

# ОЦЕНОЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



## Техническое резюме



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И  
МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

2008

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
(РОСГИДРОМЕТ)**

**ОЦЕНОЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ  
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

***ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕЗЮМЕ***

Москва — 2008

# ОЦЕНОЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

## Техническое резюме

УДК 551.583 (470+570)  
ББК 19.3.4

**Научно-координационный комитет по подготовке “Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации”:**

Руководитель Росгидромета А. И. Бедрицкий (председатель), В. Г. Блинов, Д. А. Гершинкова (ответственный секретарь), Г. С. Голицын, В. П. Дымников, Ю. А. Израэль, В. М. Катцов, В. М. Котляков, В. П. Мелешко, В. И. Осипов, С. М. Семенов

**Головные научные учреждения Росгидромета по подготовке Доклада:**

Государственное учреждение “Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова” (ГУ “ГГО”)

Государственное учреждение Институт глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук (ГУ ИГКЭ Росгидромета и РАН)

Данное Техническое резюме представляет в технических терминах основные оценки, которые получены в докладе в отношении изменений климата и их последствий на территории России, наблюдаемых в XX веке и ожидаемых в XXI веке. Материал организован по тематическим разделам. В части последствий он представлен хронологически — сначала идет материал о произошедших изменениях в XX веке, а затем — об ожидаемых изменениях в XXI веке.

Разделы данного Технического резюме имеют сплошную нумерацию. В тексте даны основные иллюстрации из доклада — рисунки и таблицы. Они нумеруются следующим образом: после букв ТР (Техническое резюме) дается двойной номер — первая цифра соответствует номеру раздела ТР, а вторая после точки — порядковому номеру внутри раздела. Все литературные источники и иные источники информации, на которых базируются приведенные в Техническом резюме основные оценки, представлены в тексте доклада (т. I и т. II).

Рассчитано на специалистов — экспертов в области изменений климата и их последствий, адаптаций к меняющемуся климату и регулирования антропогенного воздействия на климат, на климатологов и экологов.

**В подготовке Технического резюме участвовали:**

*В. П. Мелешко, руководитель Рабочей группы I “Изменения климата на территории Российской Федерации”,*

*С. М. Семенов, руководитель Рабочей группы II “Последствия изменений климата на территории Российской Федерации”*

**и ведущие авторы доклада:**

*О. А. Анисимов, Ю. А. Анохин, Л. И. Болтнева, Е. А. Ваганов, Г. В. Груза, А. С. Зайцев, А. Н. Золотокрылин, Ю. А. Израэль, Г. Э. Инсаров, И. Л. Кароль, В. М. Катцов, Н. В. Кобышева, А. Г. Костяной, А. Н. Кренке, А. В. Мещерская, В. М. Мирвис, В. В. Оганесян, А. В. Пчелкин, Б. А. Ревич, А. И. Решетников, В. А. Семенов, О. Д. Сиротенко, П. В. Спорышев, Ф. С. Терзиев, И. Е. Фролов, В. Ч. Хон, А. В. Цыбань, Б. Г. Шерстюков, И. А. Шикломанов, В. В. Ясюкевич*

# Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	5
НАБЛЮДАЕМЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА .....	6
1. Основные особенности климата России .....	6
2. Система наблюдений за климатом .....	10
3. Наблюдаемые изменения климата .....	13
4. Изменения содержания парниковых газов и аэрозоля в атмосфере .....	19
5. Климатические модели .....	24
6. Антропогенный вклад в изменение климата .....	31
7. Ожидаемые изменения климата на территории России в XXI веке .....	36
ПОСЛЕДСТВИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ И ОЖИДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА .....	47
8. Природные экосистемы суши .....	47
9. Криосфера суши .....	55
10. Моря .....	59
11. Технические системы .....	65
12. Водные ресурсы, сельское хозяйство, здоровье населения .....	71
13. Последствия экстремальных метеорологических явлений .....	79
НЕОБХОДИМЫЕ ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	85
<i>Приложение 1.</i> Используемые сокращения .....	88
<i>Приложение 2.</i> Сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли, представленные МГЭИК в Специальном докладе по сценариям выбросов .....	89



## Введение

---

Данные наблюдений показывают, что в последние десятилетия XX века — начале XXI века климат Земли заметно изменился. Появились убедительные научные доказательства того, что главной причиной этих изменений стала хозяйственная деятельность человека. Эта деятельность сопровождается сжиганием ископаемого органического топлива в возрастающих объемах, а также сведением лесов с целью расширения сельскохозяйственных угодий, что приводит к увеличению антропогенной эмиссии парниковых газов (ПГ). Парниковые газы накапливаются в атмосфере и оказывают значительное влияние на ее радиационный режим — происходит усиление парникового эффекта, ведущее к потеплению в приповерхностном слое атмосферы и к изменению глобального климата в целом.

Результаты научных исследований указывают на то, что при продолжении увеличения концентраций ПГ в атмосфере соответствующие изменения глобального климата могут привести к нежелательным и даже опасным последствиям для ряда природных и хозяйственных систем, а также для здоровья человека в отдельных регионах мира. Некоторые из этих последствий могут наступить уже в текущем столетии. Об этом свидетельствуют, в частности, выводы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Изменения климата на территории России также могут иметь многочисленные и потенциально серьезные последствия для природного комплекса, экономики и здоровья населения. Для получения объективных оценок ущерба или же выгоды от изменения климата, а в более широком плане — для выработки научно обоснованной климатической политики страны — необходимы суммирование, систематизация и анализ информации об изменениях климата и их последствиях на ее

территории. Это является целью настоящего Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (далее ОД). В нем рассмотрены следующие вопросы:

- наблюдаемые и ожидаемые изменения климата на территории России;

- их последствия для природных и хозяйственных систем, здоровья населения, а также возможности адаптаций;

- необходимые дальнейшие исследования.

Оценки и выводы, содержащиеся в докладе, приведены лишь в отношении тех природных и хозяйственных систем и процессов, которые к настоящему времени достаточно изучены и данные о которых, позволяющие делать обобщения в масштабе страны или же ее крупных регионов, имеются в научной литературе или же получены государственными службами наблюдений.

Вследствие значительных размеров территории России, ее географического положения и разнообразия климатов реакция природных и хозяйственных систем на изменения климата может весьма различаться в разных регионах. Поэтому значительное место в докладе уделено региональным аспектам.

В Приложении 1 дается перечень используемых сокращений, а в Приложении 2 — общее описание четырех семейств сценариев глобального социально-экономического развития, в рамках которых МГЭИК были разработаны сценарии антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему через эмиссии парниковых веществ в атмосферу, а также изменение в землепользовании и лесном хозяйстве. Эти сценарии использованы в ОД при описании ожидаемых изменений климата в XXI веке и их последствий для природных и хозяйственных систем, здоровья населения.

**НАБЛЮДАЕМЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

**1. Основные особенности климата России**

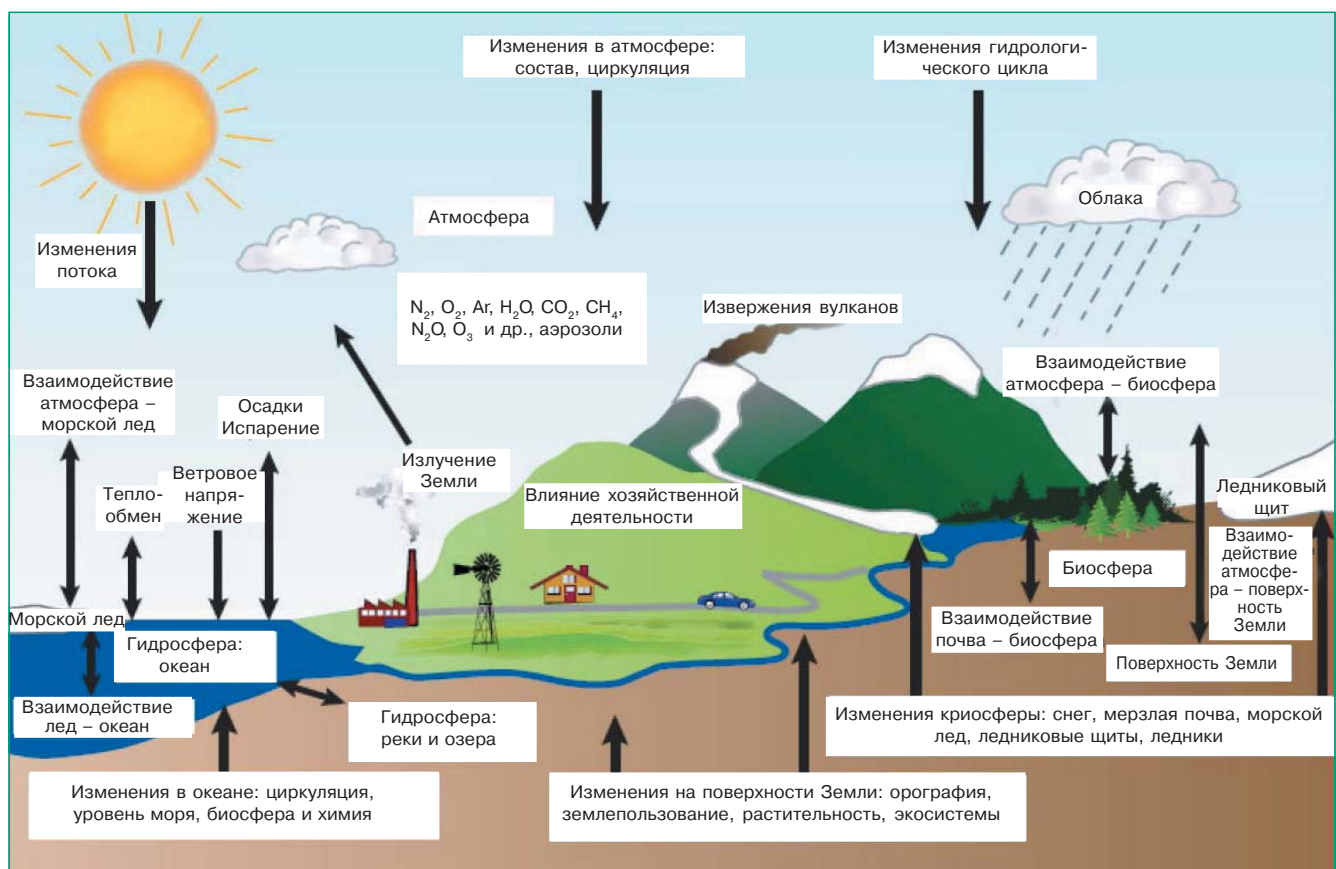
Климатическая система Земли включает пять основных компонентов: атмосферу, гидросферу, криосферу, деятельный слой почвы и биосферу, которые сложным образом взаимодействуют между собой (рис. TP1.1). Климатическая система эволюционирует под влиянием внутренней динамики своих компонентов, их взаимодействия, а также под действием внешних причин — извержения вулканов, изменения солнечной активности, антропогенного изменения газового состава атмосферы и изменения землепользования в результате хозяйственной деятельности.

Климат в широком смысле есть обобщение (осреднение) состояний погоды. Он представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и частот явлений за выбранный период времени. Для оценки параметров современного

климата используются данные за 20–30 лет конца XX века.

Россия расположена в средних и высоких широтах Евразии, и с некоторыми оговорками ее можно считать северной страной. Большие размеры территории, неоднородность подстилающей поверхности формируют климатический режим, отличающийся большим разнообразием. По классификации Алисова на территории России расположены зоны с арктическим, субарктическим, умеренным и даже субтропическим климатами. Наряду с преобладанием континентального типа климата, в большинстве зон есть морской и переходный от континентального к морскому типы климатов. С одной стороны, примерно 70% территории страны занимает многолетняя мерзлота, половину года на большей части территории удерживается отрицательная температура воздуха. С другой стороны, в южной части страны летом часто возникают засухи, суховеи, пыльные бури и лесные пожары.

**Температурный режим** России характеризуется большими контрастами в зимний период. В Восточной Сибири зимний антициклон, являющийся чрезвычайно устойчивым барическим образованием, способствует формированию на северо-востоке России полюса холода со среднемесячной тем-



**Рис. TP1.1.** Схематическое представление составляющих климатической системы, основных климатообразующих процессов и их взаимодействия.



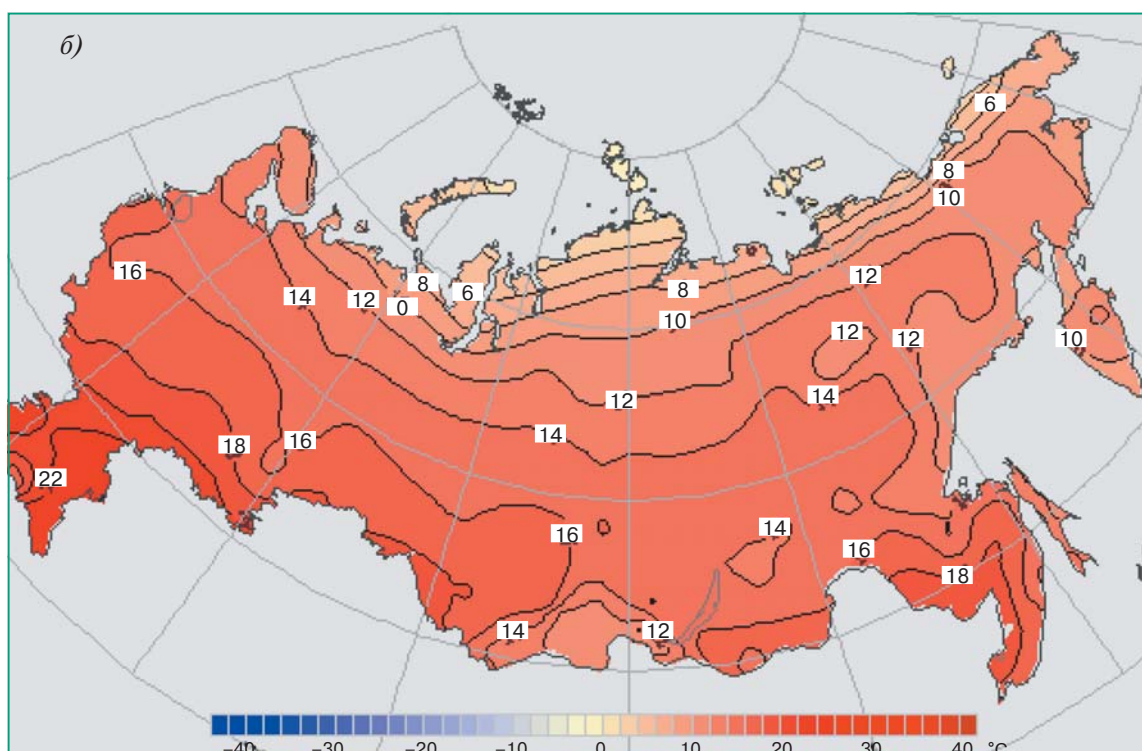
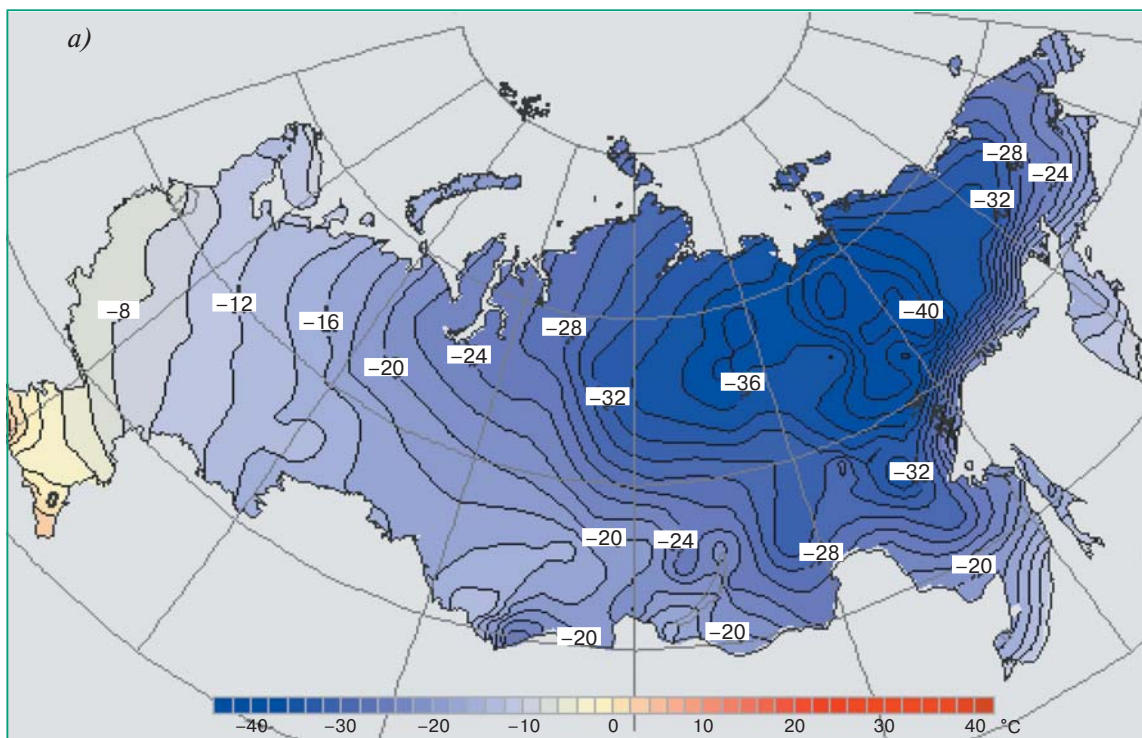


Рис. TP1.2. Средняя температура приземного воздуха (°C) зимой (а) и летом (б) за период 1961–1990 гг.



пературой зимой  $-42^{\circ}\text{C}$  (рис. TP1.2a). Средний минимум температуры зимой составляет там  $-55^{\circ}\text{C}$ . На Европейской территории России (ЕТР) под влиянием переноса теплого атлантического воздуха средняя температура за зиму изменяется от  $-2\dots-4^{\circ}\text{C}$  на юго-западе, достигая на Черноморском побережье положительных значений, до  $-10\dots-12^{\circ}\text{C}$  в центральных областях.

Средняя за лето температура изменяется от  $4-5^{\circ}\text{C}$  на северных побережьях до  $20-22^{\circ}\text{C}$  на юго-западе страны (рис. TP1.2б), где ее средний максимум составляет  $36-38^{\circ}\text{C}$ , а абсолютный максимум достигает  $45^{\circ}\text{C}$ . Особенностью режима температуры России являются ее большие суточные и годовые амплитуды, особенно в сугубо континентальном климате Азиатской территории России (АТР). Годовая амплитуда изменяется от  $8-10^{\circ}\text{C}$  на западном побережье Баренцева моря до  $63^{\circ}\text{C}$  в Восточной Сибири в районе Верхоянского хребта. Размах экстремальных значений температуры на территории России достигает  $90^{\circ}\text{C}$ .

**Атмосферные осадки.** Основная особенность режима осадков — их большое количество в твердом виде почти на всей территории страны в холодное время года. Годовые суммы осадков изменяются от  $3200$  мм на Черноморском побережье Кавказа до  $150$  мм на арктических островах и в засушливой области Юго-Восточного Алтая. Средние месячные суммы осадков зимой сравнительно мало меняются по территории, составляя  $20-40$  мм. Лишь на Черноморском побережье Кавказа и на Камчатке зимой выпадает  $60-100$  мм в месяц (рис. TP1.3a).

Летом месячные суммы осадков, напротив, характеризуются большими различиями по территории. На северном побережье АТР и на побережье Каспийского моря они не превышают  $30$  мм. В Приморье и горных районах Кавказа, Алтая и Саян летом выпадает  $100-140$  мм в месяц (рис. TP1.3б).

**Облачность.** Наиболее пасмурными являются северо-запад ЕТР, побережье Камчатки и тихоокеанских островов. Редко пасмурная погода наблюдается в области сибирского антициклона в Восточной Сибири. Годовой ход характеризуется почти повсеместно минимумом количества облаков летом и максимумом поздней осенью или зимой, за исключением муссонных областей с обратным годовым ходом.

**Ветровой режим.** Определяется сезонным режимом барических центров над Евразией, а также особенностями подстилающей поверхности. С мощным сибирским антициклоном связана зона слабых ветров над обширной территорией северо-восточной части Азии, где средняя скорость ветра в январе составляет  $2-3$  м/с. Годовой максимум скорости ветра здесь приходится на лето, а минимум на зиму. На большей части территории наблюдается обратный годовой ход с преобладанием

зимнего максимума. С сибирским антициклоном в значительной степени связан и муссонный режим на Дальнем Востоке. Важной особенностью географического распределения скорости ветра являются весьма значительные горизонтальные градиенты вблизи побережий северных и дальневосточных морей. Максимальная скорость ветра на побережьях, за исключением побережья Японского моря, достигает  $34$  м/с.

**Гидрология суши.** Ледостав — характерная черта почти всех рек России. На большей части территории России реки имеют преимущественно снеговое питание, и более половины годового стока (от  $50$  до  $75\%$ ) формируется в результате таяния снега. В период снеготаяния начинаются весенние половодья, которые в отдельные годы приводят к крупным наводнениям. Наиболее опасные связаны с образованием заторов и зажоров на реках Восточной Сибири. Основной сток рек Дальнего Востока приходится на лето, когда идут муссонные дожди и тают горные снега. Паводки здесь бывают только в теплое время года, а зимой реки скованы льдом и имеют зимнюю межень.

**Снежный покров.** Еще одной особенностью климата России является длительное залегание снежного покрова на большей части территории страны. Наиболее высокий снежный покров характерен для Предуралья, где средняя высота составляет  $90$  см. В центральных районах ЕТР высота снежного покрова колеблется около  $50$  см. По направлению к югу она уменьшается и на юге становится менее  $20$  см. По мере приближения к горам количество снега увеличивается, достигая высоты  $1,5$  м в отдельных районах. Многоснежностью отличается Камчатка, особенно южная часть полуострова, где средняя высота снежного покрова превышает  $2$  м.

**Многолетняя мерзлота.** К числу особенностей климата России следует отнести наличие огромных пространств, занятых многолетнемерзлыми и сезонно-мерзлыми грунтами (рис. TP1.4). Многолетняя мерзлота занимает почти  $70\%$  площади, толщина ее слоя изменяется от нескольких метров до нескольких сотен метров. Помимо многолетнемерзлых грунтов на значительной территории распространены сезонно-мерзлые грунты, промерзающие до разных глубин в зимнее время в зависимости от климата, ландшафта, состава и структуры почвы.

В зоне сплошной многолетней мерзлоты наблюдается режим сезонного протаивания в теплый сезон. В регионах, характеризующихся режимом сезонного промерзания, в зимние месяцы верхний слой почвы промерзает, а летом оттаивает, смыкаясь с теплыми слоями нижележащих грунтов. В зоне прерывистой и островной мерзлоты в зависимости от ландшафта, свойств грунта и

других особенностей местности может наблюдаться как режим сезонного протаивания, так и режим сезонного промерзания.

