормативного документа по расчету загрязнения атмосферного воздуха без изменения приведенных в этом документе коэффициентов.

*Исследование выполнено при поддержке Фонда Процветания при Посольстве Великобритании в Российской Федерации.*

## СЛОВАРЬ И СОКРАЩЕНИЯ

**МГЭИК** — Межправительственная группа экспертов по изменениям климата (МГЭИК), созданная Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой по окружающей среде ООН (ЮНЕП).

**МОЦАО** — Модели общей циркуляции атмосферы и океана, лежащие в основе современных прогнозов климата.

**CMIP5** — проект сравнения объединенных моделей, фаза 5 (Coupled model intercomparison project, phase 5).

**ERA** — реанализ Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF Reanalysis). Регуляризованные во времени и пространстве с помощью гидродинамической модели анализа данных наблюдений за климатом на поверхности Земли и из космоса.

**Тонна условного топлива (т у. т.)** — единица измерения энергии, равная  $2,93 \times 10^{10}$  Дж; определяется как количество энергии, выделяющееся при сгорании 1 тонны топлива с теплотворной способностью 7000 ккал/кг (соответствует типичной теплотворной способности каменного угля).

**Нефтяной эквивалент.** Международное энергетическое агентство (IEA) приняло за единицу нефтяной эквивалент, обычно обозначаемый аббревиатурой ТОЕ (*Tonne of oil equivalent*). Одна тонна нефтяного эквивалента равняется 41,868 ГДж или 11,63 МВт·ч.

**Установленная мощность** — сумма номинальных мощностей электрических машин одного вида (например, генераторов), входящих в состав промышленного предприятия или электрической установки. Выражается в единицах активной мощности (Вт).

**Номинальная мощность** — мощность, для работы с которой в номинальном режиме машина предназначена заводом-изготовителем.

**Теоретический (валовой) гидроэнергетический потенциал** — полная теоретическая сумма энергии только речного стока.

**Технический гидроэнергетический потенциал** — часть теоретического гидроэнергетического потенциала речного стока, которая технически может быть использована или уже используется; технический потенциал достаточно постоянен и может применяться лишь в зависимости от существенных изменений способов производства электроэнергии на ГЭС.

**Экономический гидроэнергетический потенциал** — часть технического гидроэнергетического потенциала, использование которого является экономически эффективным.

**Индекс потребления топлива для заданного периода** — это сумма абсолютных величин отклонений среднесуточных значений температуры от порога комфортности (18,3 °С) за те сутки рассматриваемого периода времени, когда температура была ниже 8 °С.

**Загрязняющее вещество** — атмосферная примесь, содержащаяся в воздухе в количествах, превышающих фоновые значения, которая может вызвать негативные последствия при воздействии на окружающую среду и/или здоровье людей.

**Розовая концентрация** — концентрация атмосферной примеси, соответствующая времени осреднения 20—30 мин.

**Предельно допустимая концентрация** — утвержденный в законодательном порядке санитарно-гигиенический норматив для концентрации загрязняющего вещества, при непревышении которого

можно ожидать отсутствия патологических изменений и заболеваний, устанавливаемых в любые сроки жизни настоящего и последующих поколений.

**Коэффициент турбулентности** — коэффициент пропорциональности между турбулентным потоком атмосферной примеси и градиентом ее средней концентрации.

**Функция распределения случайной величины  $X$**  — функция  $F(x)$ , описывающая зависимость вероятности того, что случайная величина  $X$  не превосходит заданного значения  $x$  (т. е. вероятности выполнения неравенства  $X \leq x$ ) от этого значения  $x$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ итогов деятельности электроэнергетики за 2011 год. Прогноз на 2012 год (2012). — М. 85 с.

Аналитический бюллетень «Электроэнергетика: тенденции и прогнозы. Выпуск 1. Итоги 2010 г.» (2011). — М.: РИА-Аналитика. Центр экономических исследований.

Аналитический бюллетень «Электроэнергетика: тенденции и прогнозы. Выпуск 5. Итоги 2011 г.» (2012). — М.: РИА-Аналитика. Центр экономических исследований.

Атлас ветров России (2000). / Под ред. А. Н. Страхова и др. — М.: Можайск-Терра. 560 с.

*Бальзаминов М. И., Елистратов В. В.* (2008). Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования. — Самара: ООО «Офорт». Самарский государственный архитектурно-строительный Университет. 331 с.