**Морской лед.** Северный Ледовитый океан круглый год почти полностью скован льдом. Однако ледяной покров неоднороден. В проливах между его

островами льды спаяны и образуют сплошной ледяной покров. В центральной части океана лед покрывает более 4/5 акватории. Между мощным многолетним льдом и неконсолидированным покровом имеется зона более или менее открытой воды, где лед занимает около 1/10 части поверхности. Зимой

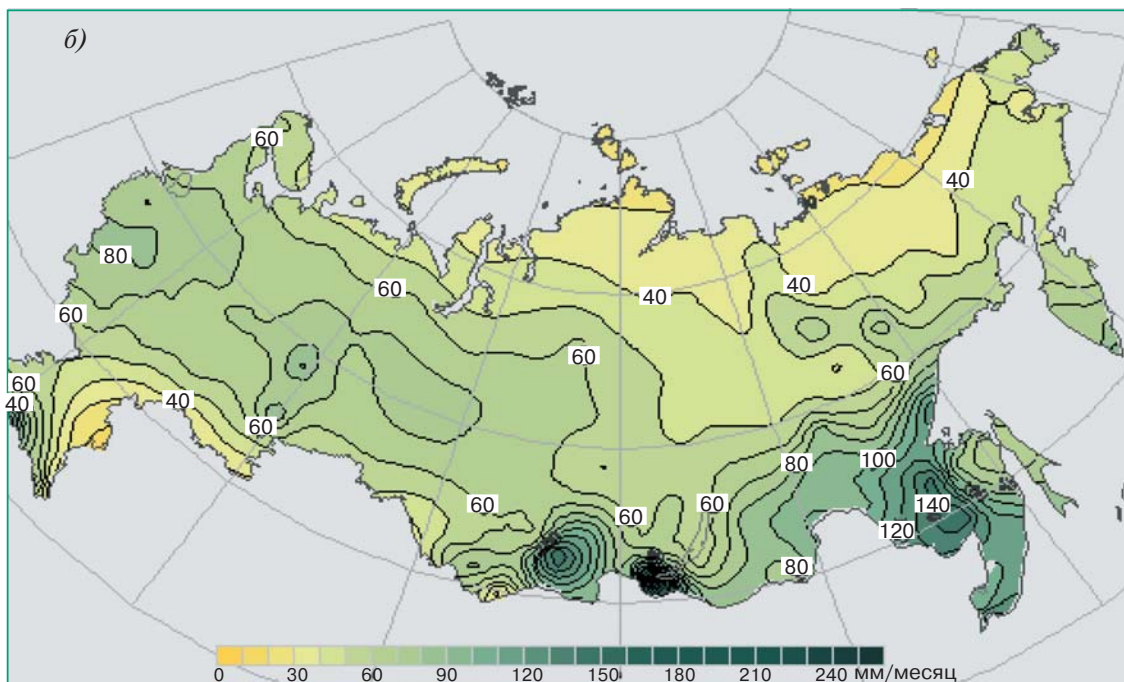
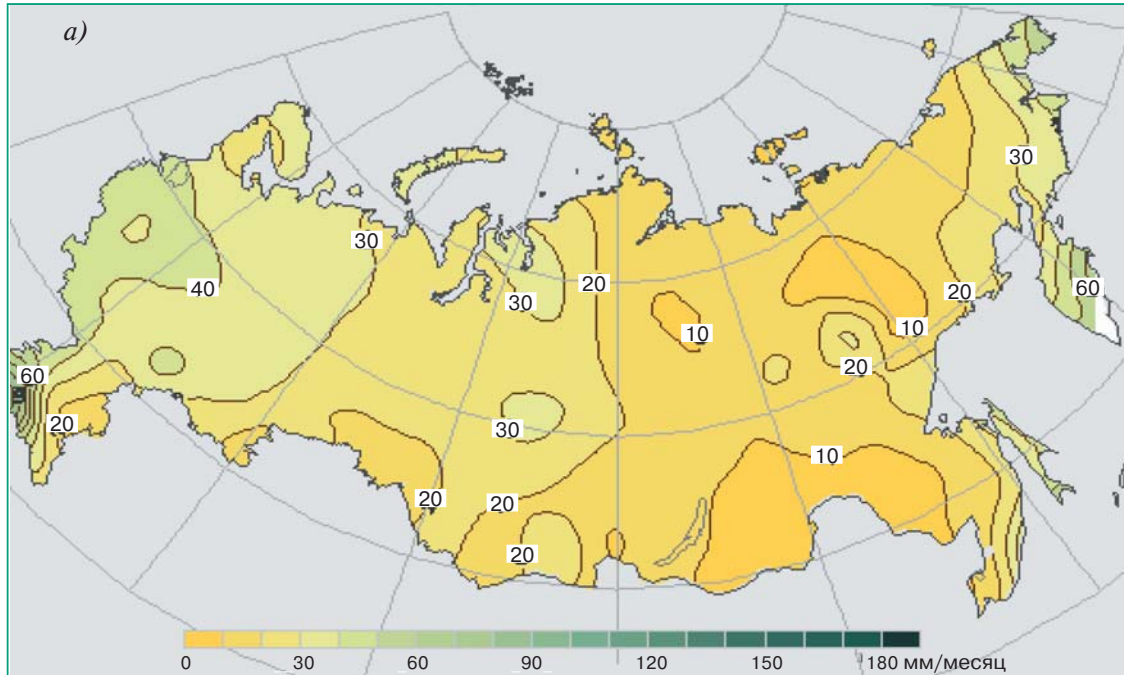
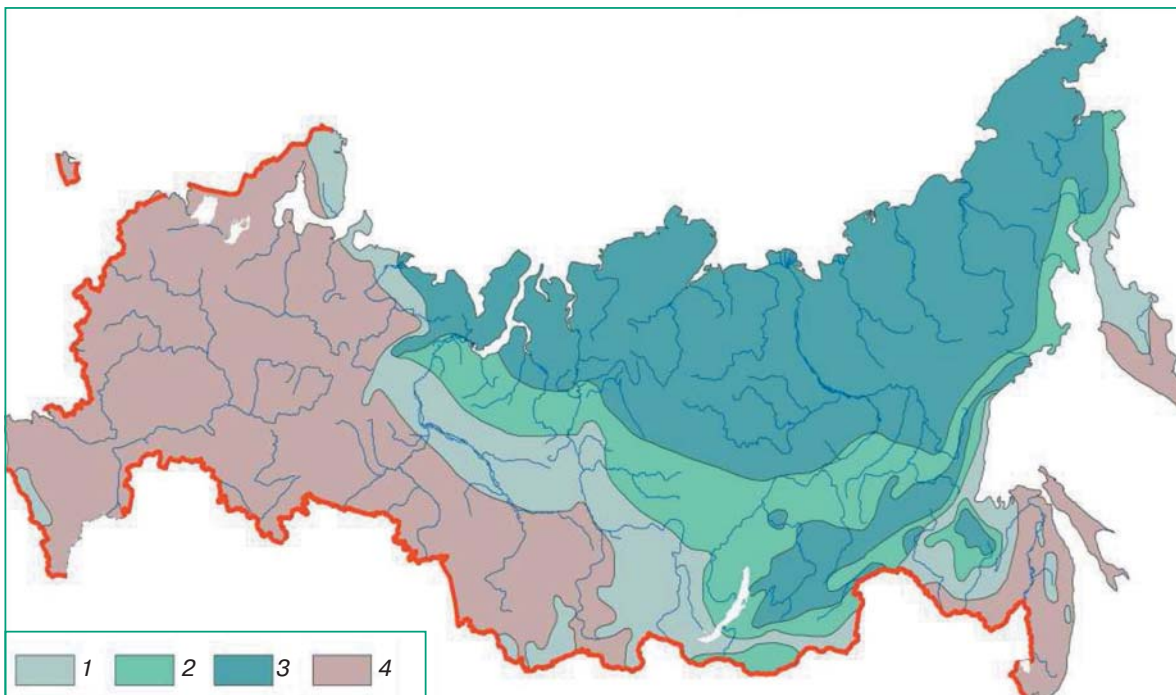


Рис. TP1.3. Средние месячные суммы осадков (мм/месяц) зимой (а) и (б) летом за период 1961–1990 гг.



**Рис. ТР1.4.** Распространение многолетней мерзлоты на территории России. 1) зона с островным (менее 50% площади) распределением многолетнемерзлых грунтов; 2) зона с прерывистым (50–90%) распределением многолетнемерзлых грунтов; 3) зона со сплошным (более 90%) распределением многолетнемерзлых грунтов; 4) зона сезонного промерзания.

(в феврале) центральные районы Северного Ледовитого океана полностью покрыты льдом. В конце лета (сентябрь) ледовитость в Центральной Арктике все еще очень высока, однако прибрежные акватории России почти свободны ото льда.

**Опасные гидрометеорологические явления.** Большая часть территории России меньше, чем многие другие районы земного шара, подвержена опасным метеорологическим явлениям и катастрофам. Наиболее разрушительные тропические циклоны затрагивают лишь прибрежные дальневосточные районы, Сахалин и Камчатку. Смерчи возникают лишь в отдельных, ограниченных по территории, районах: в центральных областях, на Урале, на Черном море вблизи Кавказского побережья, в Алтайском крае и у озера Байкал. Тем не менее на территории России наблюдаются разнообразные опасные метеорологические явления (очень сильный ветер, шквалы, очень обильные и продолжительные дожди, опасные метели, пыльные бури и туманы, град, гололедно-изморозевые отложения, чрезвычайная пожароопасность, сильная жара и мороз).

## 2. Система наблюдений за климатом

Глобальная система наблюдений за климатом является комплексной и базируется на средствах наблюдений, размещенных на суше, морских су-

дах, плавающих буях, зондах, самолетах и спутниках. Следуя рекомендациям Рамочной конвенции ООН по изменению климата, международные организации — ВМО, МОК (ЮНЕСКО), ЮНЕП и МСНС — создали программу *Глобальная система наблюдений за климатом (ГСНК)*, перед которой поставлена задача организовать долговременную систему наблюдений, опираясь на уже существующие системы наблюдений за атмосферой, океаном и поверхностью суши. Система наблюдений позволяет создать базу данных о глобальных и региональных изменениях климата за длительный период времени с целью информирования правительств о происходящих изменениях климата. Основные параметры, которые рассматриваются как важные для наблюдения за климатом, приведены в табл. ТР2.1.

Система наблюдений за климатом России является важной составной частью ГСНК и включает компоненты, описание которых дается ниже.

**Наземная метеорологическая сеть.** Наземная метеорологическая сеть наблюдений за климатом, находящаяся в ведении Росгидромета, включает 454 реперные станции и осуществляет наблюдения за температурой и влажностью воздуха, ветром, атмосферным давлением, температурой почвы, характеристиками облачности, осадками и др. (рис. ТР2.1). В реперную климатическую сеть включены, как правило, длиннорядные, репрезен-



Таблица TP2.1. Основные параметры — индикаторы изменений климата

Среда	Вид наблюдений	Основные климатические характеристики
Атмосфера	Наземные наблюдения	Температура и влажность воздуха, осадки, атмосферное давление, радиационный баланс, скорость и направление ветра
	Наблюдения в верхних слоях атмосферы	Радиационный баланс атмосферы (включая входящую солнечную радиацию на верхней границе атмосферы), температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, облачность
	Наблюдения за составом атмосферы	Диоксид углерода, метан, озон и другие долгоживущие парниковые газы, аэрозоли
Океан	Наблюдения за поверхностью океана	Температура, соленость на поверхности, уровень моря, волнение, ледовитость, течения, концентрация CO <sub>2</sub> , цветовой индекс (для оценки биопродуктивности)
	Глубоководные	Температура, соленость, течения, фитопланктон, концентрация азотных и углеродных соединений
Суша	Расход воды в реках, водопользование, грунтовые воды, снежный покров, уровни воды в озерах, гляциологические наблюдения, зоны вечной мерзлоты, альbedo, земной покров, агрометеорологические наблюдения, индекс поглощенной фотосинтетически активной радиации, листовой индекс, пожароопасность и др.	

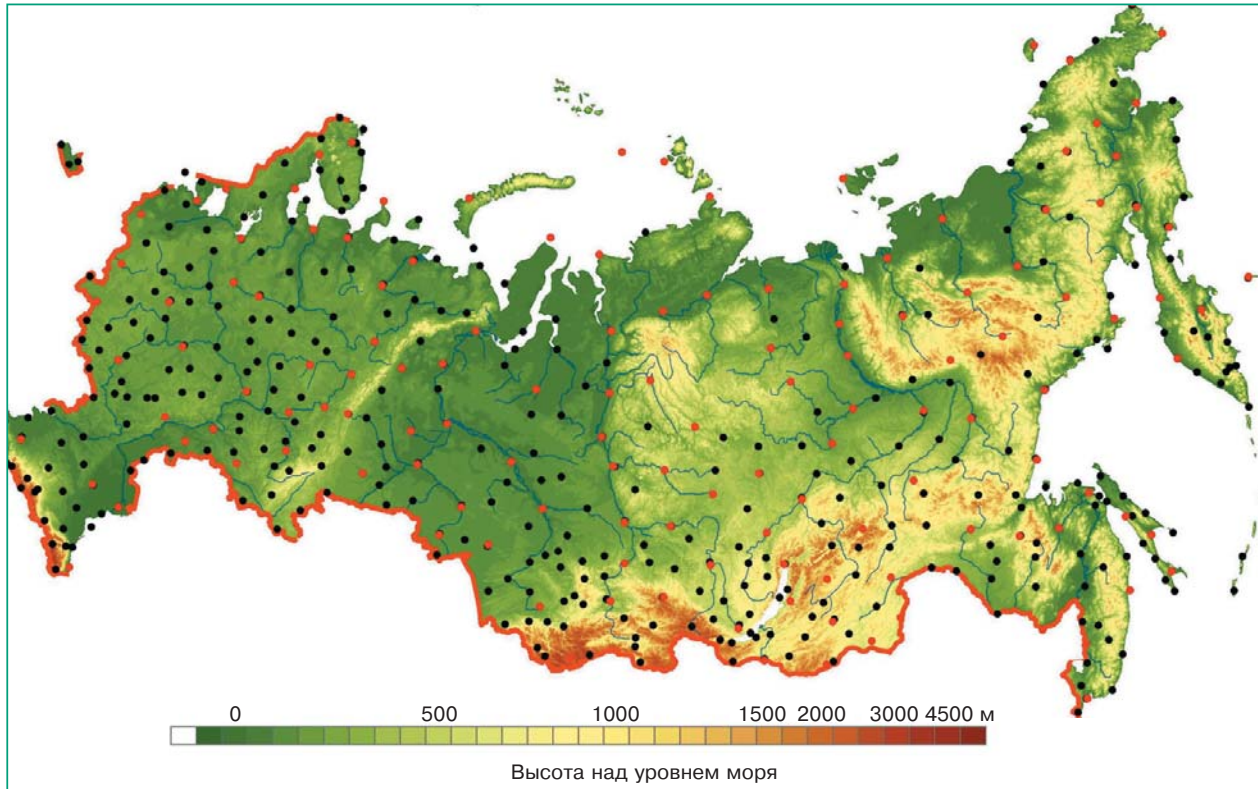
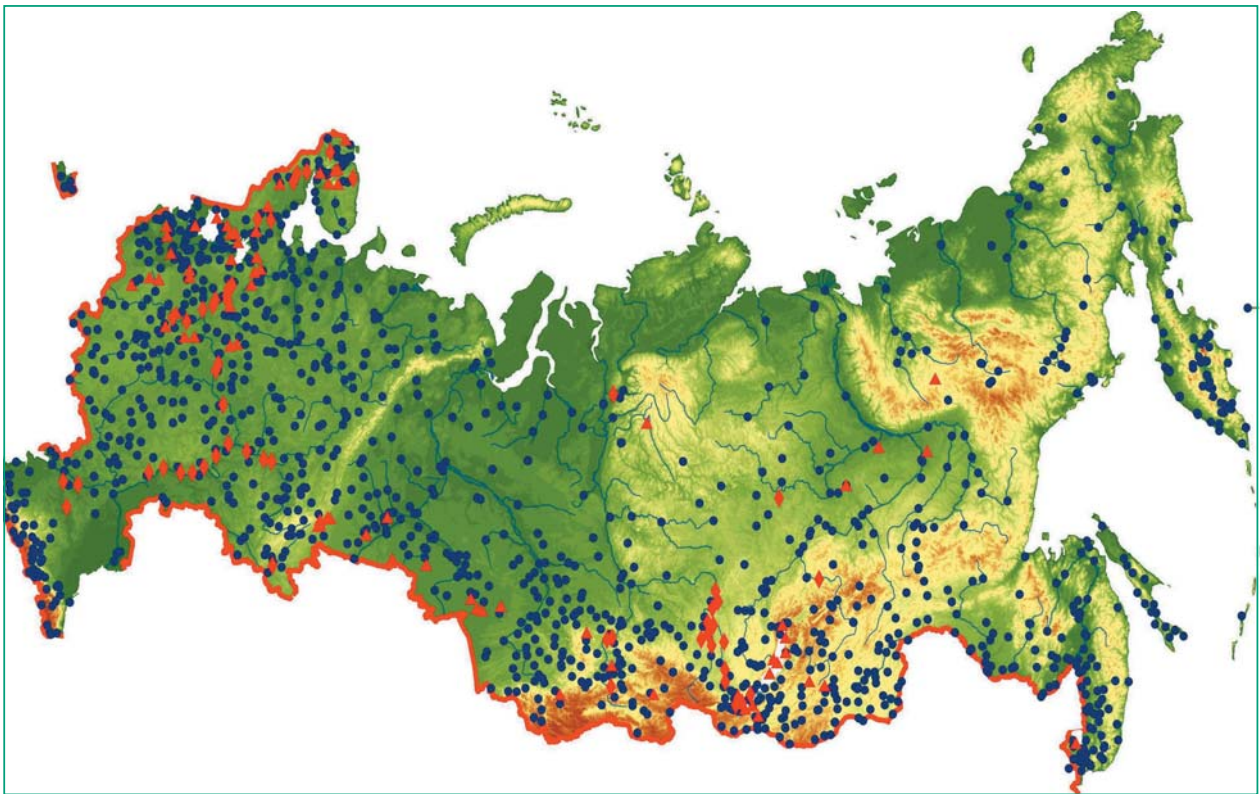


Рис. TP2.1. Наземная метеорологическая реперная сеть России, включающая 454 пункта наблюдений (черные и красные кружки). Из них 135 пунктов участвуют в международном обмене в рамках программы ГСНК (красные кружки).



**Рис. TP2.2.** Гидрологическая сеть реперных станций и постов России. Сеть наблюдений включает три типа станций и постов: речные (синие кружки), озерные (красные треугольники) и пункты наблюдений на водохранилищах (красные ромбы).

тативные станции, освещающие территорию, однородную в отношении метеорологического режима. Максимальные требования по продолжительности непрерывных наблюдений относятся к температуре и осадкам, для которых документально подтвержденные ряды наблюдений должны иметь продолжительность не менее 30 лет.

**Аэрологическая сеть.** В настоящее время в Росгидромете функционируют 46 станций температурно-ветрового зондирования, которые входят в состав региональной опорной климатической сети. Порядок работы аэрологических станций регламентируется национальными и международными документами. В международной программе ГСНК участвуют 12 российских станций, включая 2 станции в Антарктике. Данные международного мониторинга показывают, что климатическая сеть в свободной атмосфере не в полной мере отвечает требованиям ГСНК, особенно на севере и северо-востоке России.

**Гидрологическая сеть наблюдений.** Характеристики речного стока являются важным индикатором изменения и изменчивости климата. Реперная гидрологическая сеть Росгидромета включает 1237 речных, 70 озерных станций и постов и 12 на водохранилищах (рис. TP2.2).

**Наблюдения за криолитозоной.** Наблюдения за состоянием криолитозоны России проводятся с середины 1950-х годов. Пункты наблюдений организованы, главным образом, научными организациями РАН. В настоящее время действуют 14 наблюдательных полигонов. Наибольший объем наблюдений получен на северо-востоке ЕТР, севере Западной Сибири и в Центральной Якутии. В верхнем слое почвы наблюдения проводятся на метеорологических станциях Росгидромета. В зоне многолетней мерзлоты ведутся наблюдения за температурой почвы в 31 пункте, а в зоне сезонного промерзания — на 211 станциях.

**Измерения концентраций основных парниковых газов.** В настоящее время наблюдения за концентрациями  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  проводятся на двух станциях — Териберка (Кольский п-ов) и Новый Порт (п-ов Ямал). Эти данные регулярно направляются в Мировой центр парниковых газов (Токио, Япония). Озонометрическая сеть Росгидромета состоит из 27 станций и является составной частью мировой озоновой сети ГСА.

**Актинометрическая сеть.** В настоящее время актинометрическая сеть насчитывает 186 станций. Полная программа наблюдений включает измере-

ния пяти составляющих радиационного баланса; сокращенная программа — измерения только суточных сумм суммарной радиации. В 2005 г. по полной программе работали 115 пунктов, а по сокращенной — 71 пункт наблюдений.

**Океанографические наблюдения.** Россия участвует в разных программах океанографических наблюдений по линии ВМО, МОК, ЮНЕСКО. Наблюдения за температурой поверхности ведутся на 180 береговых и островных морских гидрометеорологических станциях и постах, а также по программам судовых наблюдений. Измерения уровня моря выполняются на сети морских береговых и островных гидрометеорологических станций и постов (100 пунктов).

**Спутниковые наблюдения.** Будущая глобальная система наблюдений за климатом невозможна без спутниковой составляющей. Однако, чтобы спутниковые данные могли внести заметный вклад в долгосрочную программу измерений, должны быть обеспечены устойчивое функционирование системы наблюдений, необходимая точность и однородность измерений. Чрезвычайно важно, чтобы в дополнение к существующей наземной сети наблюдений Росгидромета и других ведомств были бы обеспечены измерения основных переменных, объявленных в Плане реализации ГСНК. Особого внимания заслуживают наблюдения за такими переменными, которые не могут быть в достаточной степени обеспечены регулярной сетью в Сибири, северных и полярных регионах России. К ним относятся непрерывные наблюдения за протяженностью и концентрацией морского льда, снежного покрова, данные о пожарах, осадках и др.

**Развитие национальной системы мониторинга.** Существующие сети наблюдений России должны быть интегрированы с учетом национальных, региональных и глобальных приоритетов. Плотность метеорологической сети является недостаточной для изучения регионального климата и обеспечения задач экономического и социального развития страны. Особое внимание следует уделить организации наблюдений в отдаленных и труднодоступных районах, особенно чувствительных к изменениям климата, и более широкому привлечению данных альтернативных систем наблюдений.

### 3. Наблюдаемые изменения климата

В качестве характеристики изменений климата за определенный интервал времени используется коэффициент линейного тренда, оцененный методом наименьших квадратов. Он характеризует среднюю скорость изменений изучаемой гидрометеорологической величины. В качестве *меры существенности тренда* используется доля дисперсии переменной, объясняемая трендом. Она выражается в процентах от полной дисперсии за рассмат-

риваемый интервал времени. Для оценки статистической значимости тренда используется 1%- или 5%-ный уровень значимости или указывается критический уровень значимости (наименьший уровень значимости, при котором отвергается гипотеза об отсутствии тренда).

Наблюдаемое глобальное и региональное потепление климата подтверждается многими фактами. Помимо повышения глобальной температуры воздуха у земной поверхности наблюдается уменьшение площади морского льда в Арктическом бассейне и снежного покрова на суше, повышение среднего уровня океана и др. Известно, что изменение глобальной температуры в XX веке и в начале XXI века было не однородным. Выделяются три временных интервала: потепление 1910–1945 гг., слабое похолодание 1946–1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1976 г. Особое внимание уделяется анализу трендов за последние 30–40 лет.

**Температура воздуха.** На рис. TP3.1 изменение среднегодовой температуры приземного воздуха, осредненной по территории России, представлено в сопоставлении с изменением среднегодовой глобальной температуры. Важно отметить, что потепление климата на территории России оказалось заметно больше глобального. Размах аномалий (разность между максимумом и минимумом) среднегодовой температуры в России достигает 3–4°C, в то время как для земного шара он лишь несколько превосходит 1°C.

В табл. TP3.1 представлены оценки линейных трендов в изменении приземной температуры за столетие в целом (1907–2006 гг.) и за два недавних периода: 1976–2000 и 1976–2006 гг. Повышение среднегодовой температуры воздуха в течение XX века происходило практически во всех рассматриваемых регионах. За последние 100 лет (1907–2006 гг.) общее потепление составило 0,75°C в среднем для земного шара и 1,29°C для России.

За период 1976–2006 гг. суммарное среднее потепление в целом по России составило 1,33°C за 31 год, т. е. превысило 100-летнее среднее потепление (1,00–1,29°C). Это превышение отчасти объясняется некоторым похолоданием в середине XX века. Соответственно скорость потепления после 1975 г. много больше, чем за столетие в целом; для территории России — это 0,43°C/10 лет против 0,10–0,13°C/10 лет. Однако если сравнить оценки периода 1976–2006 гг. с оценками для конца XX века (1976–2000 гг.), то на территории России в целом и для отдельных регионов обнаруживается тенденция к определенному уменьшению скорости потепления, тогда как в глобальном масштабе скорость потепления продолжает увеличиваться.

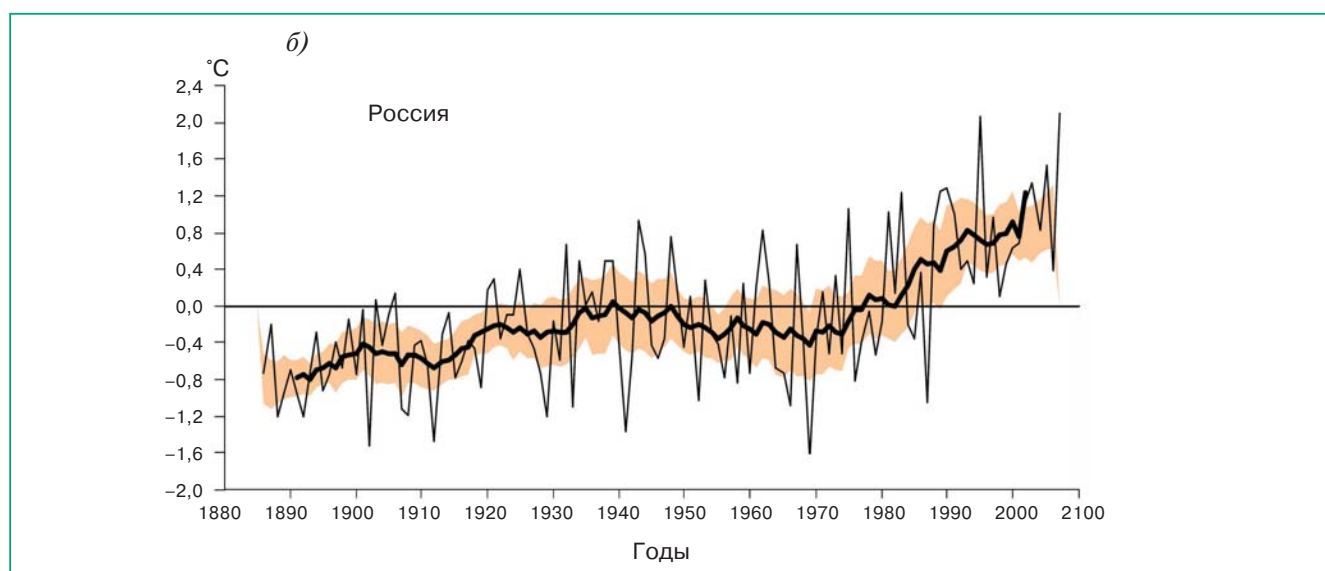
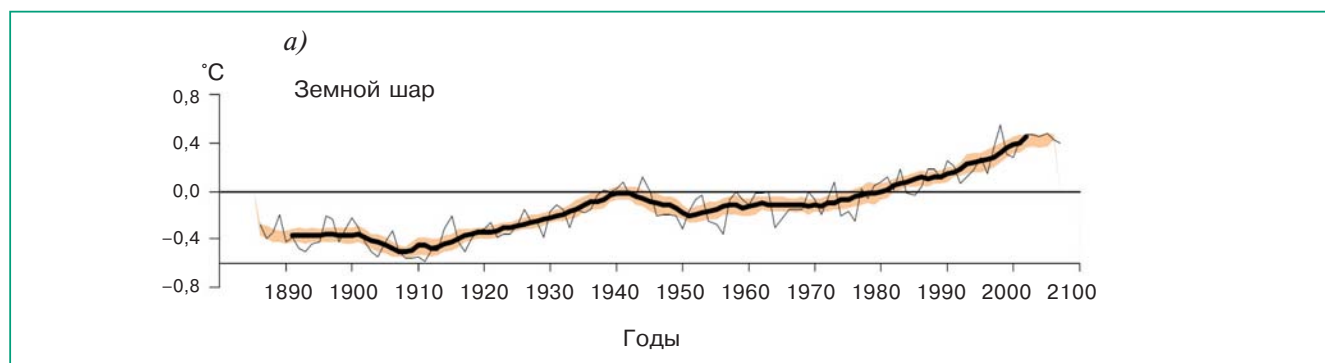
Потепление в 1976–2006 гг. в России было наиболее существенным в осенний период в северо-восточном регионе (0,85°C/10 лет) при весьма



## ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕЗЮМЕ

**Таблица ТР3.1.** Оценки линейного тренда регионально осредненных среднегодовых значений температуры приземного воздуха за 1907–2006 гг.:  $b$  — коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменения температуры за десятилетие, °С/10 лет;  $\Delta$  — суммарное изменение температуры за указанный период, соответствующее линейному тренду (°С)

Регион	1907–2006 гг. (100 лет)		1976–2000 гг. (25 лет)		1976–2006 гг. (31 год)	
	$b$	$\Delta$	$b$	$\Delta$	$b$	$\Delta$
Земной шар	0,07	0,75	0,17	0,42	0,18	0,57
Россия	0,13	1,29	0,47	1,17	0,43	1,33
ЕТР	0,12	1,19	0,50	1,26	0,49	1,51
Западная Сибирь	0,15	1,50	0,33	0,83	0,32	1,00
Центральная Сибирь	0,12	1,18	0,55	1,38	0,46	1,44
Прибайкалье и Забайкалье	0,17	1,65	0,59	1,48	0,46	1,42
Северо-Восток	0,11	1,09	0,43	1,08	0,42	1,31
Приамурье и Приморье	0,13	1,29	0,52	1,30	0,40	1,25



**Рис. ТР3.1.** Изменения среднегодовой температуры приземного воздуха (°С), осредненной по земному шару (а) и по территории России (б), в отклонениях от средних за 1961–1990 гг. Жирная кривая показывает сглаженный ход температуры (11-летние скользящие средние), желтая область обозначает границы 95%-ного доверительного интервала для 11-летних средних, которые не включают ошибки пространственного осреднения и нарушений однородности наблюдений.

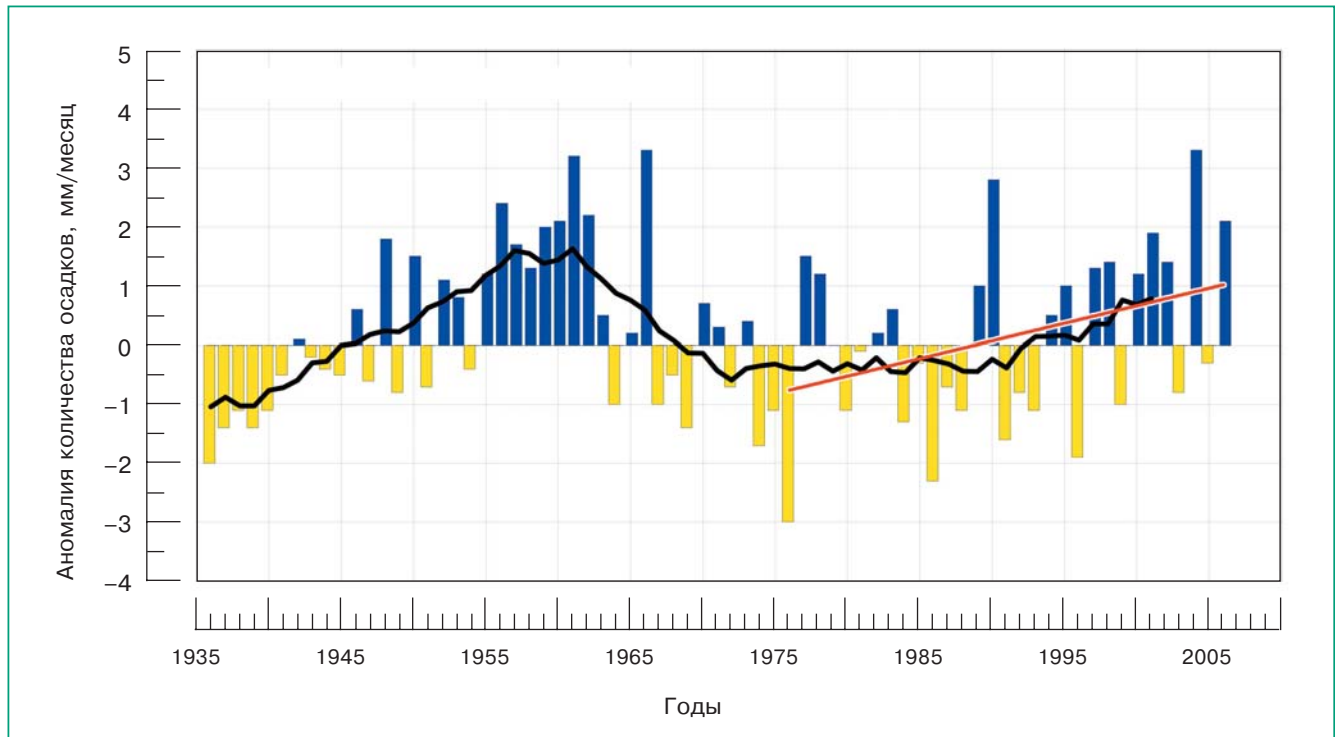
значительном вкладе в дисперсию ряда — 30%) и в Прибайкалье и Забайкалье летом. В северо-восточном регионе зимой отмечена тенденция к похолоданию, которая, однако, обуславливает лишь 3% межгодовой изменчивости зимней температуры в течение рассматриваемого периода.

**Атмосферные осадки.** Климатические изменения осадков изучены значительно хуже, чем температуры приземного воздуха, особенно над океанами. Такая ситуация объясняется, с одной стороны, более сложной физической природой самого явления (большей изменчивостью пространственных и временных распределений). С другой стороны, имели место весьма существенные различия в методике наблюдений в разных регионах земного шара и в разные периоды времени. В настоящее время эталонного массива с данными об осадках за период инструментальных наблюдений на всей сети российских станций не существует. Организация работы по внедрению в практику новых методов обработки данных текущих гидрометеорологических наблюдений и соответствующему перерасчету и анализу архивных данных об атмосферных осадках с целью улучшения качества климатических рядов является исключительно актуальной и трудоемкой задачей.

Приводимые ниже оценки получены по данным о месячных суммах осадков. Временные ряды

осадков даются за период 1936–2006 гг., в течение которого основная сеть метеорологических наблюдений на территории России уже существенно не менялась и не могла серьезно влиять на оценки межгодовых колебаний пространственно осредненных величин. Данные представлены в отклонениях от соответствующего среднего за 1961–1990 гг. На всех временных рядах показаны тенденции (линейные тренды) изменений за период 1976–2006 гг., которые больше других характеризуют антропогенные изменения современного климата. Рис. TP3.2 иллюстрирует изменения среднегодовых сумм осадков, осредненных по всей территории России.

Отмечается сложный характер межгодовых колебаний количества осадков, особенно с середины 1960-х годов. Можно выделить периоды увеличения осадков — до 1960-х и после 1980-х годов, а между ними примерно два десятилетия разнонаправленных вариаций. Оценки линейного тренда регионально осредненных атмосферных осадков за 1976–2006 гг. приведены в табл. TP3.2. В целом по территории России в среднем за год отмечается некоторое увеличение осадков со скоростью 0,6 мм/месяц за 10 лет, которое, однако, объясняет лишь 12,7% межгодовой изменчивости. Картина изменений неоднозначна. Наиболее заметны: увеличение осадков весной (в среднем для России тренд составил 1,4 мм/месяц за 10 лет при вкладе



**Рис. TP3.2.** Средние за год (январь – декабрь) аномалии количества осадков, осредненные по территории России, за 1936–2006 гг. относительно среднего за 1961–1990 гг. (38,3 мм/месяц). Черная кривая соответствует 11-летнему сглаживанию. Линейный тренд за 1976–2006 гг. показан красной линией.

**Таблица ТР3.2.** Оценки линейного тренда пространственно осредненных среднегодовых и сезонных аномалий количества осадков для территории России за период 1976–2006 гг.: *b* — коэффициент линейного тренда (мм/месяц за 10 лет); *d* — вклад тренда в полную дисперсию, %

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>d</i>
Россия	0,59	12,7	0,69	12,7	1,40	21,9	-0,31	1,4	0,80	6,1
ЕТР	0,61	4,2	0,97	4,6	2,26	14,9	-1,71	4,2	0,20	0,1
Западная Сибирь	1,16	11,1	1,42	12,2	2,10	20,1	0,21	0,1	0,19	3,4
Центральная Сибирь	0,90	13,7	-0,11	0,1	0,77	7,8	1,58	6,3	1,22	10,1
Прибайкалье, Забайкалье	0,68	5,8	0,11	0,3	0,11	0,1	0,54	0,4	1,71	12,3
Северо-восток	0,14	0,2	-1,75	27,8	1,18	15,6	-0,53	0,6	1,49	7,7
Приамурье, Приморье	-0,23	0,2	0,68	3,8	1,97	4,3	-2,34	1,9	-0,99	1,2

в дисперсию 22%) в Западной Сибири, на северо-востоке и ЕТР и уменьшение осадков зимой в северо-восточном регионе. Последнее не проявилось в осадках для России в целом, так как компенсировалось увеличением осадков зимой в Западной Сибири. Отмечается также убывание осадков летом, но оно несущественно на фоне межгодовых колебаний.

**Индексы экстремальности температуры и осадков.** На большей части России в период 1976–2006 гг. тенденции многолетних колебаний индексов экстремальности температуры согласуются с фактом глобального потепления, а именно: годовые минимумы и максимумы увеличиваются, размах между ними сокращается (минимумы увеличиваются быстрее максимумов), число суток с морозом уменьшается. Наибольшее повышение и минимальной, и максимальной температуры приземного воздуха наблюдалось в холодную часть года. Соответственно и площади областей с уменьшением амплитуды суточного хода температуры максимальны в зимний период (до 30–40%).

В летний период наряду с районами уменьшения амплитуды встречаются районы с противоположной тенденцией, однако ни те, ни другие не имеют большого распространения и, по-видимому, обусловлены преимущественно естественными изменениями климата.

Показатели, характеризующие экстремальные осадки, указывают преимущественно на слабое увеличение повторяемости интенсивных осадков и сокращение продолжительности длительных сухих периодов.

**Облачность и солнечная радиация.** Облачность играет важную роль в регулировании радиацион-

ных потоков и является одним из факторов, определяющих многие климатообразующие процессы. Вместе с тем возможные изменения характеристик облачности, вызванные потеплением климата, являются в настоящее время источником наибольшей неопределенности.

Из двух видов наблюдений за облачностью — спутниковых и наземных — наблюдения на метеорологических станциях обеспечивают наиболее длинные доступные ряды. Детальный анализ продленных рядов наблюдений с использованием информации 150 российских станций и с привлечением актинометрических наблюдений дает картину современных изменений характеристик облачности на всей территории России. Во второй половине XX века на большей части территории России происходило перераспределение вклада разных форм облачности: увеличилась доля облаков вертикального развития (кучевых и кучево-дождевых), уменьшилась доля слоисто-дождевой облачности, увеличился вклад облаков верхнего яруса. Эти изменения происходили на фоне значительных межгодовых и междесятилетних колебаний количества облачности, которые наиболее сильно выражены на ЕТР. Наблюдавшаяся тенденция к уменьшению прямой солнечной радиации постепенно ослабела. Обнаруживаемые региональные изменения согласуются с изменениями общей облачности. При этом в последние десятилетия XX века отмечалось увеличение интегральной прозрачности атмосферы на всей территории России.

**Сток рек.** Выполнен статистический анализ динамики годового и сезонного стока рек, для которых динамика стока определяется климати-

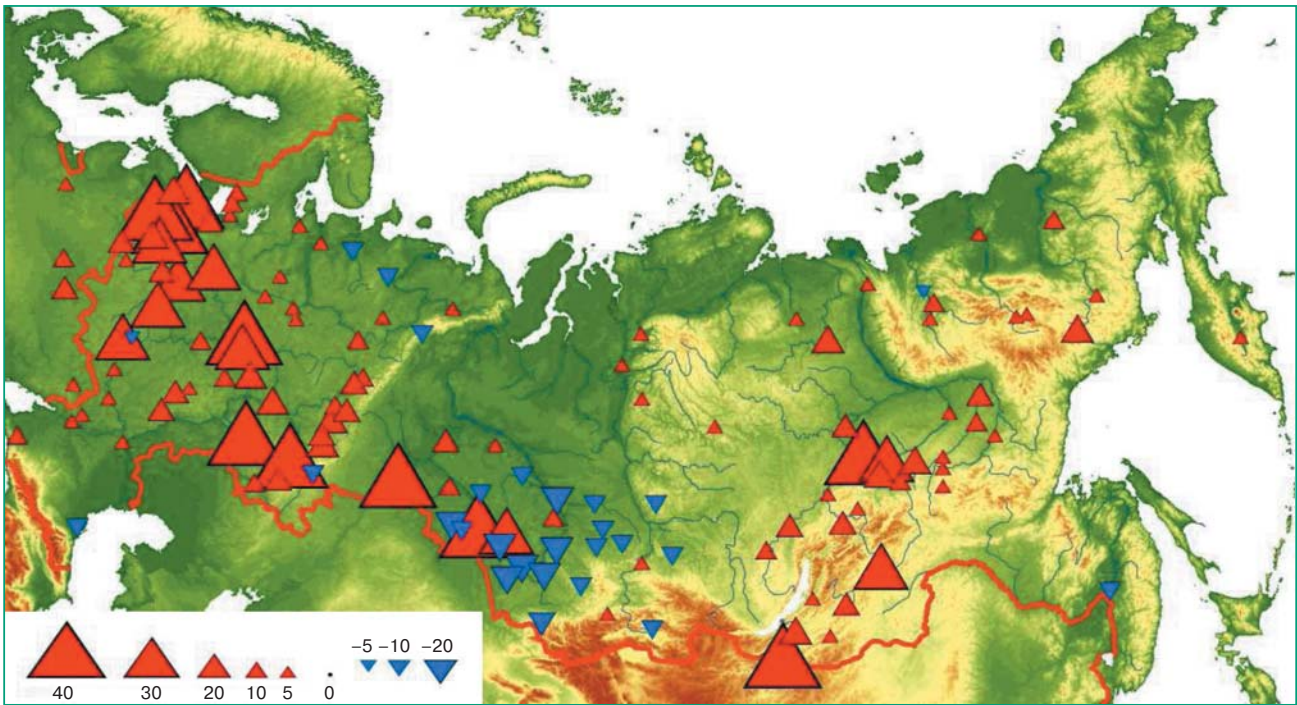


Рис. ТР3.3. Аномалии годового стока рек, среднего за период 1978–2005 гг. (% нормы за 1946–1977 гг.)

ческими факторами, а бассейны являются репрезентативными для соответствующих физико-географических зон. Для всех выбранных рек оценивались изменения среднего за период 1978–2005 гг. годового и сезонного стока по отношению к среднему за предшествующий многолетний период (1946–1977 гг.).

Для большинства основных рек России сток в 1978–2005 гг. был больше среднего за предшествующий многолетний период. На ряде рек России отчетливо прослеживаются тенденции к росту высоты подъемов уровня воды над затопляемыми территориями. Наиболее значительное увеличение годового стока (на 15–40%) наблюдалось на реках западной части ЕТР (рис. ТР3.3). За период 1978–2005 гг. увеличилась водность Волги (на 14%) и ее главных притоков. Средний годовой сток был больше среднего многолетнего на 10–15% в верхней части бассейна Северной Двины, верховьях Днепра, на левобережных притоках Дона. Наблюдалось заметное увеличение водных ресурсов на крупнейших реках, впадающих в Северный Ледовитый океан.

На АТР значительное увеличение водности (на 20–40%) отмечалось на реках, сток которых формируется на восточном склоне Уральских гор. Повышение водности наблюдалось также и на значительной части бассейна Лены, особенно в последнее десятилетие XX века. Годовой сток

Енисея увеличился примерно на 8%. В целом годовой сток в бассейнах рек северо-востока АТР увеличился на 5–15%.

Обнаружена связь между изменениями среднего стока сибирских рек и индекса североатлантического колебания зимой в 1936–1999 гг. Установлено, что эти реки заметно реагируют на крупномасштабные изменения циркуляции. Более того, в годы большой интенсивности североатлантического колебания крупные положительные аномалии осадков распространяются через всю Сибирь до бассейна реки Лена. Однако связаны ли эти изменения с антропогенным глобальным потеплением или это результат крупномасштабных естественных колебаний атмосферной циркуляции в Северном полушарии — остается неясным.

**Атмосферная циркуляция.** Основными типами крупномасштабной циркуляции, влияющими на климат на территории России, являются североатлантическое колебание (САК) и тихоокеанское колебание (ТК). На протяжении второй половины XX века на территории России наблюдались существенные изменения повторяемости циклонов и антициклонов, связанные, по-видимому, с изменениями индексов САК в западных регионах России и ТК в ее восточных регионах.

**Циклоны.** После 1970 г. в зимний период на ЕТР происходило общее увеличение повторяе-



мости циклонов. При этом локализация областей максимумов не изменялась. Летом в этом регионе не наблюдалось выраженных трендов повторяемости циклонов, однако имели место резкие изменения их повторяемости, носящие почти “скачкообразный” характер. Такие изменения происходили в 1970-е годы (увеличение) и в 1990-е годы (уменьшение). В восточных областях в период 1960–1980 гг. также наблюдалось резкое увеличение повторяемости примерно на 50% по отношению к предшествующему периоду в Западной Сибири, вдоль Арктического побережья между 110 и 160° в. д. и на Дальнем Востоке.

**Антициклоны.** После 1970 г. в зимний сезон наблюдалось уменьшение повторяемости антициклонов на ЕТР к северу от 50° с. ш. В восточных регионах в 1960–1980 гг. произошло резкое уменьшение повторяемости антициклонов. Летом в ряде регионов также наблюдались значительные изменения их повторяемости в период 1960–1980 гг.

Изменения повторяемости циклонов и антициклонов в западных регионах России в основном обусловлены изменениями в системе североатлантического колебания. Изменения повторяемости барических образований в восточных регионах России (особенно в зимний период), по-видимому, связаны с северо-тихоокеанским колебанием.

Однако на фоне преобладающего увеличения циклоничности во всех регионах России за период 1936–2006 гг. с середины 1990-х годов и до 2006 г. включительно число дней с циклонической циркуляцией уменьшилось. В настоящее время неясно, является ли это уменьшение результатом естественных колебаний циркуляции или началом новых изменений, связанных с глобальным потеплением климата.

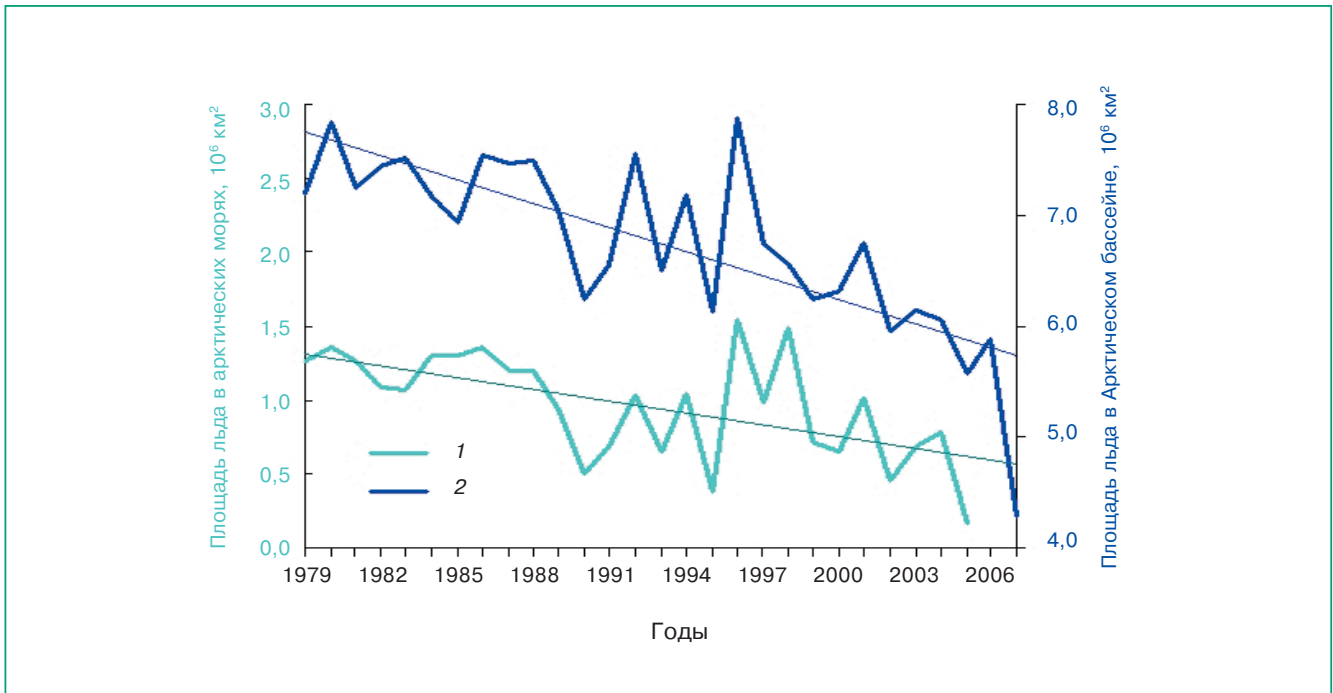
**Снежный покров суши.** Состояние снежного покрова — одна из важнейших характеристик регионального климата. Программа наблюдений на метеорологических станциях включает регулярные измерения высоты снежного покрова на станциях и проведение маршрутных снегомерных съемок. По наблюдениям со спутников, площадь снежного покрова в Северном полушарии за период 1973–1992 гг. сократилась примерно на 10%. По наземным наблюдениям, результаты, имеющиеся в публикациях, не столь однозначны. Они зависят от длины выбранного периода и конкретной территории. Не касаясь деталей этих различий в целом, можно сделать следующий вывод. За период 1951–2006 гг. на большей части территории России преобладало увеличение продолжительности залегания снежного покрова, и только в западных и южных районах ЕТР она уменьшилась. Средняя за зиму высота снежного покрова за этот период также увеличивалась. Но отмеченные изменения характеристик снежного покрова не были однородными во времени и пространстве. На них в

определенной мере могли повлиять косвенные причины, например увеличение защищенности метеорологических площадок и уменьшение скорости ветра. Более того, потепление климата за последние несколько десятилетий также способствовало выпадению большей доли жидких и меньшей доли твердых осадков в тех регионах, где средняя климатическая температура близка к 0°C. По этой причине на фоне увеличения зимних осадков доля снега могла уменьшаться, в результате чего увеличивался зимний сток.

**Многолетняя мерзлота.** Данные наблюдений позволяют приблизительно оценить изменения термического режима и глубины слоев сезонного промерзания (протаивания) во второй половине и главным образом в последней четверти XX века. В этот период на многих участках криолитозоны происходило увеличение температуры верхнего слоя многолетнемерзлых пород и в отдельных регионах отмечалось увеличение глубины сезонного протаивания. С конца 1970-х годов в Центральной Якутии среднегодовая температура воздуха увеличилась в среднем на 2,5°C. Однако за тот же период температура грунтов повысилась не более чем на 1,5°C. В некоторых районах Якутии либо не изменилась глубина протаивания, либо на отдельных площадках наблюдений происходило ее уменьшение. За последние 30 лет температура многолетней мерзлоты на севере Западной Сибири увеличилась в среднем на 1,0°C, на северо-востоке ЕТР — на 0,8–1,0°C, в то время как на северо-западе ЕТР заметных изменений температуры почвогрунтов не произошло. Наличие или отсутствие трендов глубины протаивания зависит прежде всего от растительного покрова участка наблюдения.

Таким образом, осредненные по регионам сезонного протаивания и сезонного промерзания данные об эволюции глубины активного слоя, которые получены на основе наблюдений за температурой почвы на метеорологических станциях во второй половине XX века, указывают на увеличение глубины сезонного протаивания и уменьшение глубины сезонного промерзания. Данные наблюдений на геокриологических стационарах дают неоднозначные результаты в разных регионах. Пространственное распределение трендов температуры воздуха и на глубине 1,6 м не является однородным.

**Морской лед в Арктике.** Морские льды являются наилучшим показателем изменений климата Арктики. Реконструкции площади распространения морских льдов в приатлантической Арктике показывают на их постепенное сокращение с конца XIX века. Данные инструментальных наблюдений со спутников, начиная с 1979 г., подтверждают значительное уменьшение площади распространения арктического морского льда за последние два десятилетия. Экстремальное сокращение было



**Рис. TP3.4.** Площадь морского льда в сибирских арктических морях (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) по данным ААНИИ (1) и в Северном полушарии по данным NSIDC (2) в сентябре за период 1979–2007 гг.