*Борисенко М. М. и др.* (2008). Оценка ветроэнергетических ресурсов на территории России // Труды ГГО. Вып. 557. С. 53—66.

*Васильев Ю. С., Безруких П. П., Елистратов В. В., Сидоренко Г. И.* (2008). Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России. — СПб: СПбГТУ. Изд-во Политехнического университета. 250 с.

*Говоркова В. А., Катцов В. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В., Школьник И. М.* (2008). Климат России в XXI веке. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России. Часть 2 // Метеорология и гидрология. № 8. С. 5—19.

Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Часть 1. Реки и каналы. 1980—2010 гг. — Росгидромет.

Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Часть 2. Озера и водохранилища. 1980—2010 гг. — Росгидромет.

*Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* (2003). Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Вып. 39. № 2. С. 66—185.

*Елистратов В. В., Акентьева Е. М., Борисенко М. М., Кобышева Н. В., Сидоренко Г. И., Стадник В. В.* (2010). Климатические факторы возобновляемых источников энергии. — СПб: Наука. 235 с.

Климат России (2001). / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб: Гидрометеоздат. 655 с.

*Малик Л. К.* (2005). Возможное влияние глобального потепления климата на водные ресурсы и объекты энергетики // Гидротехническое строительство. № 5.

*Малик Л. К.* (2005). Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. — М.: Наука. 354 с.

*Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В.* (2008а). Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного воздействия на климат и новые возможности оценки его изменений на территории России // Метеорология и гидрология. № 6. С. 5—19.

*Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Спорышев П. В., Школьник И. М., Шнееров Б. Е.* (2008б). Климат России в XXI веке. Часть 3. Оценка будущих изменений климата России по ансамблю моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 // Метеорология и гидрология. № 9. С. 5—19.

*Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Надёжина Е. Д., Павлова Т. В., Спорышев П. В., Школьник И. М., Шнееров Б. Е.* (2008). Изменения климата России в XXI в. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. А. И. Бедрицкого и др. — Росгидромет. Т. 1. С. 174—213. ([www.voeikovmgo.ru/ru/otsenochnyiy-doklad-izmenenie-klimata-na-territorii-rossiyskoy-federatsii-4.html](http://www.voeikovmgo.ru/ru/otsenochnyiy-doklad-izmenenie-klimata-na-territorii-rossiyskoy-federatsii-4.html)).

*Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч.* (2003). Оценка возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Вып. 39. № 2. С. 150—165.

Национальный Атлас России (2007). / Под ред. А. В. Бородко.

*Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. И.* (2008). Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М.: Атмограф. 584 с.

Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. (2008). — ОАО ПАО «ЕЭС России». 90 с.

Отчет о функционировании ЕЭС России в 2011 году. — ОАО «СО ЕЭС». <http://www.so-ups.ru>.

*Катцов В. М., Кобышева Н. В., Мелешко В. П. и др.* (2011). Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу / Под ред. д. ф.-м. н. В. М. Катцова, д. э. н., проф. Б. Н. Порфирьева. Росгидромет. — М.: Д'АРТ. 252 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1 (2008). — М.: Росгидромет. 225 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 2 (2008). — М.: Росгидромет. 227 с.

*Резниковский А. М., Рубинштейн М. И.* (1995). Оценка влияния глобального потепления климата на гидроэнергетику // Водные ресурсы. Т. 22. № 5. С. 535—543.

Рейтинг регионов по уровню энергодостаточности (2011). — М.: РИА-Аналитика. Центр экономических исследований. <http://www.ria.ru>.

Рейтинги устойчивого развития регионов Российской Федерации (2011). — М.: Интерфакс. 96 с.

Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами (2008). / Под ред. д. геогр. н., проф. Н. В. Кобышевой. — СПб. 336 с.

*Савин В. К.* (2011). Строительная физика. Энергоэкономика. — М.: Лазурь. 418 с.

*Стадник В. В., Шанина И. Н.* (2008). Оценка гелиоэнергетических ресурсов Российской Федерации // Метеоспектр. № 2. С. 128—133.

Статистический сборник. Регионы России. Социально-экономические показатели. (2007). — М.: Федеральная служба государственной статистики.

*Шетов В. Х., Бутузов В. А.* (2008). Возобновляемые источники энергии. Региональный опыт Краснодарского края. // Энергосбережение. № 6. С. 81—83.