отмечено в последнее десятилетие в конце летнего периода таяния льда в сентябре (рис. TP3.4). Наибольшее сокращение отмечено для многолетнего ледяного покрова в Восточно-Сибирском, Чукотском морях и в море Бофорта. В 2007 г. произошло резкое ускорение сокращения площади, занимаемой льдами в Северном полушарии. Начиная с конца июня темпы летнего таяния льдов превосходили отмечавшиеся в аномальном 2005 г.; в сентябре 2007 г. площадь, занимаемая льдами, сократилась до 4,1 млн. км<sup>2</sup> против 5,6 млн. км<sup>2</sup> в 2005 г. Линейный тренд сокращения площади морского льда за весь период спутниковых наблюдений составил –72 тыс. км<sup>2</sup>/год, тренд в сибирских морях за тот же период оказался равным –26 тыс. км<sup>2</sup>/год. Значительные межгодовые колебания площади распространения льдов в российских арктических морях в течение XX века и в начале XXI века происходили на фоне отрицательного линейного тренда. В первой половине XX века отрицательный тренд был наиболее заметным в западных арктических морях, а во второй половине — в восточных.

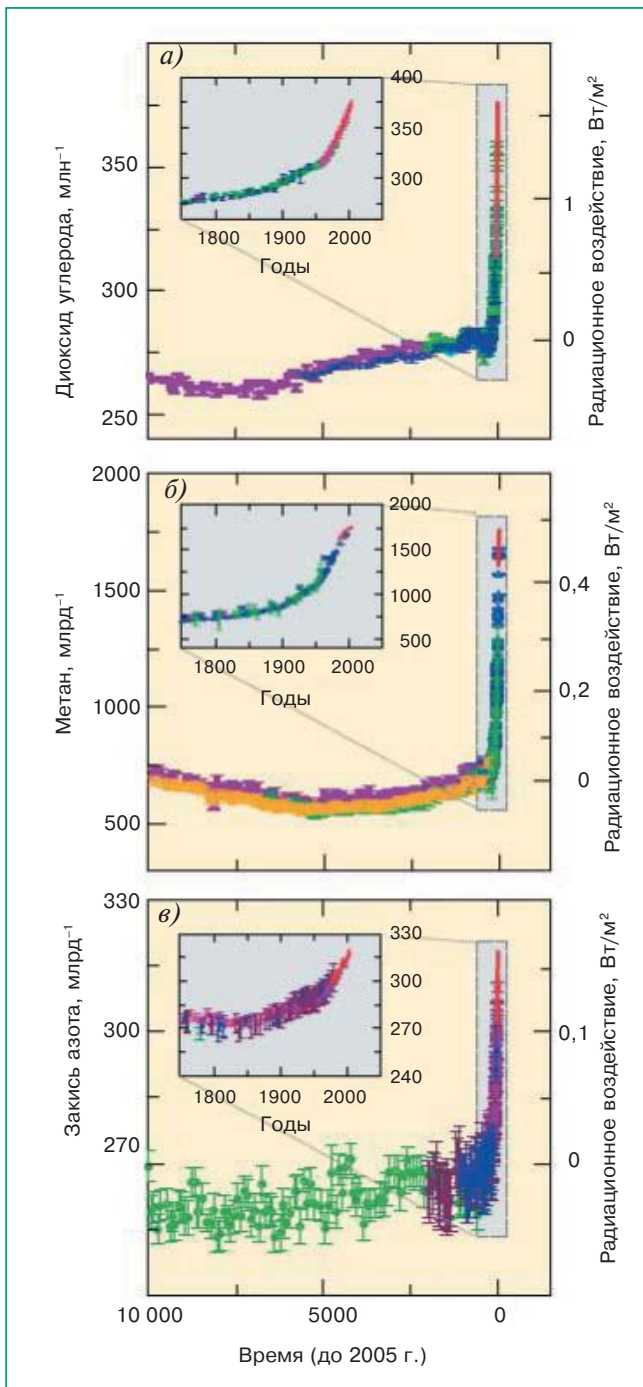
Значительно меньше данных имеется о толщине дрейфующих льдов. Анализ сведений о распределении льда в Арктическом бассейне, собранных подводными лодками США и Британии, показал, в частности, уменьшение средней толщины льдов от 3,1 до 1,8 м за период с 1958–1976 по 1993–1999 гг. Уменьшение толщины льда в Аркти-

ческом бассейне подтверждается измерениями, выполненными с борта а/л “Арктика” во время рейса к Северному полюсу летом 1977 г. и с борта НЭС “Академик Федоров” во время высокоширотной экспедиции летом 2005 г. Средневзвешенная по маршруту плавания толщина льдов в 2005 г. составила 132 см против 185 см в 1977 г. Поскольку маршруты этих двух рейсов заметно отличаются между собой, требуются дальнейшие уточнения величины уменьшения толщины льда во втором периоде по сравнению с первым. Значительно меньше данных имеется об изменении толщины дрейфующих льдов.

#### 4. Изменения содержания парниковых газов и аэрозоля в атмосфере

**Парниковые газы атмосферы.** Основной причиной изменения газового состава атмосферы в индустриальную эру (условно — с 1750 г.) является возрастающая хозяйственная деятельность — рост потребления энергии в результате сжигания ископаемого топлива и выброса в атмосферу продуктов этого сжигания. Хозяйственная деятельность также приводит к сокращению площади лесов, нарушению естественной поверхности почвы, что способствует ослаблению роли естественных стоков парниковых газов (ПГ). Основными парниковыми газами являются: диоксид углерода





**Рис. TP4.1.** Временной ход концентрации диоксида углерода (а), метана (б) и закиси азота (в) в атмосфере и их изменения за последние 10 000 лет (крупная панель) и начиная с 1750 г. (вставленная в нее панель меньшего размера). Представлены результаты измерений в ледовых отложениях (символы разного цвета и конфигурации) по результатам разных исследователей и измерений в атмосфере (красная кривая). Шкала оценок радиационных воздействий, соответствующих измеренным концентрациям, приведена на больших панелях с правой стороны.

(CO<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>), закись азота (N<sub>2</sub>O), тропосферный озон (O<sub>3</sub>) и водяной пар (H<sub>2</sub>O). Хотя количество их в атмосфере чрезвычайно мало (объемная концентрация CO<sub>2</sub> — 0,038%, других газов — не более 2·10<sup>-3</sup>%), их влияние на термический режим атмосферы чрезвычайно велико.

*Диоксид углерода* (CO<sub>2</sub>) является наиболее важным из перечисленных выше парниковых газов по влиянию на климат. До начала индустриальной эры его средняя глобальная концентрация в атмосфере составляла 280 ± 10 млн<sup>-1</sup>. В течение последних 10 000 лет она изменялась не более чем на 20 млн<sup>-1</sup>, причем эти изменения были обусловлены естественными причинами. В докладе МГЭИК отмечается беспрецедентное по скорости увеличение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере за последние 250 лет. После 1750 г. концентрация CO<sub>2</sub> увеличилась на 35% и в 2005 г. составила 379 млн<sup>-1</sup> (рис. TP4.1а). За последние 10 лет увеличение средней глобальной концентрации CO<sub>2</sub> было значительным и составило 1,9 млн<sup>-1</sup> в год. Средняя за 2000–2005 гг. годовая эмиссия CO<sub>2</sub> от сжигания ископаемого топлива увеличилась и составила 7,2 ± 0,3 млрд. т.

*Метан* (CH<sub>4</sub>) является вторым по значимости парниковым газом после CO<sub>2</sub>. Его концентрация увеличилась в 2,5 раза по сравнению с концентрацией в доиндустриальный период и составила 1774 млрд<sup>-1</sup> в 2005 г. (рис. TP4.1б).

*Закись азота* (N<sub>2</sub>O). Содержание этого газа в атмосфере увеличилось на 18% к 2005 г. по сравнению с содержанием в доиндустриальный период (270 млрд<sup>-1</sup>) и составило 319 млрд<sup>-1</sup>. Скорость увеличения составляла 0,8 млрд<sup>-1</sup> в год в течение нескольких десятков лет (рис. TP4.1в). Данные ледниковых кернов показывают, что за последние 10 тыс. лет часть общего содержания N<sub>2</sub>O в атмосфере, имеющая естественное происхождение, изменилась менее чем на 3%.

*Тропосферный озон* (O<sub>3</sub>). Увеличение содержания в атмосфере тропосферного озона усиливает парниковый эффект. Основными антропогенными источниками озона в тропосфере являются фотохимические реакции, протекающие с участием химических предшественников озона — оксидов азота NO и NO<sub>2</sub>, а также летучих органических соединений естественного и антропогенного происхождения. Антропогенные выбросы оксидов азота связаны в основном с теплоэнергетикой и транспортом.

*Парниковые газы техногенного происхождения.* К газам техногенного происхождения относятся галогенизированные газы метанового и этанового рядов, а также гексафторид серы SF<sub>6</sub>, отличающиеся очень большим «временем жизни» и высоким парниковым потенциалом, что, несмотря на их малые концентрации в атмосфере, приводит к достаточно большому суммарному вкладу в пар-

никовый эффект. Большинство из них стали продуктом антропогенных выбросов в атмосферу только в XX веке, поскольку стали использоваться в качестве хладагентов в холодильниках, в аэрозольных распылителях в качестве растворителей, а также при производстве пластмасс.

*Водяной пар* ( $H_2O$ ) является основным естественным парниковым газом, на содержание которого в атмосфере хозяйственная деятельность человека не оказывает заметного прямого влияния вследствие его большого количества — в глобальной атмосфере содержится около 1% водяного пара по объему. Его распределение по земному шару сильно зависит от температуры воздуха, которая, в свою очередь, определяет влагоемкость атмосферы. Время жизни водяного пара в атмосфере достаточно мало и составляет примерно 10 суток. Однако водяной пар может вносить значительный вклад в усиление парникового эффекта вследствие сильной положительной обратной связи: увеличение температуры воздуха вызывает повышение влагосодержания атмосферы, которое, в свою очередь, вызывает усиление парникового эффекта и тем самым способствует дальнейшему повышению температуры воздуха. Влияние водяного пара может также проявляться через увеличение облачности и изменение количества осадков.

**Радиационное воздействие парниковых газов на глобальную атмосферу.** Воздействие на радиационный режим атмосферы — основной механизм антропогенного влияния на глобальную климатическую систему. Изменение концентрации парниковых газов в атмосфере обуславливает основную часть этого воздействия. Увеличение их содержания в атмосфере усиливает поглощение длинноволновой инфракрасной радиации, излучаемой в основном подстилающей поверхностью, молекулами парниковых газов. Поглощенная инфракрасная радиация излучается в мировое пространство и к земной поверхности, вызывая повышение температуры тропосферы.

На рис. TP4.2 приводятся оценки радиационного воздействия на климат основных парниковых газов и аэрозолей. Приведенные величины отражают суммарное воздействие по отношению к началу индустриального периода.

Все долгоживущие парниковые газы и озон дают положительное радиационное воздействие ( $2,9 \pm 0,3$  Вт/м<sup>2</sup>). Причем те из них, которые связаны с хозяйственной деятельностью, достаточно хорошо изучены. Прямое радиационное воздействие, просуммированное по всем типам аэрозоля, является отрицательным и составляет ( $-0,5 \pm 0,4$ ) Вт/м<sup>2</sup>. Аэрозоли также создают отрицательное радиационное воздействие опосредованно путем изменения свойств облаков ( $-0,7$  [от  $-0,9$  до  $-0,1$ ] Вт/м<sup>2</sup>)\*.

Однако достоверность этих оценок намного ниже тех, что получены для парниковых газов. Кроме того, аэрозольное воздействие из-за сравнительно короткого “времени жизни” почти всех типов аэрозоля в атмосфере неоднородно в пространстве и сосредоточено в регионах, где есть источники аэрозолей. Суммарное аэрозольное воздействие, включающее прямой эффект и опосредованный, вызванный изменением альbedo облаков, является отрицательным ( $-1,3 \pm 0,8$  Вт/м<sup>2</sup>). В результате суммарное радиационное воздействие антропогенных факторов, связанных с изменением содержания всех парниковых газов и аэрозолей, составляет  $+1,6$  [0,6; 2,4] Вт/м<sup>2</sup>.

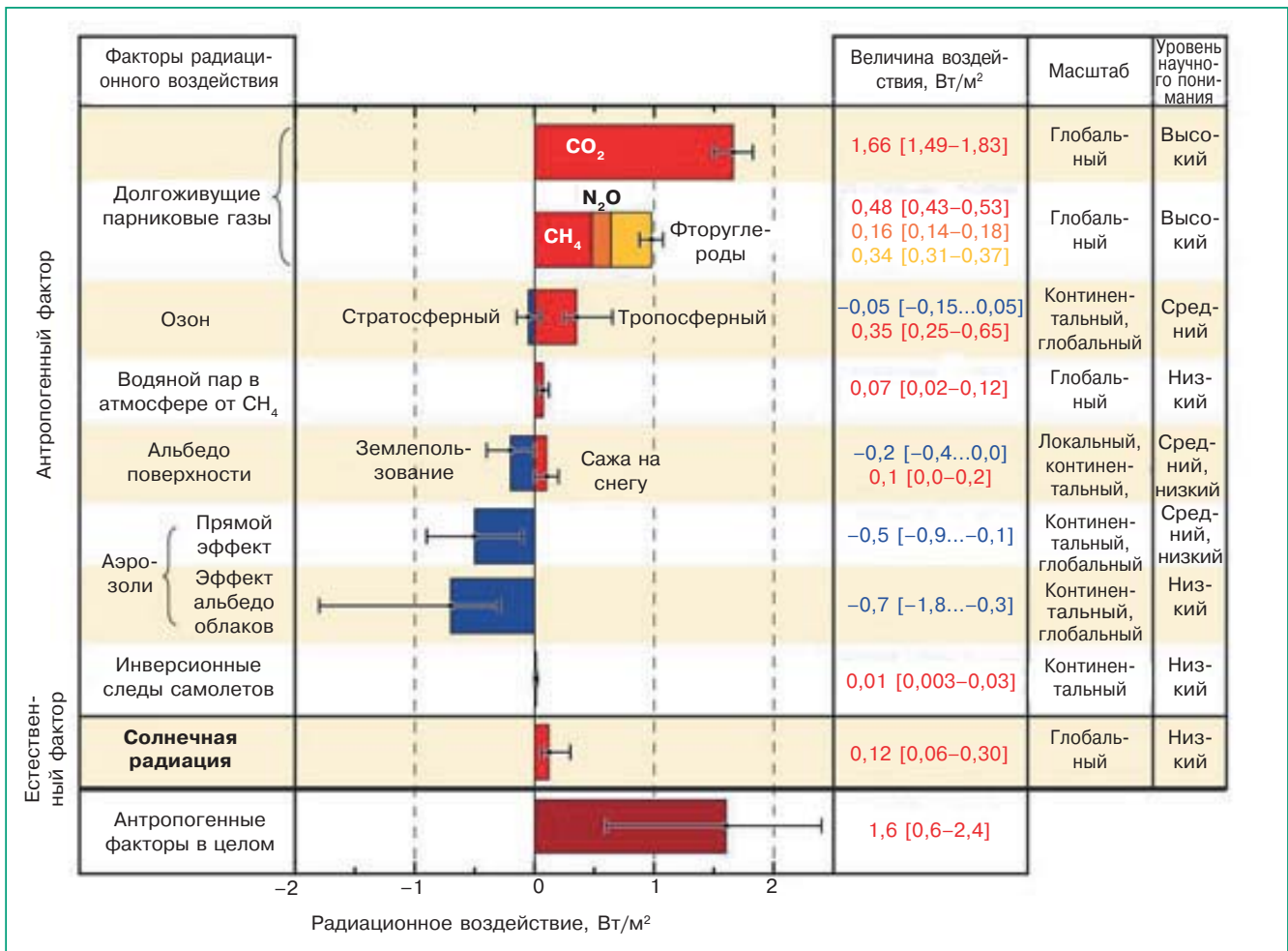
При выработке стратегии ограничения антропогенного воздействия на климат предложены сравнительные индексы, характеризующие вклады воздействующих факторов в изменение климата для разных временных масштабов. Таким индексом является потенциал глобального потепления, в основе которого лежат оценки радиационного воздействия. Абсолютным потенциалом глобального потепления отдельной радиационно-активной примеси для некоторого периода времени называют интеграл от его радиационного воздействия для периода времени, равного 20, 100 и 500 лет для оценок коротко-, средне- и долгопериодных изменений климата.

Наибольшие значения “времени жизни” имеют галогенуглеводородные соединения, а также  $SF_6$  и  $CF_4$ . Малое современное содержание хлорфторуглеродов (ХФУ), гексафторида серы ( $SF_6$ ) и тетрафторида углерода ( $CF_4$ ) в атмосфере обеспечивает относительно небольшой их вклад (10%) в суммарное радиационное воздействие (см. рис. TP4.2). Однако в будущем этот вклад может увеличиться при увеличении выбросов в атмосферу  $SF_6$ ,  $CF_4$  и других парниковых газов с большим и очень большим “временем жизни”.

К другим воздействиям на климат следует отнести изменения свойств подстилающей поверхности. С развитием сельскохозяйственного производства распашка земель и вырубка лесов ускорились и к концу XX века сельскохозяйственные угодья и пашни стали занимать 35–39% всей площади суши, а доля, занятая лесами, сократилась на 20–24%. Радиационное воздействие, связанное с хозяйственным использованием земель, оценивается величиной, равной 0,15–0,20 Вт/м<sup>2</sup>.

**Эмиссия и сток парниковых газов и их взаимодействие с биосферой.** Атмосферные циклы парниковых газов зависят от их взаимодействия с экосистемами океана и суши. Именно биосферные и геохимические циклы в океане и на суше формируют баланс для основных парниковых газов —  $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $N_2O$ .

\* Цифры в квадратных скобках здесь и далее указывают пределы возможных изменений величины по экспертным оценкам с вероятностью 90%.



**Рис. TP4.2.** Оценки среднеглобального радиационного воздействия радиационно-активных факторов от доиндустриальной эры до 2005 г. Неопределенности оценок среднего глобального радиационного воздействия при каждой широкой полосе обозначены жирными линиями с “усами”, характеризующими диапазон значений, в котором может изменяться воздействие в соответствии с уровнем современных знаний при доверительном уровне значимости 90%. Приведенные оценки также указывают на пространственные масштабы воздействия и не включают эффект перехода линейных конденсационных следов транспортной авиации в облачность.

Согласно Четвертому оценочному докладу МГЭИК (ОД4), общий приток углерода в результате природной эмиссии (почва, биосфера, океан) в атмосферу составляет 210 млрд. т в год. Это означает, что вклад хозяйственной деятельности человека в атмосферный приток составляет 3,4% по отношению к природной эмиссии. Особенность формирования природного баланса CO<sub>2</sub> состоит в том, что в доиндустриальную эпоху приблизительно то количество CO<sub>2</sub>, которое выбрасывалось в атмосферу естественными экосистемами, компенсировалось естественным стоком, каковыми являются процесс фотосинтеза в наземной растительности и поглощение океаном. Однако дополнительный приток CO<sub>2</sub> в атмосферу в результате хозяйственной деятельности вызвал нарушения баланса в природной

среде и явился причиной увеличения его содержания в атмосфере. Следует ожидать, что газовый состав атмосферы будет продолжать меняться, по крайней мере в течение первой половины XXI века. Уточненные в последнее время оценки вклада океана и суши в глобальный баланс системы подстилающая поверхность – атмосфера представлены в табл. TP4.1. Согласно оценкам МГЭИК, примерно 65% антропогенной эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу связано с сжиганием ископаемого топлива и 35% вызвано уменьшением его стока в результате освоения новых земель и массовой вырубке лесов. При этом примерно 57% антропогенной эмиссии CO<sub>2</sub> остается в атмосфере, 30% поглощается океаном, а остальная часть усваивается биосферой суши.



**Таблица TP4.1.** Средние глобальные источники и стоки антропогенного CO<sub>2</sub> в системе атмосфера – океан – суша (млрд. т C/год) в 1990–1999 и 2000–2005 гг.

Основные источники и стоки	1990–1999 гг.	2000–2005 гг.
Антропогенная эмиссия	6,3 ± 0,4	7,2 ± 0,3
Увеличение концентрации в атмосфере	3,2 ± 0,1	4,1 ± 0,1
Нетто-поток атмосфера — океан	-2,2 ± 0,4	-2,2 ± 0,5
Нетто-поток атмосфера — суша	-1,0 ± 0,6	-0,9 ± 0,6
Изменения в землепользовании	1,6 [0,5–2,7]	—
Общий сток углерода на суше	-2,6 [-4,3...-0,9]	—

**Таблица TP4.2.** Оценки глобальных естественных и антропогенных источников метана (млн. т CH<sub>4</sub>/год) за последние 20 лет

Природные источники, 168–260 млн. т CH <sub>4</sub> /год		Антропогенные источники, 264–428 млн. т CH <sub>4</sub> /год	
Заболоченные земли	145–231	Домашние животные	76–92
Термиты	20–29	Возделывание риса	31–112
Дикие животные	15	Энергетика	77
Геологические источники	4–14	Добыча газа и нефти	36–68
Океан	4–15	Сжигание биомассы	14–88
Гидраты	5	Добыча угля	32–48
Лесные пожары	2–5	Отходы	35–49
		Растения с циклом C <sub>3</sub> и C <sub>4</sub>	36

В отличие от CO<sub>2</sub> метан — химически активный газ. Антропогенные источники ответственны за 55–60% его общей эмиссии в атмосферу (табл. TP4.2).

Вклад биосферных источников метана, к которым относятся заболоченные земли, рисовые плантации, скот, отходы, лес, планктон океана, в естественную эмиссию составляет в среднем более 70%.

Закись азота (N<sub>2</sub>O) является пятым по вкладу в парниковый эффект газом с большим “временем жизни” в атмосфере. С учетом всех источников общий объем естественной и антропогенной эмиссии закиси азота составил около 17 млн. т N в год. Примерно 40% N<sub>2</sub>O, поступающего в атмосферу, обусловлено хозяйственной деятельностью (удобрения, животноводство, химическая промышленность). N<sub>2</sub>O принадлежит важная роль в химии атмосферы, поскольку этот газ является источником NO<sub>2</sub>, разрушающего стратосферный озон.

**Киотский протокол.** В 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН по изменению климата (РКИК), в которой декларировалась озабоченность мирового сообщества потеплением климата. Конкретные меры, направленные на уменьшение антропогенного воздействия, были сформулированы в Киотском протоколе, принятом Конференцией Сторон в декабре 1997 г. Страны, присоединившиеся к протоколу, взяли обязательства сократить вы-

брос парниковых газов к первому контрольному сроку (2008–2012 гг.) до 8% относительно уровня 1990 г., принятого за базовый; не превышать выбросы уровня 1990 г. и ограничить увеличение выбросов на уровне 1–8% выше базового.

Несмотря на присоединение большинства развитых стран мира к Киотскому протоколу (из стран, ответственных за высокие объемы эмиссии, Протокол не подписали только США) во многих из них наблюдалось увеличение эмиссии ПГ в атмосферу. С другой стороны, Россия сократила эмиссию ПГ на 32% по сравнению с 1990 г. из-за сокращения промышленного производства и на 10% вследствие снижения землепользования и падения сельскохозяйственного производства; в результате общее снижение выбросов CO<sub>2</sub> России в атмосферу к 1998 г. составило 42%. Значительное увеличение выбросов CO<sub>2</sub> произошло в крупных развивающихся странах (Индия, Китай). При этом за период 1998–2002 гг. эмиссия CO<sub>2</sub> в Китае возросла на 14,5%, а в Индии почти на 36%. В целом в странах с переходной экономикой общие совокупные выбросы ПГ снизились с 5,55 млрд. т CO<sub>2</sub>-эквивалента\* в 1990 г. до 3,06 млрд. т CO<sub>2</sub>-эквивалента в 2004 г. (т.е. сокращение составило 45%). В промышленно развитых странах общие выбросы ПГ в CO<sub>2</sub>-эквиваленте увеличились с 13,0 млрд. т в 1990 г. до 14,6 млрд. т в 2004 г.

\* Под CO<sub>2</sub>-эквивалентом понимается количество некоторого парникового газа, которое обеспечивает тот же парниковый эффект с учетом его парникового потенциала, что и CO<sub>2</sub>.

Таблица ТР4.3. Антропогенная эмиссия парниковых газов на территории России, выбросы которых ограничены Киотским протоколом

Парниковый газ	Единица измерения	1990 г.	2000 г.	2004 г.
CO <sub>2</sub>	млн. т CO <sub>2</sub>	2362	1520	1630
	% от 1990 г.	100	64	69
CH <sub>4</sub>	млн. т CO <sub>2</sub> -экв.	550	286	336
	% от 1990 г.	100	52	69
N <sub>2</sub> O	млн. т CO <sub>2</sub> -экв.	98	35	96
	% от 1990 г.	100	36	98
Техногенные газы (гидрофтор- и перфторуглеродные соединения, гексафторид серы)	млн. т CO <sub>2</sub> -экв.	40	42	46
	% от 1990 г.	100	105	115
Сумма выбросов ПГ	млн. т CO <sub>2</sub> -экв. % от 1990 г.	3050 100	1883 62	2108 69

### Эмиссия и сток парниковых газов в России

*Естественные источники и стоки ПГ.* Леса России занимают более 40% общей площади ее территории. Однако большая их часть находится в зоне холодного климата и около 60% территории приходится на зону многолетней мерзлоты. Ежегодный суммарный сток CO<sub>2</sub> из атмосферы в леса России составлял в период 1991–2000 гг. около 95 млн. т С в год при изменениях в пределах от 74 до 134 млн. т С/год. Эмиссия CO<sub>2</sub> при пожарах в период 1990–2002 гг. варьировала в пределах 4–50 млн. т С/год, составив в среднем за десятилетие 15 млн. т С/год. Истинная величина стока углерода зависит от погодных условий в конкретный год и объемов лесной растительности, погибшей при пожарах и теряемой при рубках леса, и находится в пределах 74–160 млн. т С/год. Это означает, что частичная компенсация антропогенной эмиссии от промышленных и других источников в России лесными угодьями оценивается в пределах 16–33% в год.