*Шикломанов И. А., Линз Г.* (1991). Влияние изменений климата на гидрологию и водное хозяйство // Метеорология и гидрология. Вып. 4. С. 51—64.

*Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю.* (2002). Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы. / В кн.: Изменения климата и их последствия. — СПб.: Наука. С. 52—164.

*Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю.* (2007). Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России. / В кн.: Гидрологические последствия изменения климата. — Новосибирск. С. 192—204.

*Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., Шалыгин А. Л. и др.* (2008). Прогнозные оценки изменений стока на основе климатических сценариев. / В сб.: Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. — СПб: ГГИ. С. 442—464.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. (2009). — М.: Министерство промышленности и энергетики РФ.

Электронный ресурс:

<http://interfax-era.ru/>

[http://interfax-era.ru/sites/interfax-era/files/page/reiting\\_eco\\_2.pdf](http://interfax-era.ru/sites/interfax-era/files/page/reiting_eco_2.pdf)

<http://minenergo.gov.ru/>

[http://riarating.ru/regions\\_rankings/20110905/430543750.html](http://riarating.ru/regions_rankings/20110905/430543750.html)

[http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2012/ues\\_rep2011.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2012/ues_rep2011.pdf)

<http://www.gosbook.ru/node/58176>

*Chapman W. L. and Walsh J. E.* (2007). Simulation of Arctic temperature and pressure by global coupled models // *J. Climate*. V. 20. P. 609—632.

*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.

*Elguindi N., Giorgi F.* (2007). Simulating future Caspian sea level changes using regional climate model outputs // *Climate Dynamics*. V. 28. P. 365—379.

*Genikhovich E. L., Osipova G. I.* (1984). On Determination of Turbulent Diffusivity Using Standard Meteorological Observation Data // *Trudy GGO (Transactions of the Main Geophys. Observ.)*. V. 479. P. 62—69.

*Gleckler P. J., Taylor K. E. and Doutriaux C.* (2008). Performance metrics for climate models // *J. Geophys. Res.* V. 113. D06104. doi: 10.1029/2007JD008972.

*Groisman P. Ya., Genikhovich E. L.* (1997). Assessing Surface-Atmosphere Interactions Using Former Soviet Union Standard Meteorological Network Data. Part 1 // *Method. Journal of Climate*. V. 10. № 9. P. 2154—2183.

Guideline for Calculation of Concentrations of Atmospheric Pollutants Contained in the Emissions of Industrial Enterprises. OND-86. (1987). — L.: Gidrometizdat. 92 p. (In Russian).

*Hagemann S. and Dümenil L.* (1996). A parameterization of the lateral waterflow fort the global scale // *Climate Dyn.* V. 14. P. 17—31.

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

*Isaac M., Detlef P., van Vuuren D.* (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change // *Energy Policy*. V. 37. P. 507—521.

*Kotlyakov V. and Khromova T. (2002). Maps of permafrost and ground ice. / In: Stolbovoi V. and McCallum I. Land Resources of Russia. — Laxenburg, Austria. International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science. CD-ROM. Distributed by the National Snow and Ice Data Center / World Data Center for Glaciology. Boulder.*

*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.*

*Palutikov J. P. (1985). Variability of the wind field over the British Isles // Clim. Monit. V. 14. № 3. P. 72—83.*

*Pierce D. W., Barnett T. P., Santer B. D. and Gleckler P. J. (2009). Selecting global climate models for regional climate change studies // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. V. 106. P. 8441—8446.*

*Sofiev M., Genikhovich E., Keronen P., Vesala T. (2010). Diagnosing the Surface Layer Parameters for Dispersion Models within the Meteorological-to-Dispersion Modeling.*

*Taylor K. E., Stouffer R. J. and Meehl G. A. (2009). A summary of the CMIP5 Experiment Design. [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment\\_design.html](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment_design.html).*

*Taylor K. E., Stouffer R. J. and Meehl G. A. (2011). A summary of the CMIP5 Experiment Design. <http://www.pcmdi.llnl.gov/>.*

*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](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf).*

*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., Palutikov 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. J., 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.*

*World Energy Outlook (2011). Prospects of the Russian energy development. — International Energy Agency. Paris. OECD/IEA. 148 p. (Russian translation).*

УДК 551.58:001.891.57

**Парниковые газы, аэрозоли и климат.** Кароль И. Л., Решетников А. И. Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 5—38.

Приведен обзор исследований последних лет, посвященных измерениям концентраций и эмиссии основных парниковых газов (как в мире, так и на территории Российской Федерации) и модельным оценкам их выбросов в атмосферу. Обсуждается влияние на изменения климата таяния вечной мерзлоты и методов лесопользования. Представлены результаты мониторинга на гидрометеорологической обсерватории Тикси, вышке в поселке Зотино и др. Также рассмотрено влияние на климат аэрозольной составляющей в виде черного углерода.

*Ключевые слова:* диоксид углерода, метан, закись азота, галогенуглероды, черный углерод.

Табл. 5. Рис. 8. Библ. 46.

УДК 551.501.777.001.5

**Атмосферные осадки.** Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М. Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 39—64.

Приводятся оценки наблюдаемых изменений количества выпавших атмосферных осадков на территории России, полученные на основе массива ГГО.

Тренд годовых сумм осадков за период 1976—2010 гг. на большей части территории России положителен и составляет 0,3 мм/мес/10 лет. Максимальное сезонное увеличение сумм осадков приходится на весну –1,6 мм/мес/10 лет.

Климатологически однородные ряды массива ГГО позволили оценить пространственно–временные изменения различных характеристик осадков за весь период инструментальных измерений. За период 1936—2010 гг. отмечается увеличение годовых осадков практически на всей территории ЕЧР, а также в центральной Сибири. В Западной и Восточной Сибири, а также в Прибайкалье, Забайкалье, Приамурье и Приморье преобладают площади с отрицательными значениями трендов. Увеличение годовых осадков наблюдается лишь местами в узкой прибрежной полосе Охотского моря и на Сахалине.

Количество твердых осадков уменьшается на преобладающей части территории России. Жидкие и смешанные осадки увеличиваются практически повсеместно, особенно на ЕЧР.

Продолжительность выпадения осадков сильной и очень сильной интенсивности в целом по России за период 1976—2010 гг. увеличивается.

*Ключевые слова:* количество атмосферных осадков, интенсивность осадков, продолжительность осадков, жидкие, твердые и смешанные осадки.

Табл. 6. Рис. 10. Библ. 18.

**Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения.** Хлебникова Е. И., Махоткина Е. Л., Салль И. А. Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 65—91.

Обсуждаются региональные изменения климатических характеристик облачности и радиационного режима в конце XX — начале XXI столетий. Основной акцент сделан на изучении особенностей изменений, происходящих за последние 10—15 лет. Анализируются тенденции изменения интегральной прозрачности и аэрозольной оптической толщины атмосферы, а также основных составляющих радиационного баланса земной поверхности, оцениваемых по данным сетевых актинометрических наблюдений. Обращается внимание на современные особенности в изменении повторяемости различных форм облачности.

Полученные результаты рассматриваются в контексте выявляемых климатических изменений соответствующих характеристик на глобальном уровне.

*Ключевые слова:* изменение климата, облачность, актинометрические наблюдения, прозрачность атмосферы, аэрозольная мутность, солнечная радиация, прямая радиация, суммарная радиация, радиационный баланс

Рис. 10. Библ. 42.

**Влияние изменений климата на производство и потребление энергии в России.** Школьник И. М., Мелешко В. П., Стадник В. В., Хлебникова Е. И., Акентьева Е. М., Генихович Е. Л., Киселев А. А. Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 92—222.

В последнее время научное сообщество и государственные органы Российской Федерации выражают растущую озабоченность, связанную с ожидаемыми разнонаправленными воздействиями изменений климата в Российской Федерации. Многочисленные исследования показывают, что, согласно прогнозам, наиболее существенное потепление и увеличение осадков ожидаются в восточной части России. Юго-западная часть страны сейчас уязвима перед дефицитом влаги, который будет усиливаться по мере продолжающегося потепления климата. Отопительный период, а также расход топлива значительно изменятся в холодное время года. Изменение климата также повлияет на потенциал возобновляемых источников (солнца и ветра) энергии. Все эти факторы, как ожидается, влияют на Национальный План Развития Энергетической Системы на период до 2030 года. Однако текущий план по развитию энергетики не учитывает возможного влияния будущих изменений климата на энергетику. Цель данной статьи состоит в том, чтобы оценить влияние климата на энергетической системы в различных частях страны и сформулировать план действий по адаптации на основе сценариев изменения климата, полученных по модельным прогнозам.