В 1995–2002 гг. сельскохозяйственная деятельность приводила к ежегодной эмиссии 32–50 млн. т углерода в атмосферу в виде CH<sub>4</sub>. Другим источником углерода в виде метана является животноводство, а именно ферментация крупного рогатого скота. По сравнению с общим объемом антропогенных выбросов парниковых газов в CO<sub>2</sub>-эквиваленте выброс от животноводства не превосходит 2%.

*Промышленные источники ПГ.* Россия — одна из ведущих стран мира по добыче и экспорту ископаемого топлива. Наиболее значимыми по объемам эмиссии CO<sub>2</sub> являются: топливная, электроэнергетическая отрасли и промышленность стройматериалов, а по CH<sub>4</sub> — газовая, угольная, нефтедобывающая отрасли. Указанным отраслям

принадлежит до 90% выбросов CO<sub>2</sub> общего промышленного выброса этого газа и более 80% выбросов CH<sub>4</sub> по отношению к общему объему выбросов метана. При этом отраслями топливно-энергетического комплекса обеспечивалось преимущественное потребление природного газа и продуктов переработки нефти. Объемы эмиссии парниковых газов в атмосферу оцениваются по результатам инвентаризации источников выбросов. Сведения об инвентаризации источников эмиссии парниковых газов в значениях CO<sub>2</sub>-эквивалента на территории России приводятся в табл. ТР4.3. Из данных таблицы следует, что уровень эмиссии в 2004 г. превышен на 15% по отношению к 1990 г. только по газам техногенного происхождения. По другим газам эмиссия не достигла уровня 1990 г. Если увеличение объемов выбросов будет происходить с той же скоростью, как в настоящее время, при увеличении ВВП на 6–7% в год, то следует ожидать превышение базового уровня эмиссий CO<sub>2</sub>-эквивалента выбросов уже к 2020 г.

### 5. Климатические модели

В настоящее время широко признается, что объединенные модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) являются наиболее перспективным инструментом исследования процессов, действующих в климатической системе, естественной изменчивости климата, а также его реакции на внешние, в том числе антропогенные, воздействия. Современные МОЦАО включают в качестве основных компонентов интерактивные блоки атмосферы, океана, деятельного слоя почвы, криосферы и биосферы. Поскольку для значитель-

ной части климатически значимых процессов пространственное разрешение МОЦАО пока недостаточно, такие процессы представлены в них с помощью параметризаций, основанных на соотношениях между климатическими характеристиками разных масштабов.

В последние десятилетия широкое распространение получили исследования регионального климата с помощью физически полных региональных климатических моделей (РКМ), которые отличаются от глобальных более высоким разрешением, что позволяет с их помощью более реалистично воспроизводить экстремальные явления. Эти модели используются для ограниченной территории. Современные РКМ имеют горизонтальное разрешение порядка 10 км и размеры области вплоть до субконтинентальных. Эти модели позволяют повысить качество расчетов регионального климата с помощью более реалистичного описания неоднородностей подстилающей поверхности. Однако из-за большой вычислительной ресурсоемкости РКМ протяженности модельных регионов остаются небольшими, и ансамблевые расчеты с ними пока не имеют широкого распространения.

#### **Чувствительность климата и обратные связи.**

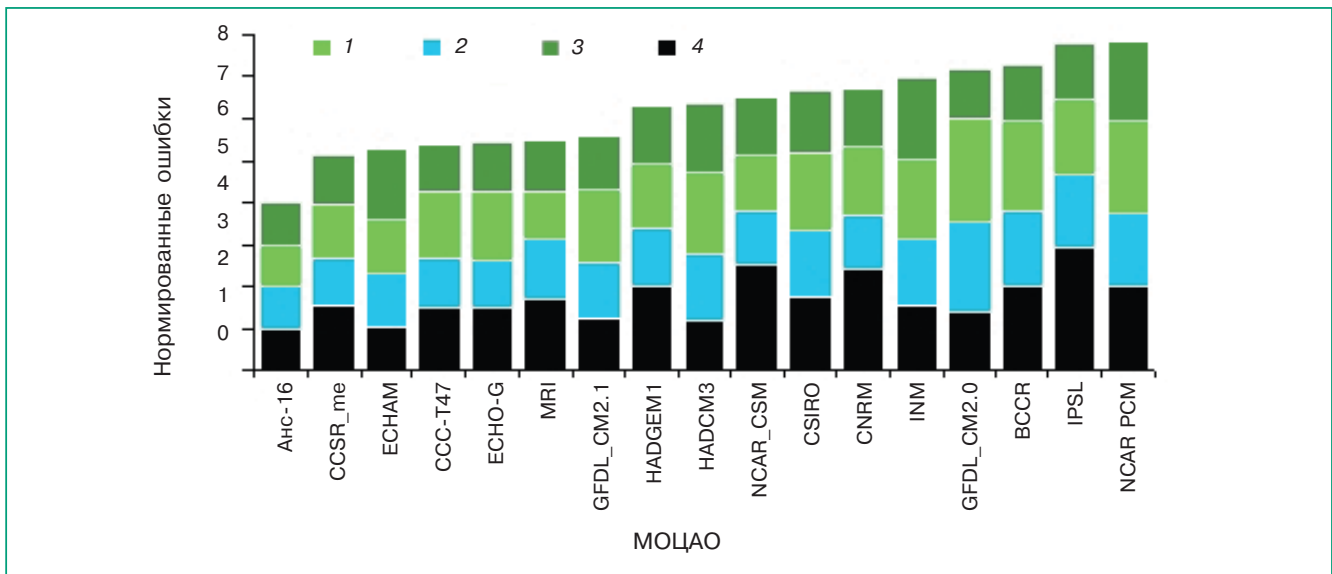
Реакция климата на внешнее радиационное воздействие определяется внутренними процессами с обратными связями, которые усиливают или ослабляют это воздействие. Часто в качестве характеристики чувствительности моделей используется равновесное изменение средней за год глобальной температуры земной поверхности при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Обратные связи, определяющие эту чувствительность, являются одними из первостепенных источников неопределенности при оценках будущих изменений климата. В настоящее время вероятность того, что чувствительность климата находится в пределах 2,0–4,5°C, оценивается как очень высокая при наиболее вероятном значении 3°C. Качество воспроизведения моделями разных обратных связей различно. Анализ данных наблюдений показывает, что наиболее успешно воспроизводятся обратные связи между потеплением климата, с одной стороны, и изменениями содержания водяного пара и вертикального градиента температуры в атмосфере, с другой. Большой разброс оценок чувствительности климата среди существующих моделей связан преимущественно с межмодельными различиями в воспроизведении облачно-радиационных обратных связей. Определенный вклад в разброс оценок чувствительности глобального и регионального климата вносят криосферные процессы. В климатической системе действуют и другие обратные связи. Некоторые из них, например, включающие термохалинную циркуляцию океана, описываются современными МОЦАО. Другие об-

ратные связи, например, включающие биогеохимические процессы, представлены в некоторых версиях современных МОЦАО, но пока весьма упрощенно.

**Оценка качества климатических моделей.** Если модель позволяет воспроизводить современный климат, различные состояния климатической системы, наблюдавшиеся в далеком прошлом (когда внешние воздействия сильно отличались от современных), а также эволюцию климатической системы (т. е. связанные с внешним воздействием тренды и собственную изменчивость), полученные с помощью этой модели 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. Исследованию разных аспектов моделирования климата, особенностей и систематических ошибок МОЦАО и их компонентов посвящены многочисленные международные проекты сравнения моделей и действующие в рамках этих проектов диагностические и экспериментальные подпроекты, создающие обширную основу для объективного сопоставления и оценки качества современных моделей. Наиболее известным международным проектом сравнения моделей на сегодняшний день является проект сравнения объединенных моделей (атмосферы и океана) CMIP (Coupled Model Intercomparison Project).

**Ансамблевый подход.** Параллельные расчеты с одной или несколькими моделями при одинаковом внешнем воздействии принято называть ансамблевыми. Ансамбли, составленные из расчетов с одной и той же моделью, но при разных начальных условиях, характеризуют неопределенность, обусловленную собственной климатической изменчивостью данной модели. Мультимодельные ансамбли, составленные из расчетов с независимыми моделями, характеризуют неопределенность, обусловленную межмодельными различиями. Наиболее высокую успешность при сравнении с данными наблюдений, как правило, показывает результат осреднения по мультимодельному ансамблю. Это связано с тем, что систематические ошибки, присущие каждой модели в отдельности, часто являются случайными по отношению к ансамблю моделей и при осреднении взаимно компенсируются. С другой стороны, поскольку климатической системе присуща собственная изменчивость, соответствующая часть неопределенности оценок будущих изменений этой системы не мо-





**Рис. TP5.1.** Средние за год среднеквадратические ошибки температуры приземного воздуха на континентах (1), температуры воды поверхности океанов (2), осадков (3) и давления на уровне моря (4), рассчитанные по 16 МОЦАО CMIP3 в Северном полушарии для периода 1980–1999 гг. Ошибки отдельных переменных для каждой модели нормированы на соответствующие ошибки, вычисленные по ансамблю из 16 МОЦАО и суммированные по четырем указанным переменным — совокупный индекс качества моделей. Все модели ранжированы в порядке увеличения индекса (уменьшения качества) моделей. При вычислении среднеквадратических ошибок использованы климатические данные о приземной температуре воздуха, температуре поверхности океанов, осадках и давлении на уровне моря в Северном полушарии за период 1980–1999 гг.

жет быть устранена только усовершенствованием моделей. Из-за нелинейности климатической системы модельные расчеты ее эволюции чувствительны к малым возмущениям в начальных условиях. Решая проблему предсказуемости климата, необходимо исследовать неизбежную неопределенность, связанную с собственной изменчивостью, которую можно описать в терминах вероятностного распределения. С этой целью необходимо проводить ансамблевые расчеты с варьированием как начальных состояний, так и неопределенных модельных параметров в реалистичном диапазоне, связанном с вероятностным распределением. Такой подход, чрезвычайно успешно используемый в прогнозах погоды, позволяет оценить изменения функций распределения вероятности для разных климатических характеристик, т. е. получить намного более полную и достоверную картину изменения климата по сравнению с одиночным расчетом.

**Расчеты современного климата с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3.** В рамках подготовки Четвертого оценочного доклада МГЭИК был организован беспрецедентный по своим масштабам и количеству участников проект по анализу расчетов климата с помощью МОЦАО нового поколения (CMIP3). Основу проекта составили расчеты климата XX

века при заданных в соответствии с данными наблюдений концентрациях парниковых газов и аэрозолей, а также три сценарных расчета климата XXI века (для трех сценариев антропогенного воздействия на глобальный климат — A2, A1B и B1 в соответствии с номенклатурой МГЭИК). По сравнению с предыдущим поколением МОЦАО произошло их улучшение как класса моделей, обусловленное не только увеличением пространственного разрешения, усовершенствованием используемых вычислительных методов и параметризаций, но и включением рядом моделей описаний дополнительных климатически значимых процессов. При этом произошли улучшения в воспроизведении современного климата во многих аспектах. Существенный прогресс достигнут в понимании межмодельных различий чувствительности климата.

**Совокупное качество моделей CMIP3.** Развитие ансамблевого подхода неразрывно связано с разработкой системы количественных показателей совокупного качества климатических моделей. Пример оценки совокупного качества моделей CMIP3 приводится на рис. TP5.1. Крайнюю слева позицию занимает “средняя” по ансамблю модель, имеющая наименьшую ошибку. Это означает, что систематические ошибки отдельных МОЦАО являются случайными по отношению к ан-

**Таблица TP5.1.** Средние систематические ошибки и стандартные отклонения температуры приземного воздуха (°C) на территории России, рассчитанные по ансамблю 19 МОЦАО для современного климата (1980–1999 гг.)

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

*Примечание.* В качестве наблюдений использованы данные CRU. Также приводятся стандартные отклонения температуры, характеризующие межмодельный разброс ( $\pm\sigma$ ) по отношению к средней систематической ошибке по ансамблю МОЦАО.

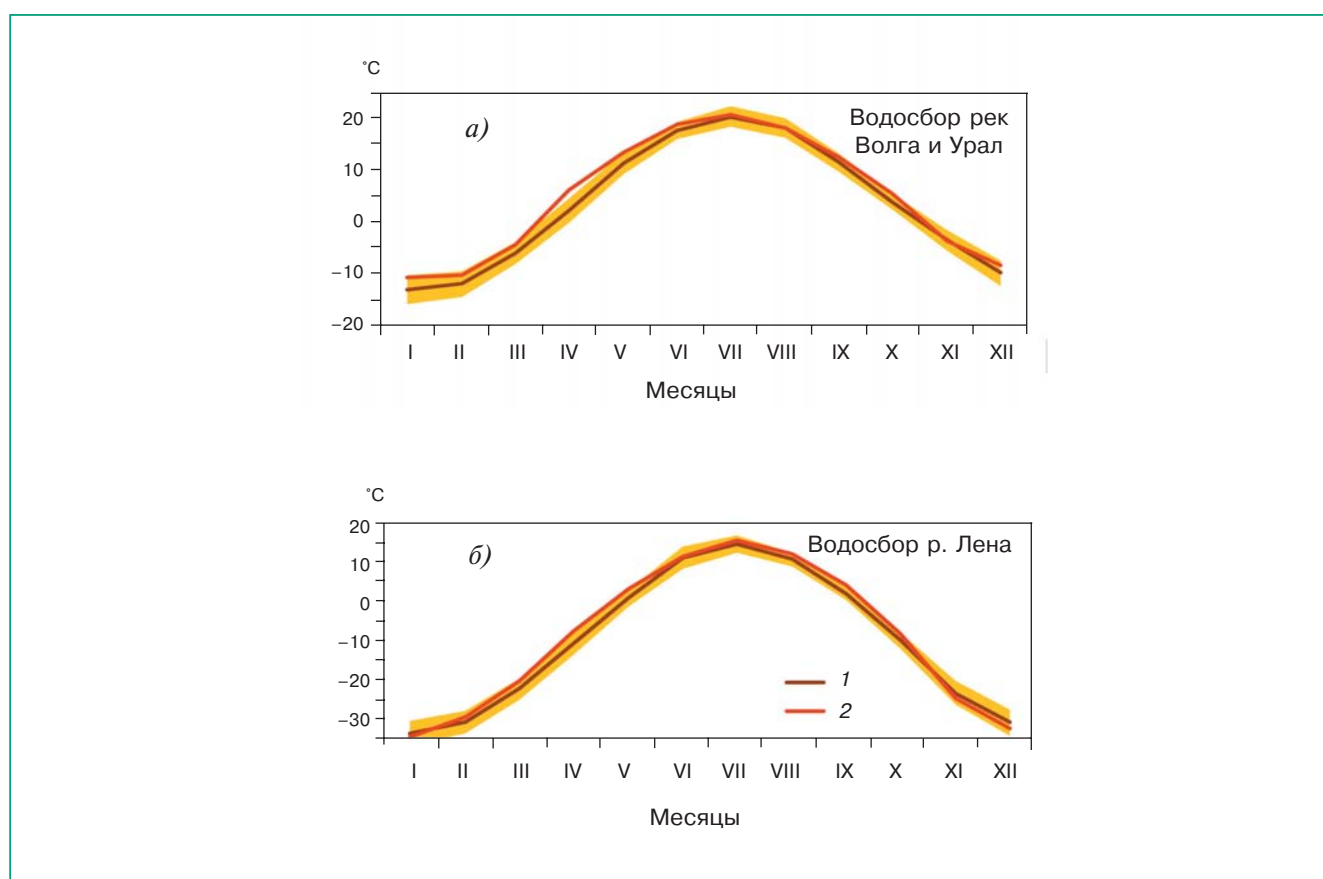
самблю моделей. Более того, очевидной связи между ошибками разных переменных в одних и тех же моделях не обнаруживается.

**Радиация и облачность.** Полный глобальный радиационный баланс на верхней границе атмосферы, осредненный за несколько лет, при отсутствии внешних воздействий должен равняться нулю. Если этот баланс в модели не выполняется, то модельная система атмосфера – поверхность земли в процессе интегрирования на большие сроки должна несколько нагреваться или охлаждаться в зависимости от знака невязки. Указанное условие представляется важным, поскольку при удвоении концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере дополнительное радиационное воздействие составляет примерно 4 Вт/м<sup>2</sup>. Согласно оценкам ОД4, суммарное радиационное воздействие на климат, обусловленное влиянием увеличения концентрации парниковых газов и аэрозоля в атмосфере, к 2005 г. составило 1,6 Вт/м<sup>2</sup>. По результатам расчета климата XX века радиационный дисбаланс в большинстве МОЦАО СМIP3 оказался в пределах 1 Вт/м<sup>2</sup>, однако в отдельных моделях большим, чем тот, который получался при использовании известных сценариев увеличения концентрации парниковых газов. Эта невязка может быть вызвана несколькими причинами, в том числе различиями в установлении вертикальной структуры глобальной облачности (завышение (занижение) количества облаков верхнего яруса по отношению к нижнему). Что касается общей облачности, в целом МОЦАО хорошо воспроизводят ее сезонные изменения, за исключением зимы, когда количество облаков систематически занижается на всех речных бассейнах. Это вызвано преимущественным занижением количества облаков нижнего яруса, формирующихся на границе пограничного слоя. В течение всего года наблюдается значительный межмодельный разброс в расчетах общего количества облаков. Для выяснения того, насколько эти ошибки существенны для расчетов радиационных потоков

и термического режима на подстилающей поверхности, требуются дальнейшие исследования.

**Температурный режим.** В целом модели реалистично воспроизводят температуру приземного воздуха на территории России и сопредельных регионов. Географическое распределение расчетных отклонений годового и сезонных значений температуры воздуха от данных наблюдений характеризуется рядом особенностей. Ансамбль МОЦАО занижает среднюю за год температуру (средняя ошибка  $(-1,8 \pm 1,5)^\circ\text{C}$ ) на большей части территории России, особенно в холодное время года на северо-западе и в Западной Сибири (табл. TP5.1). Эта погрешность может быть связана с занижением моделями температуры в Северной Атлантике, Норвежском и Баренцевом морях на 4–8°C в течение всего года и с избытком морского льда в Баренцевом море, что в свою очередь, по-видимому, связано с занижением притока теплых вод из Северной Атлантики в Арктику.

Большинство МОЦАО успешно воспроизводит сезонный ход температуры приземного воздуха в различных регионах России (рис. TP5.2). Осредненная по территории России годовая амплитуда приземной температуры воздуха (разность июль – январь), которая по данным наблюдений составляет 39,2°C, несколько завышается ансамблем МОЦАО (на  $(1,0 \pm 3,3)^\circ\text{C}$ ). При этом на ЕТР эта погрешность составляет  $(2,8 \pm 3,0)^\circ\text{C}$ , в Западной Сибири  $(0,9 \pm 3,9)^\circ\text{C}$ , в Восточной Сибири  $(-1,9 \pm 3,6)^\circ\text{C}$ . Межмодельный разброс заметно превышает среднюю ошибку по ансамблю. Ансамбль МОЦАО реалистично воспроизводит распределение годовых максимумов, включая положение области наиболее высокой температуры в регионе южнее Аральского моря. При этом обнаруживается тенденция к некоторому занижению моделями годовых максимумов (на 2–4°C) в центральных районах Сибири и на Крайнем Севере. Модели заметно завышают годовые минимумы температуры, в первую очередь, в северо-восточ-



**Рис. TP5.2.** Внутригодовой ход температуры приземного воздуха (°C) на водосборах рек России за период 1980–1999 гг., рассчитанный по ансамблю из 19 МОЦАО (1) и полученный по данным наблюдений (2). Выделенная область показывает стандартное отклонение от среднего по ансамблю. Расчеты представлены для водосборов Волги и Урала (а) и Лены (б).

ных регионах России, где формируются глубокие инверсии температуры в нижней тропосфере.

**Циркуляционный режим атмосферы.** Климатической системе присущ широкий диапазон колебаний атмосферной циркуляции — от внутрисезонных до многолетних и вековых. Успешное воспроизведение моделями этих колебаний повышает доверие к расчетам будущих изменений циркуляции атмосферы. Изменения циркуляции атмосферы над Северной Евразией зависят от сезонного положения и интенсивности основных центров действия атмосферы в Северном полушарии. Ансамбль моделей СМIP3 достаточно успешно воспроизводит положение и интенсивность исландского и алеутского минимумов и сибирского максимума зимой. Летом более выраженными оказываются субтропические антициклоны в Атлантическом и Тихом океанах, причем в расчетах по моделям они получились несколько более интенсивными, чем показывают данные наблюдений.

Сравнение с ансамблем МОЦАО предыдущего поколения говорит об улучшении воспроизведения моделями СМIP3 атмосферного давления над субарктической частью Тихого океана (особенно зимой), а также в восточной части Северного Ледовитого океана.

Модели атмосферы успешно воспроизводят режимы циркуляции в Северном полушарии над Северной Атлантикой и Тихим океаном. Они более реалистично воспроизводят положение блокингов, чем их повторяемость (длительность). Обычно в моделях блокинги возникают реже и исчезают быстрее. Использование климатических моделей в сезонных прогнозах является хорошим тестом для оценки способности этих моделей воспроизводить физические и динамические процессы, описывающие естественные колебания в климатической системе.

**Атмосферные осадки.** В общих чертах ансамбль моделей реалистично воспроизводит ос-

новные крупномасштабные характеристики осадков. Вместе с тем сравнение наблюдаемых значений и ошибок расчета (табл. TP5.2) показывает, что ансамбль моделей несколько завышает (на 8%) годовые суммы осадков по России по отношению к климатической норме (Западная Сибирь — 12%, Восточная Сибирь — 11%). Меж-

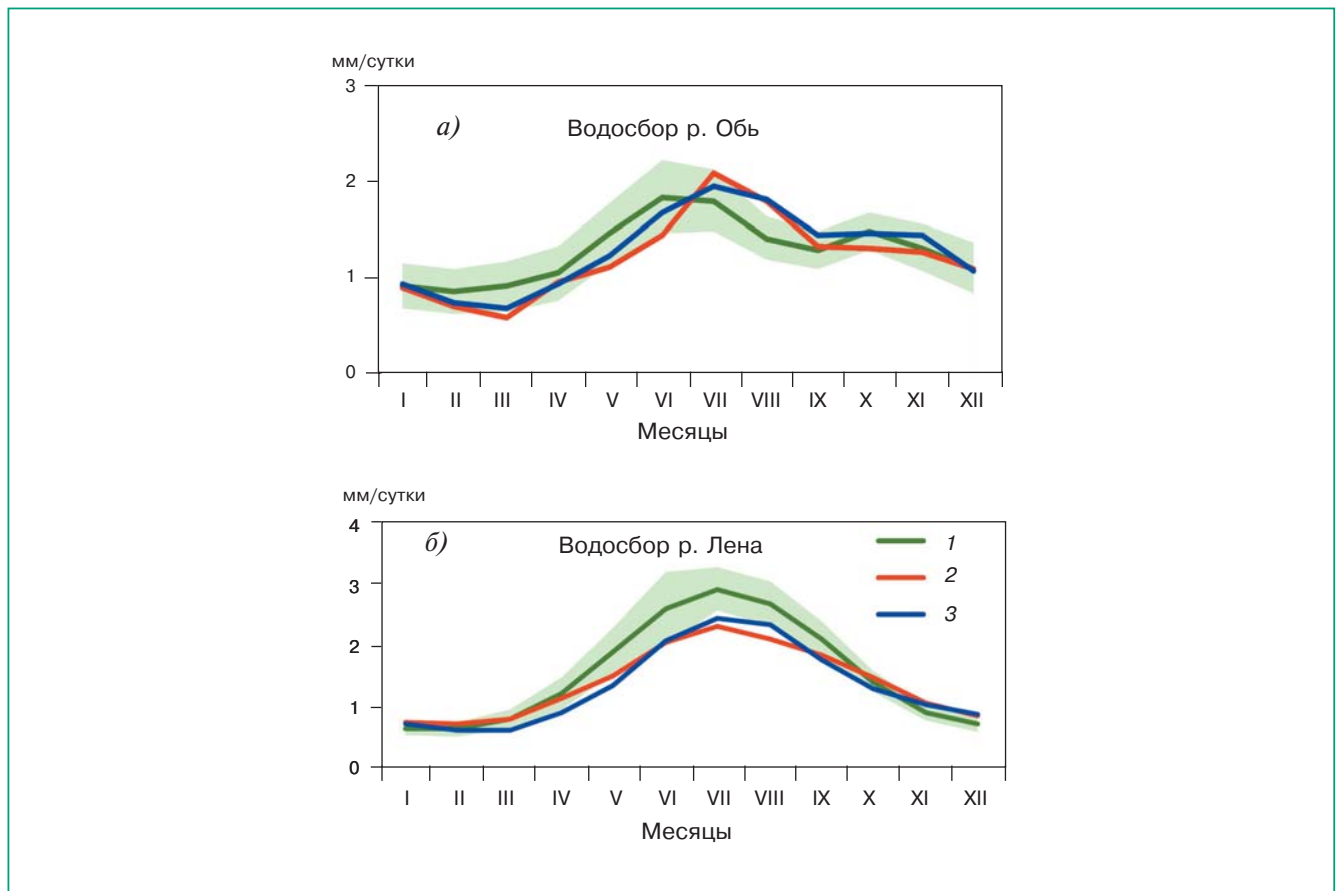
модельные стандартные отклонения оказываются, как правило, большими примерно в 1,5 раза, чем средние за год погрешности для всей территории России.

В целом средний сезонный ход, рассчитанный по моделям, удовлетворительно согласуется с наблюдениями во всех четырех бассейнах, характе-

**Таблица TP5.2.** Средние систематические ошибки расчета количества осадков (% по отношению к наблюдаемым значениям) на территории России по ансамблю из 19 МОЦАО для современного климата (1980–1999 гг.)

Регион	Зима	Лето	Год
Россия	8 ± 18	4 ± 16	12 ± 14
ЕТР	-3 ± 17	5 ± 14	8 ± 13
Западная Сибирь	-3 ± 14	-13 ± 13	-2 ± 11
Восточная Сибирь	-20 ± 26	19 ± 19	11 ± 18

*Примечание.* В качестве наблюдений использованы данные (Legates and Willmott, 1990). Также приводятся стандартные отклонения количества осадков, характеризующие межмодельный разброс ( $\pm\sigma$ ) по отношению к средней систематической ошибке по ансамблю.



**Рис. TP5.3.** Сезонный ход осадков (мм/сутки) на водосборах рек Обь (а) и Лена (б), рассчитанный по ансамблю из 19 МОЦАО (1) за период 1980–1999 гг., по данным реанализа ERA-40 (2) и по данным наблюдений (3) за период 1960–1989 гг.

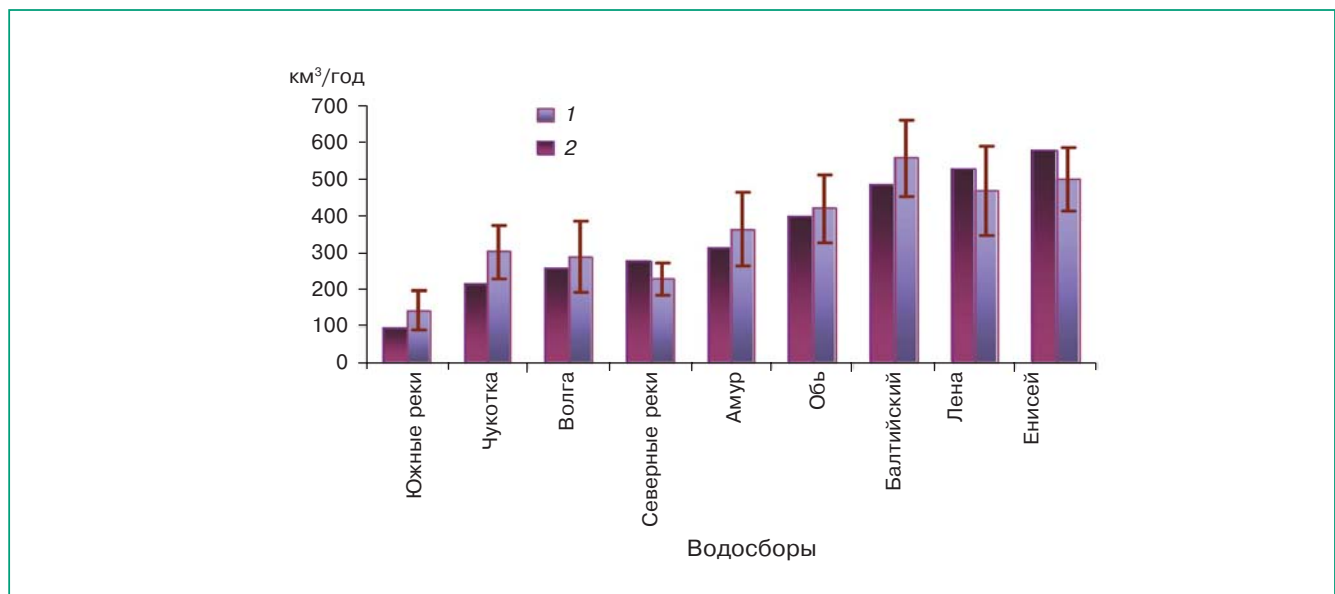
ризующихся летними максимумами и зимними минимумами (рис. TP5.3). Средние рассчитанные осадки летом по ансамблю моделей завышаются, особенно в бассейнах Енисея и Лены, и показывают заметный межмодельный разброс, который особенно выражен летом.

По сравнению с предыдущим поколением МОЦАО SMIP2 есть основания считать, что произошло некоторое улучшение качества расчета осадков. В частности, среднемодельные отклонения находятся в пределах разброса оценок по данным наблюдений, и число моделей, реалистично воспроизводящих ключевые характеристики (средние значения, сезонный ход), увеличилось.

**Речной сток.** Рассчитанная в моделях средняя многолетняя разность между осадками и испарением характеризует средний годовой сток на крупных водосборах. Эта характеристика важна для проверки способности МОЦАО воспроизводить водный баланс на водосборах крупных речных бассейнов. В целом распределение стока по основным водосборам воспроизводится МОЦАО реалистично (рис. TP5.4). На большинстве водосборов России годовой сток несколько завышен. С другой стороны, модельные оценки стоков на водосборах Лены, Енисея и северных рек — ниже наблюдаемых значений. Межгодовая изменчивость (стандартные отклонения) стока сибирских рек (Обь, Енисей, Лена) по данным наблюдений составляет 7–15%, а межмодельный разброс в ансамбле составил 18–26%.

**Снежный покров суши.** Площадь снежного покрова является наиболее надежно измеряемой характеристикой с помощью спутниковых наблюдений. Однако данные наблюдений за толщиной снежного покрова недостаточны для полноценного анализа качества модельных расчетов этой характеристики. Ансамбль МОЦАО в среднем завышает площадь снежного покрова в течение холодного времени года (рис. TP5.5), а также демонстрирует значительный межмодельный разброс географического распределения снежного покрова. По отношению к данным наблюдений многие модели демонстрируют избыток снега весной и запаздывание весеннего таяния вследствие занижения температуры приземного воздуха в Северной Евразии. Это согласуется с некоторым занижением температуры приземного воздуха на территории России. С другой стороны, формирование снежного покрова в осенне-зимний период воспроизводится моделями в целом достаточно хорошо. МОЦАО, как правило, занижают межгодовую изменчивость площади снежного покрова в Евразии в зимний и весенний периоды. Разброс между МОЦАО в расчетах снежного водного эквивалента также значителен. Оценить относительную успешность воспроизведения этой характеристики разными моделями не представляется возможным из-за отсутствия надежных данных наблюдений.

**Многолетняя мерзлота.** Наиболее важными характеристиками многолетней мерзлоты являются



**Рис. TP5.4.** Средние значения годового стока (км<sup>3</sup>/год) за базовый период 1980–1999 гг. на водосборах крупных речных бассейнов России и сопредельных регионов, рассчитанные по ансамблю из 13 МОЦАО (1) и полученные по данным наблюдений (2). В столбцах с расчетами по моделям помимо средних даются стандартные отклонения ( $\pm\sigma$ ), характеризующие межмодельный разброс.



ся: положение границ отдельных ее зон, эволюция глубины сезонного протаивания и сезонного промерзания, температура многолетнемерзлых слоев на разных глубинах. Далеко не все расчетные характеристики можно сравнить с измеренными значениями. Пространственная неоднородность наблюдений весьма велика, при этом наличие или отсутствие многолетнемерзлых слоев чрезвычайно зависимы от ландшафта и состава почвогрунтов. Вместе с тем анализ модельных распределений температуры по глубинам позволяет установить общие закономерности, характеризующие профили температуры в разных зонах многолетней мерзлоты и сформулировать условия для определения фонового положения границ. В частности, модельное положение среднегодовой нулевой изотермы на глубине 3 м для суглинков, осредненное за период 1980–1999 гг., достаточно реалистично описывает современную границу многолетней мерзлоты, включая зоны прерывистой и островной мерзлоты.

**Морской лед.** Прогностическими переменными ледовых компонентов МОЦАО обычно являются толщина (или удельная масса) льда, сплоченность, толщина снежного покрова, температура поверхности, а также скорость дрейфа. Площадь распространения морского льда является его сравнительно надежно измеряемой (со спутников) характеристикой и потому используется в сравнительных анализах модельных расчетов в качестве основной. Однако данные наблюдений за толщиной и скоростью дрейфа льда не доста-

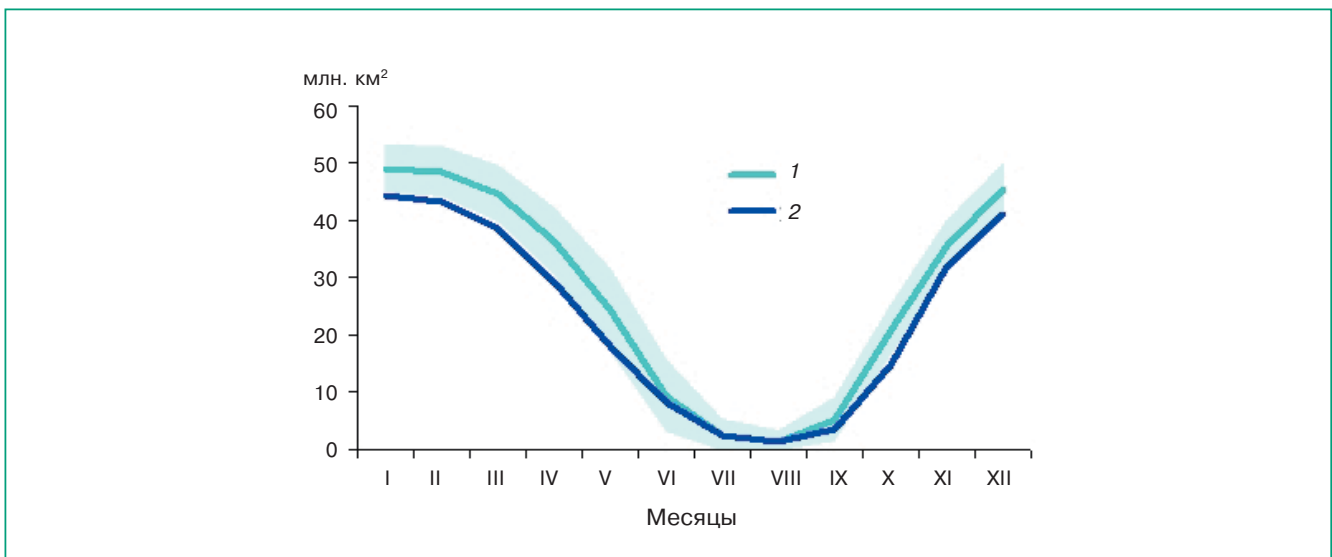
точны для полноценного анализа качества модельных расчетов этих характеристик. Модели удовлетворительно воспроизводят сезонный ход площади ледового покрова Северного Ледовитого океана (рис. TP5.6).

Ансамбль МОЦАО несколько завышает площадь морского льда в Северном полушарии в течение всего года. Это завышение может быть связано с погрешностями воспроизведения (по крайней мере, некоторыми моделями) атмосферной и океанской циркуляции и, в частности, Гольфстрима. Межмодельный разброс в расчетах площади и массы морского льда значителен. В целом, несмотря на прогресс в понимании физических процессов, развитие ледовых компонентов современных МОЦАО не привело к радикальному улучшению воспроизведения ледового покрова океана ансамблем моделей СМIP3 по сравнению с предыдущим поколением моделей.

## 6. Антропогенный вклад в изменение климата

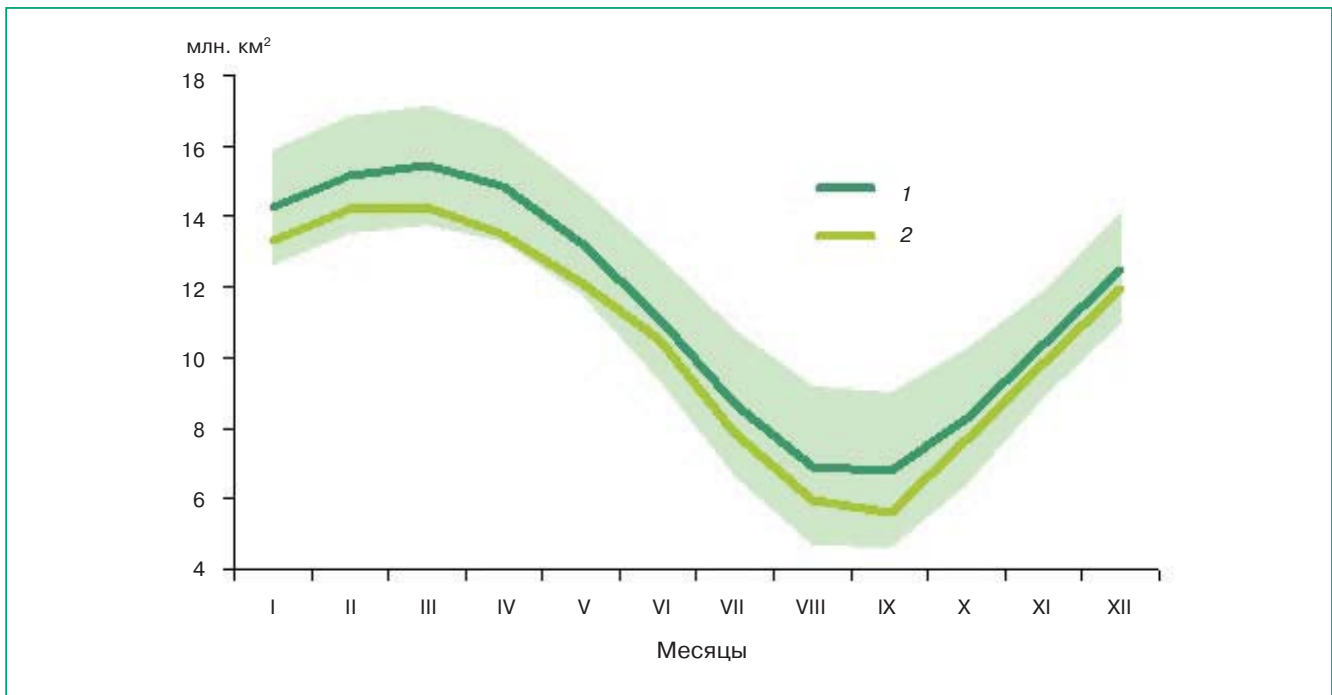
### Причины наблюдаемых изменений климата

Сравнение данных наблюдений за глобальной температурой приземного воздуха с результатами модельных расчетов дает убедительные аргументы в пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления. В рамках проекта СМIP3 было выполнено две серии расчетов с МОЦАО по воспроизведению климатических изменений в период инструментальных наблюдений. В первой



**Рис. TP5.5.** Внутригодовой ход площади снежного покрова (млн. км<sup>2</sup>) на суше в Северном полушарии (1980–1999 гг.) (10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>) по ансамблю из 18 МОЦАО (1) и по данным наблюдений (2). Заштрихованная область соответствует стандартному отклонению отдельных МОЦАО от среднего по ансамблю.





**Рис. TP5.6.** Внутригодовой ход площади морского льда (млн. км<sup>2</sup>) в Северном полушарии (1980–1999 гг.) (10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>) по ансамблю МОЦАО (1) и по данным наблюдений (2). Выделенная область соответствует стандартному отклонению от среднего по ансамблю.

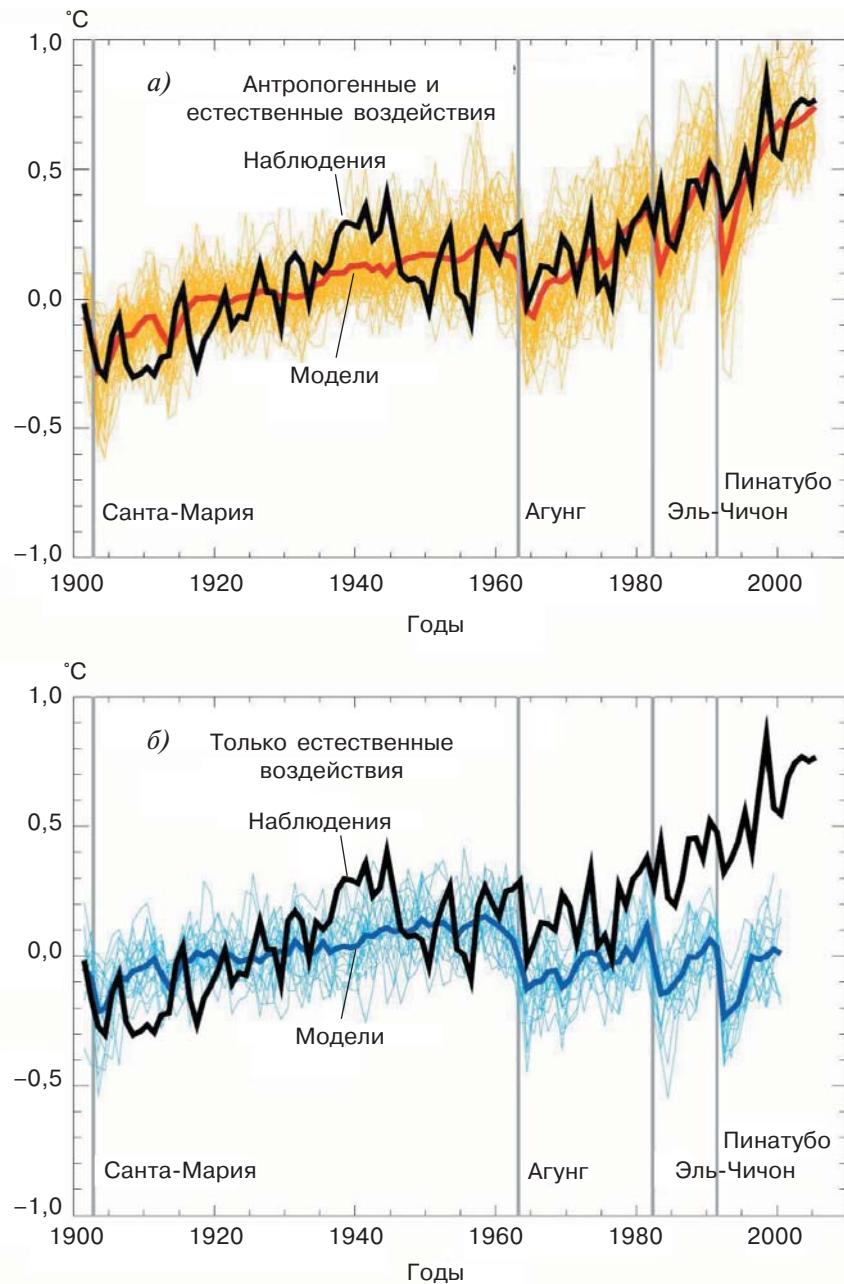
серии учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия (АЕВ расчеты), а во второй только естественные (ЕВ расчеты). В ЕВ расчетах учитывались наблюдаемые изменения в потоке приходящего солнечного излучения на верхней границе атмосферы, а также изменения концентрации атмосферного аэрозоля, вызванные вулканической деятельностью. В АЕВ расчетах кроме этих факторов во внимание принимались наблюдаемые изменения концентрации парниковых газов в атмосфере, включая изменения тропосферного и стратосферного озона, изменения сульфатного аэрозоля, вызванные хозяйственной деятельностью человека, а в некоторых экспериментах учитывались также изменения в землепользовании. Сравнение двух модельных ансамблей и данных наблюдений показывает, что изменения глобальной температуры в значительной степени контролируются внешними воздействиями (рис. TP6.1) и что только в АЕВ расчетах, учитывающих антропогенные внешние воздействия, хорошо воспроизводится наблюдаемое повышение температуры воздуха.

Большая изменчивость наблюдаемой температуры по сравнению с ансамблевым средним в АЕВ расчетах может быть объяснена подавлением межгодовой изменчивости в результате ансамблевого осреднения. Современные МОЦАО хорошо воспроизводят межгодовую изменчивость и дают пра-

вильную картину влияния извержений крупных вулканов на изменения температуры. Влияние антропогенного воздействия на температуру приземного воздуха обнаруживается не только в глобальных изменениях, но и на каждом континенте за исключением Антарктиды, где недостаточно данных наблюдений для достоверных выводов. Таким образом, прямое сравнение модельных расчетов с данными наблюдений показывает, что с высокой степенью вероятности отмечаемое потепление не может быть объяснено лишь естественными причинами, и антропогенный фактор ответственен за большую часть глобального потепления, наблюдаемого во второй половине XX века.

В последние годы выполнено много исследований, использующих формальные статистические методы для выделения вклада отдельных внешних воздействий в наблюдаемое глобальное потепление. В расчетах использовались разные МОЦАО и методы параметризации внешних воздействий. Несмотря на эти различия, все модели показывают значительный антропогенный вклад в глобальное потепление.

Статистический анализ позволяет обнаружить антропогенное влияние не только на температуру приземного воздуха, но и на другие характеристики климатической системы, например, на вертикальное распределение температуры атмосферы. Во второй половине XX века по данным



**Рис. TP6.1.** Аномалии средней глобальной температуры приземного воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) по данным наблюдений и расчетов с учетом антропогенных и естественных внешних воздействий (а) и только естественных воздействий (б). К естественным воздействиям относятся изменения приходящего на верхнюю границу атмосферы солнечного излучения и влияние вулканической деятельности на аэрозольный состав атмосферы, а к антропогенным — изменения концентрации парниковых газов и сульфатного аэрозоля. Аномалии рассчитаны по отношению к среднему за 1901–1950 гг. На рисунке а результаты 58 расчетов по 14 МОЦАО показаны тонкими желтыми линиями, а среднее по мультимодельному ансамблю — жирной красной линией. На рисунке б представлены результаты 19 расчетов по 5 моделям. Расчеты показаны тонкими голубыми линиями, а среднее по мультимодельному ансамблю — жирной синей линией. Серыми линиями отмечено время наиболее значительных извержений вулканов.

высотного зондирования атмосферы наблюдалось повышение температуры в тропосфере и понижение в стратосфере, что отразилось на увеличении высоты тропопаузы. Результаты анализа показывают, что основными факторами, вызвавшими эти изменения, были повышение концентрации парниковых газов и уменьшение концентрации стратосферного озона.

Исследовалось также влияние антропогенного воздействия на частоту и интенсивность климатических экстремумов. В этих работах использовались стандартизированные индексы экстремумов, которые включают, в частности, среднегодовое число наиболее холодных и теплых дней и ночей, а также соответствующую им температуру, и ряд других характеристик. Изменения, происходившие с этими индексами, хорошо согласуются с наблюдаемым потеплением.

Глобальное потепление, в принципе, должно приводить к уменьшению толщины и площади морского льда, снежного покрова суши и ледников. Данные наблюдений показывают, что среднегодовая площадь морского льда в Арктике уменьшилась в последние десятилетия, кроме того, ледяной покров стал тоньше. Оценка величины линейного тренда площади морского льда для периода 1980–1999 гг., полученная по ансамблю расчетов с современными МОЦАО, оказалась близкой к аналогичной оценке, полученной по данным наблюдений. В Южном полушарии уменьшения ледяного покрова по данным наблюдений не зафиксировано.

Площадь снежного покрова в Северном полушарии, по данным спутниковых измерений, за последние 30 лет значительно сократилась. Изменения снежного покрова определяются совместным влиянием изменений температуры и количества выпадающих осадков. Основной причиной наблюдаемых в последние десятилетия изменений стало повышение температуры приземного воздуха. Однако в некоторых областях с очень низкой среднегодовой температурой наблюдался рост толщины снега, что объясняется увеличением осадков. Анализ эволюции снежного покрова в XX веке, выполненный по ансамблю расчетов с 18 МОЦАО СМIP3, показал, что для периода 1980–1999 гг. величина линейного тренда площади снежного покрова Северного полушария оказалась довольно близкой к соответствующей оценке, полученной по данным наблюдений. Во второй половине XX века наблюдалось также увеличение температуры верхнего слоя почвы глубиной 3 м, что отразилось на увеличении глубины сезонно-талого слоя в регионах, занимаемых многолетней мерзлотой, и на уменьшении глубины сезонно-мерзлого слоя в регионах, где ее нет. Анализ показал хорошее согласование

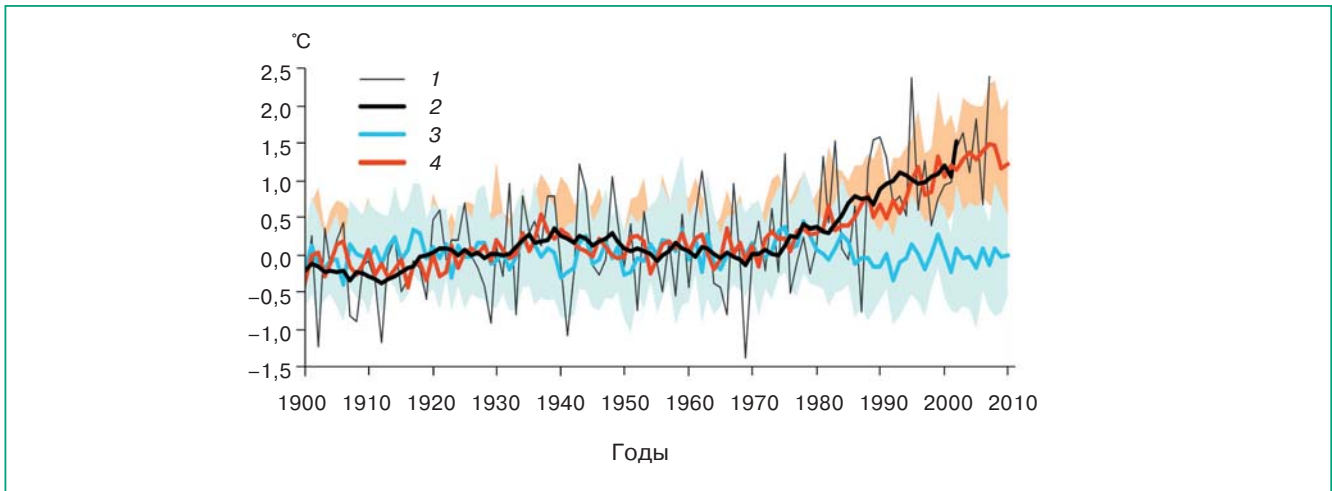
наблюдаемых и расчетных трендов глубины промерзания и протаивания на территории России.