*Ключевые слова:* изменение климата, модельные прогнозы, энергетические системы, потребление энергии.

Табл. 20. Рис. 48. Библ. 66.

**Greenhouse gases, aerosol and climate.** Karol I. L., Reshetnikov A. I. Proceedings of MGO. 2014. V.573. P. 5—38.

The review of recent studies devoted to both main greenhouse gases concentration and their emissions and also to model estimations of greenhouse gases release into the atmosphere. The influence of both permafrost thawing and forestry methods on climate change is discussed. The monitoring data from Tiksi hydrometeorological observatory, from tower in the region of Zotino village and others are shown. The response of Earth's climate on black carbon aerosol is considered too.

*Keywords:* carbon dioxide, methane, nitrous oxide, halocarbons, black carbon.

Tabl. 5. Fig. 8. Ref. 46.

**Precipitation.** Bogdanova E. G., Gavrilova S. J., Ilyin B. M. Proceedings of MGO. 2014. V.573. P. 65—91.

The article presents the estimations of the observed changes in the amount of precipitation fallen in Russia, obtained on the basis of MGO data archive.

The trend in annual precipitation for the period 1976—2012 on the biggest part of Russia is positive. On average in Russia it is 0,3 mm / month / 10 years. The maximum seasonal increase in precipitation also occurs in the spring and is +1,6 mm / month / 10 years.

Climatologically homogeneous series of MGO allowed to estimate the spatial and temporal changes of various characteristics of precipitation for the entire period of instrumental measurements. During the period 1936—2010 was observed increase in annual precipitation almost throughout the EChR, as well as in central Siberia. In Western and Eastern Siberia, as well as in the Baikal region, Transbaikalia, the Amur and Primorye dominated area with negative trends. The increase in annual precipitation is observed only in some places in the narrow coastal strip of the Sea of Okhotsk and Sakhalin.

The amount of solid precipitation is reduced by the dominant part of the territory of Russia. Liquid and mixed precipitation increasing almost everywhere, especially in the EChR.

Duration of precipitation of strong and very strong intensity in the whole of Russia for the period 1976—2010 increases.

*Keywords:* amount of precipitation, intensity of precipitation, duration of precipitation, solid. liquid and mixed precipitation/

Tabl. 6. Fig. 10. Ref. 18.

**Cloud cover and solar radiation regime over Russia: observed climatic changes.** Khlebnikova E.I., Makhotkina E.L., Sall I.A., Proceedings of MGO. 2014. V.573. P. 39—64.

Regional changes in climatic characteristics of cloudiness and solar radiation regime in the late XX — early XXI centuries are in discussion. The main focus is on the specific features of the changes for the last 10—15 years. Trends in the atmospheric column transparency and aerosol optical thickness of the atmosphere, as well as in the basic components of the surface radiation balance, using the data of actinometric observations, are analyzed. Particular attention to the modern features of changes in the frequency of occurrence for different cloud types is given.

The results are discussed in the context of global climate changes for the characteristics in consideration.

*Key words:* climate change, clouds, actinometric observations, atmospheric transparency, aerosol turbidity, solar radiation, direct radiation, global radiation, surface radiation budget

Fig. 10. Ref. 42.

**Impact of climate change on energy production and consumption in Russia.** Shkolnik I. M., Meleshko V. P., Khlebnikova E. I., Akentieva E. M., Genikhovich E. L., Kiselev A. A. Proceedings of MGO. 2014. V.573. P. 92—222.

Growing concern about expected multi-valued impacts of climate change in Russian Federation was recently expressed by scientific community and governmental bodies. Numerous studies show that most significant warming and precipitation increase are projected for the eastern part of Russia. The south-western part of the country is vulnerable to dry condition and water stress that may further be amplified as climate warming continues. Heating period as well as fuel consumption will change significantly during cold season. Climate change will also impact potential of renewable (solar and wind) energy. All these factors are expected to affect national plan of energy system development for the period until 2030. However, the plan does not account for possible implication of climate change. This paper objectives are to evaluate climate impact on energy system in different parts of the country and to formulate action plan for adaptation based on climate change scenario derived from model projections.

*Key words:* climate change, model projections, energy system, energy consumption.

Tab. 20. Fig. 48. Ref. 66.