Полученные по данным наблюдений оценки показывают увеличение общего запаса тепла в Мировом океане за период с 1961 по 2003 г. В конце XX века Мировой океан получил дополнительное тепло, по крайней мере, на порядок больше, чем любой другой компонент климатической системы Земли. Увеличение теплозапаса океана нельзя объяснить только естественными внешними воздействиями (например, увеличением приходящей радиации на верхней границе атмосферы) без учета антропогенного влияния. Несмотря на некоторые неопределенности как в данных наблюдений, так и в модельных расчетах, наблюдаемая картина изменений температуры Мирового океана на разных глубинах очень хорошо согласуется с предположением о нагревании океана вследствие положительного радиационного притока на поверхности. Так, нагрев океана распространяется из верхних слоев в нижние, и проникновение тепла глубже в средних и высоких широтах, где сильнее океаническая конвекция.

Таким образом, наблюдается одновременное увеличение запаса энергии во всех основных компонентах климатической системы Земли. Причем амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления хорошо согласуются с ожидаемым по модельным расчетам откликом климатической системы на антропогенные внешние воздействия.

### *Антропогенное потепление на территории России.*

Данные наблюдений за климатом России показывают на беспрецедентное повышение температуры приземного воздуха, начавшееся с середины 1970-х годов. Чтобы установить наличие антропогенного сигнала в этом процессе, выполнено сравнение годовых и сезонных аномалий температуры по данным наблюдений и результатам расчетов по ансамблю МОЦАО СМIP3. Рассмотрены две серии экспериментов — в первой учитывались антропогенные и естественные внешние воздействия, а во второй — только естественные воздействия. Анализ временного хода годовых аномалий температуры показал, что наблюдаемый ее положительный тренд невозможно объяснить без учета антропогенного фактора (рис. TP6.2). Более того, из анализа результатов расчетов следует хорошее согласие наблюдаемой с конца 1970-х годов скорости роста температуры воздуха и результатов расчета по ансамблю МОЦАО, учитывающих антропогенное увеличение содержания ПГ и аэрозоля, осредненных по территории всей России. По тем и другим данным тренд средней годовой температуры воздуха составил около  $0,4^{\circ}\text{C}/10$  лет. Такой результат позволяет сделать вывод, что наблюдаемый на территории России положительный тренд температуры, весьма вероятно, во многом объясняется



**Рис. TP6.2.** Временной ход среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха (°C) на территории России, полученных по данным наблюдений (1, 2) и рассчитанных по ансамблю 16 МОЦАО CMIP3 с учетом только естественных внешних воздействий (3), антропогенных и естественных воздействий (4). Аномалии рассчитаны по отношению к среднему за 1901–1950 гг. Кривая (2) получена из (1) с помощью 11-летнего скользящего осреднения. Цветные заштрихованные области показывают межмодельный разброс, равный стандартным отклонениям ( $\pm\sigma$ ) от средних по ансамблю.

увеличением концентрации парниковых газов и аэрозоля в атмосфере.

Полученная по ансамблю моделей аппроксимация тренда антропогенной составляющей температуры позволяет оценить ее вклад в суммарную изменчивость наблюдаемой температуры в целом для территории России. Для этого рассмотрена регрессия исходного (несглаженного) ряда температуры воздуха, с использованием в качестве независимой переменной аппроксимации хода средних ансамблевых аномалий. Расчеты показали, что для периода 1970–2006 гг. вклад антропогенного фактора составляет около 30%; соответственно отношение сигнала к шуму равно примерно 0,4. С другой стороны, по данным наблюдений, доля суммарной дисперсии средней годовой температуры для России, объясняемой линейным трендом, в период 1976–2006 гг. составила 28%. Близость оценок вкладов линейного временного тренда и его антропогенной составляющей может рассматриваться в качестве важного аргумента в пользу того, что главным фактором наблюдаемого в целом по России роста температуры приземного воздуха является антропогенный фактор.

**Антропогенное потепление и альтернативные гипотезы.** Изменения климата происходили в прошлом, при этом теплые и холодные периоды имели разную продолжительность. Изменения радиационного баланса системы атмосфера — поверхность земли являлись основным механизмом изменения климата, однако причины этих измене-

ний были далеко не одинаковыми. В последние годы достигнуты определенные успехи в понимании этих причин и основных механизмов, способствующих усилению первоначально возникших изменений. Многие особенности изменения прошлых климатов могут быть воспроизведены с большой степенью достоверности с помощью современных МОЦАО.

Ледниковые эпохи в прошлом наступали, подчиняясь достаточно регулярным циклам, в течение последних примерно 3 млн. лет. Причем существуют убедительные свидетельства того, что эти циклы связаны с вариациями астрономических параметров орбиты Земли (эксцентриситета, склонения и прецессии). Эти циклы, часто называемые циклами Миланковича, изменяют количество солнечной радиации, получаемой на каждой широте в каждом сезоне. Однако при этом сохраняется среднее за год суммарное количество солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы. Содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере также играло важную роль в изменениях температуры в прошлом. Согласно данным ледниковых кернов в Антарктике, концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере была небольшой в ледниковые периоды ( $\sim 190 \text{ млн}^{-1}$ ) и большой в теплые межледниковые периоды ( $\sim 280 \text{ млн}^{-1}$ ). Более того, изменения концентрации  $\text{CO}_2$  следовали за изменениями температуры с запаздыванием в несколько сотен лет. Поскольку изменения климата между началом и концом ледникового периода охватывают несколько тысяч лет,



то на изменения температуры также оказывала влияние положительная обратная связь содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Это означает, что начальное похолодание, обусловленное началом цикла Миланковича, усиливалось с уменьшением концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Расчеты также показывают, что ледниковый период воспроизводится климатическими моделями только в том случае, когда, помимо изменения астрономических параметров орбиты Земли, также учитываются указанные изменения  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

Что же касается периода инструментальных наблюдений, то результаты совместного анализа наблюдений и расчетов, выполненных с помощью МОЦАО, дают согласованную картину потепления климата и позволяют сделать следующие выводы:

— крайне маловероятно ( $< 5\%$ ), что изменения климата, наблюдавшиеся за последние 50 лет, происходили без внешнего воздействия;

— с высокой степенью вероятности ( $> 90\%$ ) можно утверждать, что наблюдаемое увеличение концентраций антропогенных ПГ обусловило большую часть глобального потепления, начиная с середины XX века.

Вместе с тем продолжают высказываться сомнения по поводу антропогенной природы глобального потепления. Выдвигаются различные “альтернативные” гипотезы, как правило, не имеющие необходимого научного обоснования, но активно обсуждаемые в средствах массовой информации.

В числе прочих часто упоминается гипотеза о важной роли солнечной активности в наблюдаемом глобальном потеплении или похолодании. Так, например, утверждается, что вследствие изменения светимости Солнца в ближайшие годы следует ожидать понижения глобальной температуры. Однако непрерывные наблюдения за Солнцем в течение 28 лет показывают, что колебания потока солнечной радиации между максимумом и минимумом в 11-летнем цикле составляют 0,08% при отсутствии заметного долговременного тренда. Прямое радиационное воздействие на глобальную атмосферу в результате изменений солнечного потока с 1750 г. по настоящее время составляет 0,12 Вт/м<sup>2</sup>. Эта величина значительно меньше суммарного радиационного воздействия ПГ и аэрозоля, вызванного хозяйственной деятельностью человека. Поэтому, согласно ОД4, нет оснований рассматривать изменения солнечной активности и связанные с ней изменения потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы как причину наблюдаемого потепления климата.

Существуют и другие предположения, согласно которым нынешнее потепление климата явля-

ется проявлением долгопериодной естественной изменчивости. Как известно, в течение XX века в высоких и средних широтах Северного полушария наблюдались два теплых периода: первый начался с середины 1920-х и продолжался до 1940-х годов, а второй с 1980-х годов и продолжается по настоящее время. На этом основании высказывается мнение, что период наиболее значительного потепления в конце XX столетия приходится на восходящую ветвь 50–60-летнего естественного колебания или связан с квазипериодическим внешним воздействием. Однако для Арктики отсутствуют надежные инструментальные измерения параметров климата длительностью не менее столетия. Что же касается утверждений о влиянии других внешних естественных воздействий на климат (планет Солнечной системы и т. п.) — в настоящее время не существует убедительных данных наблюдений, которые бы показывали, что эти воздействия по своей величине сопоставимы с радиационным воздействием, вызванным изменениями концентрации ПГ в атмосфере.

Иногда высказываются гипотезы о том, что глобальное потепление будет компенсироваться похолоданием в связи с наступлением следующего ледникового периода в результате эволюции орбиты Земли. Изменения орбитальных параметров происходили с периодичностью от нескольких десятков до сотен тысяч лет и приводили к значительным изменениям глобального климата в прошлом. В ОД4 по этому поводу сообщается, что современное антропогенное потепление климата не может быть ослаблено естественным похолоданием климата Земли вследствие изменений орбитальных параметров Земли в ближайшие несколько тысяч лет.

Наряду с убедительными научными свидетельствами, показывающими, что хозяйственная деятельность вызывает изменения климата, и в ближайшие десятилетия эти изменения неотвратимы, существуют неопределенности при оценках возможных региональных изменений и особенно изменений повторяемости и интенсивности аномальных режимов в атмосфере и в океане. Для дальнейшего уточнения оценок требуются усилия мирового научного сообщества по совершенствованию современных МОЦАО и РКМ, а также методов анализа результатов наблюдений и моделирования климата.

### 7. Ожидаемые изменения климата на территории России в XXI веке

**Предсказуемость климата.** Климатическая система непрерывно меняется даже при отсутствии внешних воздействий. Эти изменения обусловле-

ны нелинейными взаимодействиями между атмосферой, поверхностью континентов, океанами, морскими и континентальными льдами, а также биосферой. Атмосфера является неустойчивым и быстро меняющимся компонентом климатической системы. Поэтому детальный прогноз ее состояния как правило возможен не более, чем на две недели. Поскольку другие компоненты климатической системы меняются сравнительно медленно, их предсказуемость может быть существенно большей. Имеется достаточно свидетельств того, что глобальные изменения климата, обусловленные влияниями внешних воздействий, предсказуемы. Например, годовой цикл, а также короткопериодные изменения климата, вызванные отдельными вулканическими извержениями, достаточно хорошо воспроизводятся современными моделями. Наступление теплого и ледникового периодов в прошлом, вызванное изменениями орбитальных параметров Земли, также успешно воспроизводится моделями.

Глобальное радиационное воздействие на климатическую систему, обусловленное антропогенным накоплением ПГ и аэрозоля в атмосфере, которое в настоящее время составляет  $1,6 \text{ Вт/м}^2$  по сравнению с доиндустриальным периодом, способствовало формированию неравновесного глобального радиационного режима. Океан вследствие своей большой термической инерции реагирует на увеличение радиационного воздействия с запаздыванием от нескольких десятков до сотен лет. Таким образом, эволюция климатической системы под влиянием долговременного внешнего радиационного воздействия предсказуема, но та ее часть, которая связана с внутренней изменчивостью климатической системы, может быть описана только в вероятностных терминах. Другими словами, оценка будущих изменений климата принципиально возможна лишь в виде некоторого вероятностного распределения, так что задача предсказания климата сводится к определению вероятностных функций распределения разных характеристик климатической системы в будущем, а не к прогнозу ее эволюции во времени, как это делается в прогнозах погоды.

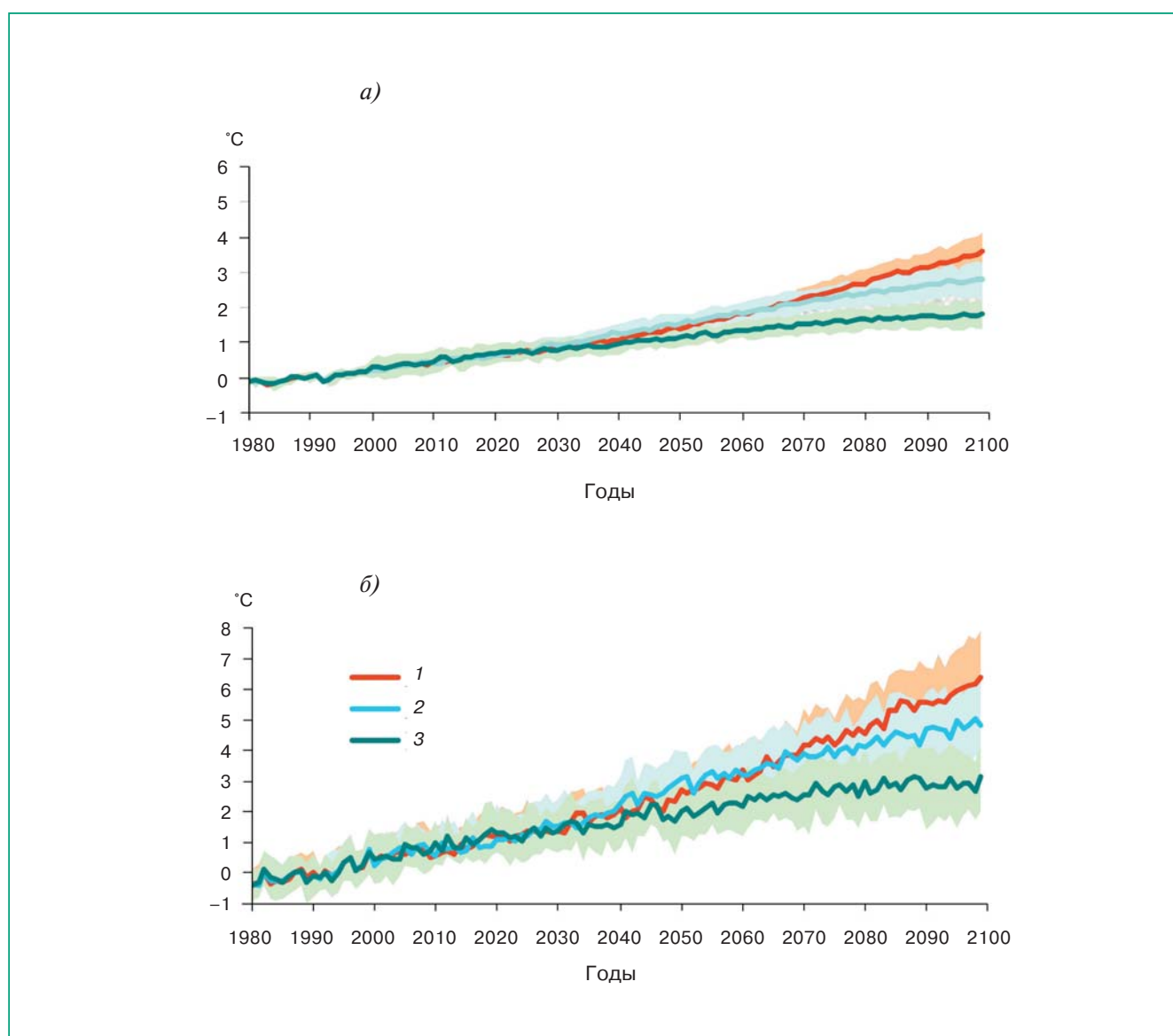
**Зависимость будущего изменения климата от выбора сценария антропогенного воздействия.** МГЭИК разработала долгосрочные сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозоля в атмосферу в XXI веке, которые опубликованы в Специальном докладе о сценариях выбросов — СДСВ. Эти сценарии основаны на обширном перечне демографических, экономических и технологических факторов, определяющих эмиссии. Эволюция концентраций разных парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.) и аэрозоля в атмосфере определялась с помощью фотохимических и углеродных

моделей. При подготовке ОД4 в качестве основных использовались три сценария для XXI века: В1, А1В и А2. Рассчитанные по ансамблю МОЦАО СМIP3 временной ход среднего потепления и межмодельный разброс для всего земного шара и для территории России заметно отличаются между собой к концу XXI века при трех сценариях увеличения содержания ПГ (рис. TP7.1). Так, разность глобального потепления при двух крайних сценариях (А2 и В1) может составить  $1,5^\circ\text{C}$ , а с учетом вероятности стандартного отклонения, равного 68% в обоих сценариях, неопределенность глобального потепления может составить  $2,4^\circ\text{C}$ . Разность потепления на территории России между этими же крайними сценариями к концу столетия составит  $2,9^\circ\text{C}$ , а с учетом такой же вероятности стандартного отклонения неопределенность может достичь  $4,2^\circ\text{C}$  (табл. TP7.1).

Вследствие большой термической инерции климатической системы скорость потепления определяется не только увеличением содержания ПГ в атмосфере, но и теплообменом атмосферы с глубоким океаном. Поэтому различие в потеплении климата между двумя крайними сценариями (“жестким” А2 и “мягким” В1) на территории России в середине века может составить лишь  $0,54^\circ\text{C}$ , что соответствует величине межмодельного разброса. Таким образом, потепление климата на территории России мало зависит от выбранного сценария до середины века. Более того, указанные различия в температуре и осадках оказались по величине такими же, как различия между отдельными моделями при одном и том же сценарии.

**Неопределенности оценок будущих изменений климата.** Достоверность прогнозов будущих изменений климата зависит от многих факторов, каждый из которых вносит некоторую долю неопределенности. Основными источниками неопределенностей являются:

- принципиальные сложности прогноза развития энергетики и технологий в мире на длительный период и связанные с ними неопределенности оценок будущих выбросов и концентраций ПГ и других радиационно активных примесей в атмосфере, а также невозможность достаточно надежно определить будущий вклад естественных внешних воздействий на климат (изменений потока солнечной радиации и вулканической активности и т. п.);
- недостаточное знание и соответственно неточности описаний в физико-математических моделях климатически значимых процессов и обратных связей, которые определяют чувствительность климата к антропогенному воздействию;
- недостаточное пространственное разрешение современных МОЦАО ограничивает возможность правильного описания климатически значимых процессов, а также создает большие проб-



**Рис. TP7.1.** Временной ход средней за год аномалии температуры приземного воздуха (°C) в XXI веке: а) глобальной, б) на территории России. Расчет выполнен для сценариев А1В (1), А2 (2) и В1 (3) по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг. Жирные линии соответствующего цвета характеризуют средние распределения по ансамблю из 16 МОЦАО СМIP3. Выделены области стандартных отклонений ( $\pm\sigma$ ), характеризующие межмодельный разброс.

**Таблица TP7.1.** Средние за год изменения температуры приземного воздуха (°C) и межмодельные стандартные отклонения (разброс), рассчитанные по ансамблю МОЦАО, на территории России в XXI веке для сценариев увеличения содержания ПГ и аэрозоля А1В, А2 и В1

Сценарий	2011–2030 гг.	2041–2060 гг.	2080–2099 гг.
А1В	1,2 ± 0,6	3,0 ± 0,7	4,7 ± 1,2
А2	1,1 ± 0,5	2,6 ± 0,7	5,6 ± 1,2
В1	1,2 ± 0,4	2,0 ± 0,6	2,9 ± 0,9

лемы для прямого использования результатов расчетов на региональном и локальном уровнях.

Повышение достоверности расчетов изменений климата в будущем обусловлено развитием МОЦАО путем совершенствования существующих и включения новых физических компонентов, совершенствования методов тестирования и оценки качества МОЦАО, а также в результате повышения их пространственного разрешения. Вероятностная интерпретация результатов расчетов, позволяющая оценивать будущие изменения экстремальных явлений, а также выделять антропогенный сигнал на фоне естественной изменчивости, связана с использованием больших ансамблей. Прогресс в использовании ансамблевого подхода в значительной степени определяется развитием вычислительной техники и наличием соответствующих ресурсов.

**Изменения средней температуры приземного воздуха.** Значительная часть территории России (особенно арктические и субарктические регионы) будет находиться в области заметно большего потепления по сравнению с глобальным (рис. TP7.2). Ансамбль МОЦАО показывает потепление климата на всей территории России в начале и середине XXI века, причем наибольшее потепление ожидается зимой. В этот период оно монотонно увеличивается к северу и достигает максимальных значений в Арктическом бассейне. Летом, наоборот, потепление здесь минимальное или отсутствует, поскольку температура приземного воздуха удерживается вблизи точки плавления морского льда.

Как отмечалось в разделе 6, средние тренды температуры приземного воздуха для всей России, полученные по данным наблюдений и модельных расчетов, хорошо согласуются между собой и составляют примерно  $0,4^{\circ}\text{C}/10$  лет. Такое соответствие трендов позволяет считать достаточно достоверными модельные оценки изменений этой характеристики на ближайшую перспективу.

В начале XXI века (2011–2030 гг.) среднее потепление незначительно превысит или окажется равным межмодельному разбросу по ансамблю МОЦАО зимой и летом в отдельных административных районах России, и только к середине века (2041–2060 гг.) это потепление заметно превысит разброс даже в холодное время года на всей территории России, когда велика межгодовая внутренняя изменчивость климата.

**Изменения экстремальности температурного режима.** К середине XXI века произойдет повышение наиболее низких в году суточных минимумов температуры приземного воздуха на всей территории России. При этом наибольшее увеличение ( $4\text{--}6^{\circ}\text{C}$ ) ожидается на юге и северо-западе ЕТР. В этих районах также ожидается сокращение пери-

ода с устойчивым снежным покровом на 15–25 суток. В центральных районах ЕТР, на Урале и в Восточной Сибири увеличение самой низкой суточной температуры составит  $2\text{--}4^{\circ}\text{C}$ .

Повышение наибольших в году суточных максимумов температуры будет меньшим, чем увеличение годовых минимумов к середине XXI века на всей территории России, а изменение годового максимума не превысит  $3^{\circ}\text{C}$ . На Северном Кавказе увеличение средней летней температуры окажется несколько меньшим по сравнению с увеличением годовых максимумов, что указывает на увеличение ее изменчивости и соответственно на большую экстремальность термического режима по сравнению с концом XX века.

Годовая амплитуда экстремальной температуры (разность между самой низкой и самой высокой суточной температурой в году) уменьшится на всей территории России и особенно на ЕТР к середине XXI века.

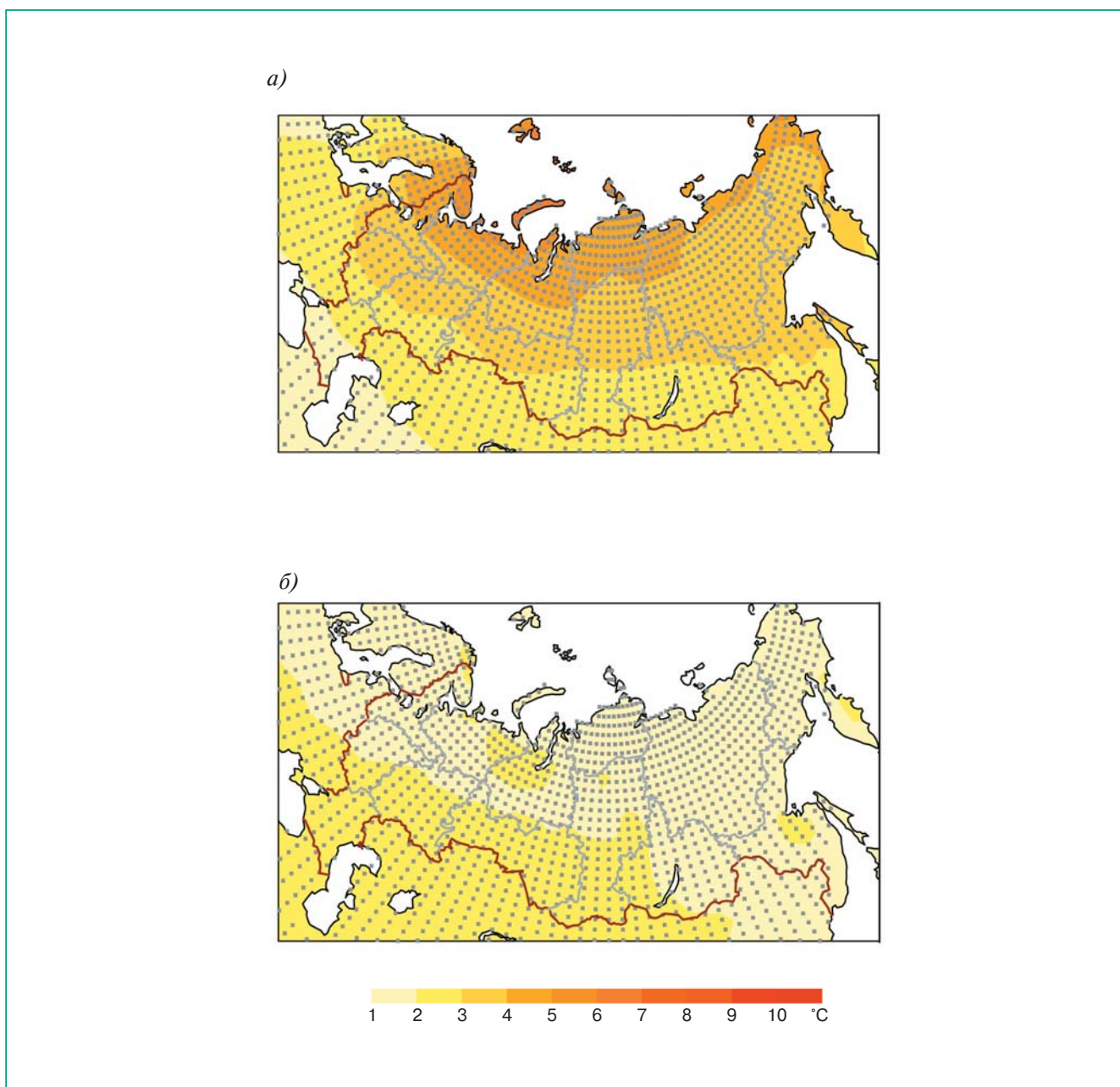
В Центральной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке число суток с морозом уменьшится на 10–15, а на ЕТР — на 15–30 (рис. TP7.3).

**Изменения среднего и экстремального количества атмосферных осадков.** Среднее за год количество осадков будет увеличиваться зимой на всей территории России, причем это увеличение будет наибольшим по сравнению с другими сезонами (рис. TP7.4). Если в начале XXI века увеличение количества осадков достаточно мало, то к середине века оно будет хорошо выраженным с максимальными значениями в восточных и северных регионах России. Однако изменение осадков летом зависит от региона. К середине века хорошо выделяются области их уменьшения на юге ЕТР и в южных районах Сибири. Увеличение летних осадков ожидается только на севере и востоке России.

В большинстве регионов России изменения осадков зимой превышают по величине межмодельный разброс (стандартные отклонения) уже в начале XXI века. Однако летом этот разброс остается по величине таким же, как и зимой, и, как правило, равным или превышающим средние изменения осадков в большинстве регионов даже в середине века.

Летом на фоне увеличения суммарных осадков во многих регионах будут увеличиваться конвективные осадки и уменьшаться осадки из облаков слоистых форм. Области наибольшей интенсивности конвекции станут хорошо выраженными лишь к середине века (рис. TP7.5). Большинство моделей (более 11 из 16) показывает тенденцию увеличения конвективных осадков, которое в среднем по ансамблю составляет 5–10% на значительной части территории России. В таких регионах будет увеличиваться вероятность возникновения таких опасных явлений погоды, как грозы,

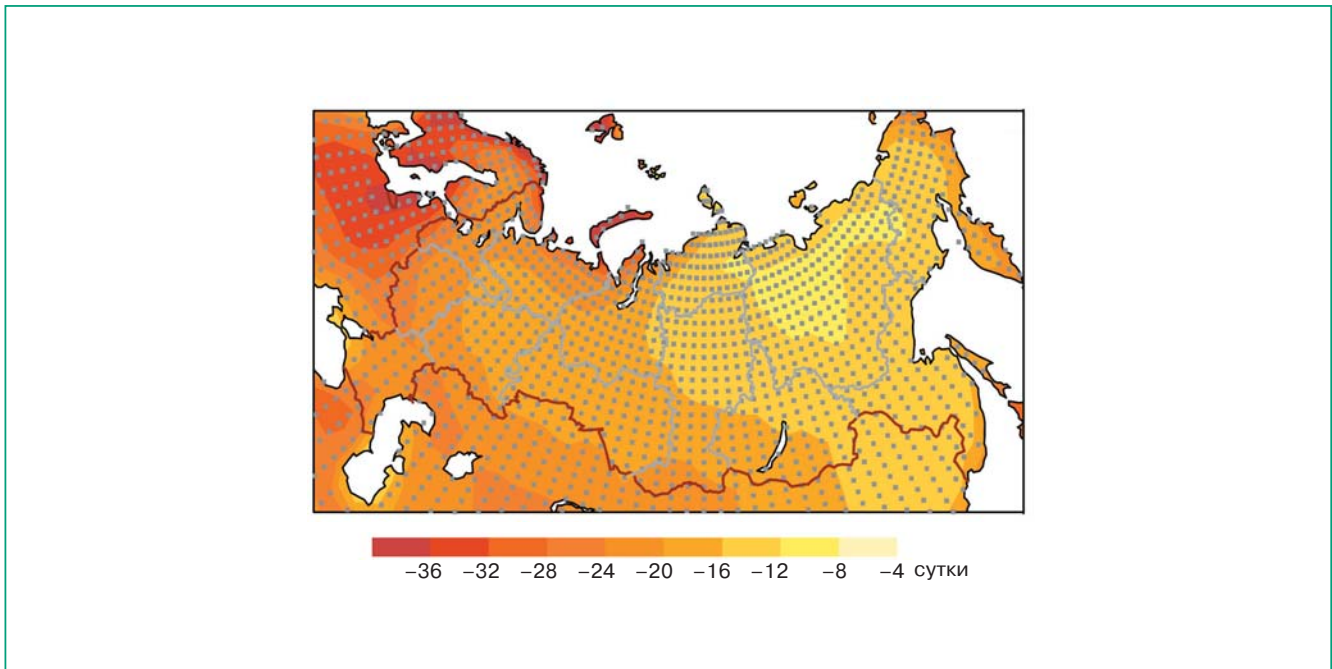




**Рис. TP7.2.** Изменения температуры приземного воздуха (°C) на территории России зимой (а) и летом (б) в середине XXI века (2041–2060 гг.), рассчитанные по ансамблю МОЦАО CMIP3 для сценария A2. Точками обозначены области, в которых средние изменения температуры воздуха по ансамблю превышают стандартные отклонения межмодельного разброса (т. е. сигнал больше шума).

сильный ветер, ливни и паводки. С другой стороны, модели дают большой межмодельный разброс количества конвективных осадков, при котором стандартное отклонение равно или превышает средние изменения в середине XXI века, указывая тем самым на большую долю неопределенности количественных оценок.

Анализ суточных сумм осадков показывает, что летом в середине века следует ожидать увеличения осадков большой интенсивности практически на всей территории России на 2–6% по отношению к их значениям в базовый период. Увеличение экстремальных осадков в южных регионах России будет происходить наряду с уменьшением



**Рис. TP7.3.** Уменьшение числа суток с морозом в году к середине XXI века по ансамблю из 9 МОЦАО для сценария A2. Точками обозначены узлы сетки, в которых средние изменения числа суток с морозом по ансамблю больше, чем средний межмодельный разброс.

числа случаев с осадками и развитием засушливых условий. Модельный разброс изменения осадков большой интенсивности оказывается большим по сравнению с разбросом осадков малой и умеренной интенсивности.

**Изменения годового стока.** При потеплении глобального климата ожидается дальнейшее увеличение водных ресурсов в тех регионах, где существует достаточное или избыточное увлажнение, а их уменьшение будет происходить в регионах, где водообеспеченность оказывается предельной или недостаточной в настоящее время. При этом на всех крупных реках бассейна Северного Ледовитого океана ожидается увеличение годового стока при разных сценариях увеличения концентрации ПГ.

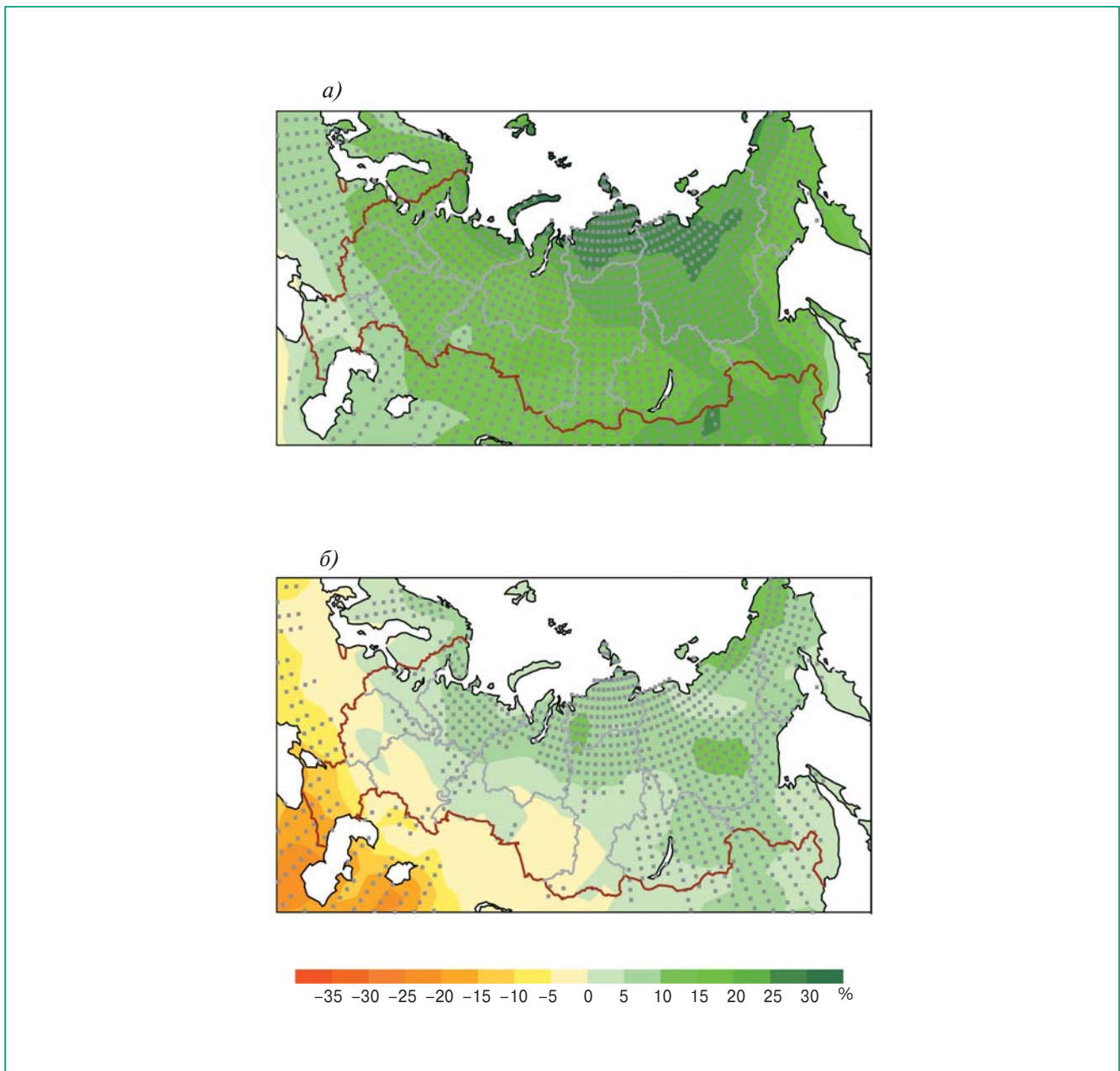
Оценки по ансамблю МОЦАО CMIP3 показывают, что на большей части территории России, особенно в Сибири, ожидается заметное увеличение стока уже в начале XXI века (рис. TP7.6). С другой стороны, в южных регионах ЕТР будет наблюдаться тенденция к уменьшению стока. Наибольшее увеличение годового стока ожидается на водосборах северных и сибирских рек. Лишь в южном бассейне, включающем водосборы нескольких крупных рек (Днепр, Дон), следует ожидать уменьшения годового стока в XXI веке вследствие влияния двух факторов, а именно уменьшения годо-

вых сумм осадков и увеличения испарения весной и летом.

Оценки изменения годового стока в крупных речных бассейнах и в регионах субконтинентального масштаба имеют достаточно большой межмодельный разброс, указывая на значительную степень неопределенности количественных оценок на ряде крупных водосборов (табл. TP7.2).

К середине века на некоторых водосборах Лены, Енисея, северных и чукотских рек изменения годового стока превысят значения межмодельного разброса. На водосборе Волги увеличение стока будет незначительным при большом межмодельном разбросе в течение всего XXI века. С учетом увеличения видимого испарения с акватории моря общий баланс воды таков, что значимые изменения уровня Каспийского моря, обусловленные увеличением содержания ПГ и аэрозоля в атмосфере, не ожидаются в XXI веке. Однако этот вывод не исключает возможности существенных колебаний уровня моря, которые могут быть вызваны естественными многолетними колебаниями общей циркуляции атмосферы и влагооборота в Северном полушарии.

**Изменение влагосодержания верхнего слоя почвы.** Сведения о возможных изменениях увлажнения деятельного слоя почвы чрезвычайно важны для оценки уязвимости и потенциала сельскохозяй-



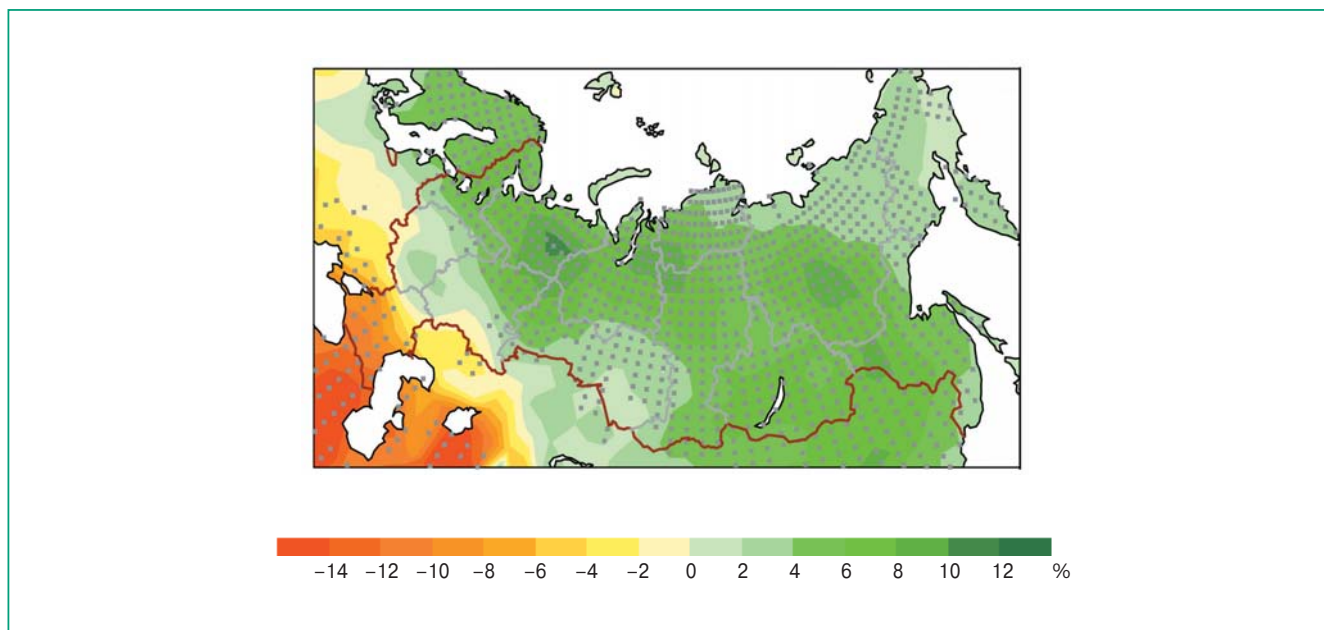
**Рис. TP7.4.** Изменения суммарных (жидких и твердых) осадков (%) зимой (а) и летом (б) за период 2041–2060 гг. по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг., рассчитанные по ансамблю из 16 МОЦАО для сценария А2. Точками обозначены области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.

ственного производства в отдельных регионах. При потеплении климата ожидается формирование засушливых условий уже весной и их усиление летом на значительной части территории России. Если в северных, относительно увлажненных регионах некоторое уменьшение влажности почвы, по-видимому, не будет иметь серьезных негативных последствий, то в южных регионах, которые периодически подвержены влиянию засух в настоящее время,

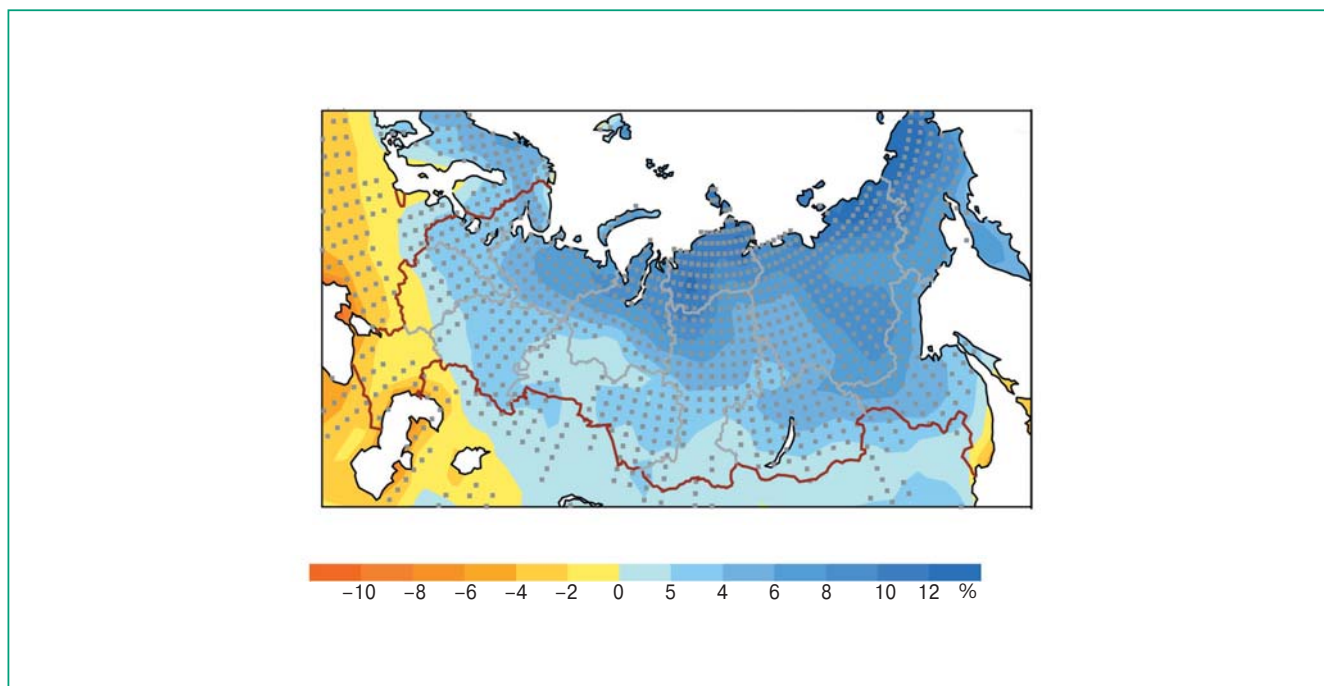
дальнейшее уменьшение влагосодержания почвы весной и летом будет способствовать росту вероятности возникновения засушливых условий.

Три региона России заслуживают особого внимания, поскольку в них наиболее выражены признаки развития засушливых условий весной и летом: Южный, Центральный и Приволжский федеральные округа. Вместе с тем межмодельный разброс изменений влажности почвы в ансамбле





**Рис. TP7.5.** Изменения конвективных осадков (%) по отношению к суммарным осадкам в базовый период на территории России летом в 2041–2060 гг., рассчитанные по ансамблю МОЦАО для сценария А2. Точками показаны области, в которых более двух третей моделей указывают на изменения одного знака.



**Рис. TP7.6.** Изменения среднего за год стока (%) в 2041–2060 гг. по отношению к значениям в базовый период на территории России и сопредельных регионов, рассчитанные по ансамблю МОЦАО для сценария А2. За базовый период принят 1980–1999 гг. Точками показаны области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.



## ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕЗЮМЕ

**Таблица TP7.2.** Средние за год изменения стока (в % по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг.) в начале (2011–2030 гг.), середине (2041–2060 гг.) и в конце (2080–2099 гг.) XXI века, рассчитанные по ансамблю из 13 МОЦАО для сценария А2

Речной бассейн, регион	2011–2030 гг.	2041–2060 гг.	2080–2099 гг.
Волга	4 ± 7	6 ± 9	11 ± 16
Обь	5 ± 5	7 ± 7	<b>13 ± 10</b>
Енисей	<b>5 ± 4</b>	<b>10 ± 6</b>	<b>21 ± 8</b>
Лена	<b>8 ± 5</b>	<b>17 ± 7</b>	<b>34 ± 15</b>
Амур	3 ± 8	<b>11 ± 10</b>	<b>23 ± 17</b>
Водосборы северных рек	<b>6 ± 5</b>	<b>11 ± 7</b>	<b>26 ± 12</b>
Водосборы южных рек	-3 ± 10	-5 ± 8	<b>-16 ± 15</b>
Водосборы Чукотки	<b>8 ± 4</b>	<b>15 ± 8</b>	<b>37 ± 15</b>
Балтийский водосбор	0 ± 5	4 ± 5	<b>10 ± 7</b>
ЕТР	4 ± 5	7 ± 6	<b>14 ± 12</b>
Западная Сибирь	<b>5 ± 3</b>	<b>11 ± 4</b>	<b>22 ± 5</b>
Восточная Сибирь	<b>6 ± 2</b>	<b>14 ± 5</b>	<b>32 ± 10</b>
Россия в целом	<b>5 ± 2</b>	<b>11 ± 3</b>	<b>23 ± 4</b>

*Примечание.* Выделены значения, в которых среднее изменение больше стандартного отклонения.

достаточно велик по сравнению со средними изменениями по ансамблю МОЦАО.

**Изменения снежного покрова суши.** Расчеты будущих изменений снежного покрова на континенте говорят об ускоряющемся сокращении его площади и уменьшении массы на протяжении XXI века. Если среднее количество осадков, которое (согласно расчетам по МОЦАО) выпадает за год на территории России, принять за 100%, то 41% из них выпадает в твердой фазе (снег) в холодное время года. Из-за больших размеров территории России указанное деление на жидкие и твердые осадки может сильно различаться в отдельных регионах (табл. TP7.3).

При потеплении климата увеличение сумм осадков на ЕТР будет происходить преимущественно в результате увеличения жидких осадков в зимний период, в то время как в Западной и Восточной Сибири основную их долю будет составлять снег. Таким образом, на ЕТР следует ожидать сокращение накопленной массы снега зимой и увеличение зимнего стока к середине XXI века, а в Западной и Восточной Сибири, наоборот, будет происходить накопление массы снега зимой и его интенсивное таяние весной (табл. TP7.4).

Однако следует отметить, что межмодельный разброс внутригодового снеготаяния превышает

**Таблица TP7.3.** Доля твердых осадков (%) по отношению к суммарным зимой в базовый период (1980–1999 гг.) и изменения суммарных и твердых осадков (%), рассчитанные для зимы 2011–2030 и 2041–2060 гг. по отношению к базовому периоду (1980–1999 гг.)

Период, годы	ЕТР		Западная Сибирь		Восточная Сибирь	
	суммарные осадки	снег	суммарные осадки	снег	суммарные осадки	снег
1980–1999	100	79	100	97	100	98
2011–2030	4 ± 3	1 ± 3	7 ± 4	7 ± 6	10 ± 3	9 ± 4
2041–2060	11 ± 5	2 ± 5	16 ± 8	15 ± 9	19 ± 7	17 ± 8

средние по ансамблю изменения на всех без исключения водосборах. Хотя полученные оценки физически хорошо согласуются с изменениями других характеристик климата, полученные результаты следует рассматривать как качественное указание на более вероятную тенденцию изменений данной характеристики.

**Изменения многолетней мерзлоты и сезонного протаивания почвогрунтов.** Наиболее важными характеристиками многолетней мерзлоты являются положение ее границы в отдельных зонах, глубины сезонного протаивания и промерзания, а также температура многолетнемерзлых слоев на разных глубинах.

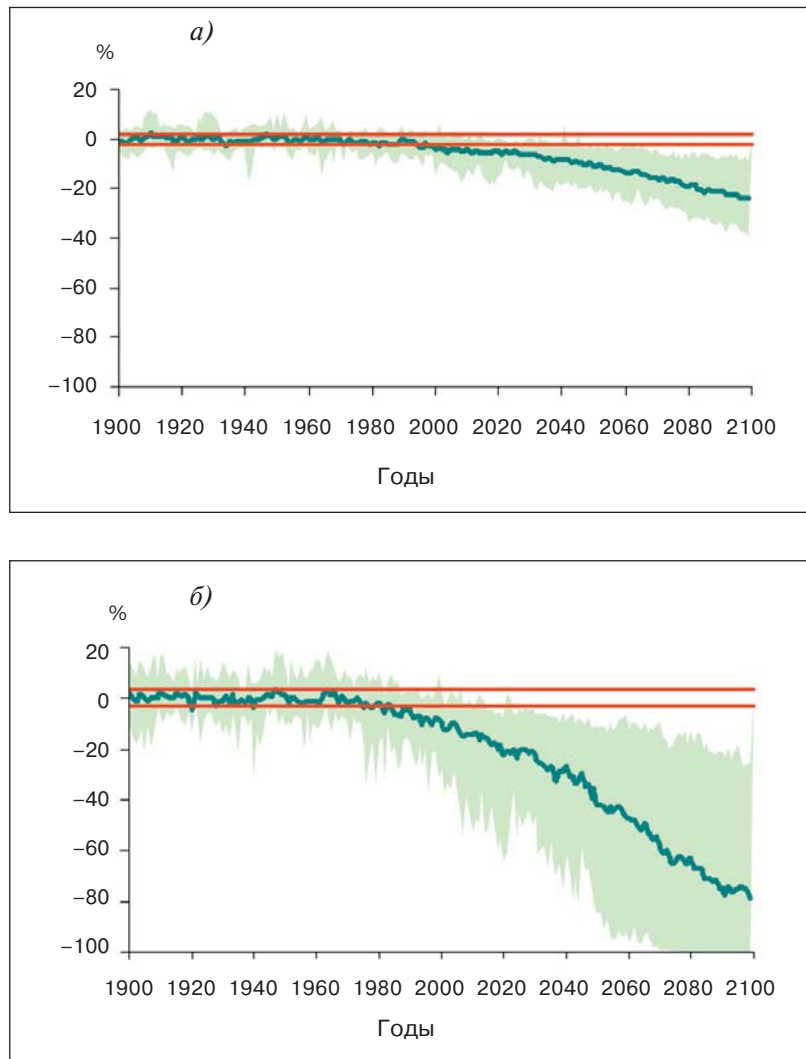
Деградация многолетней мерзлоты под влиянием потепления климата будет проявляться прежде всего в увеличении мощности сезонно-талого слоя и повышении температуры грунтов. В некоторых районах может произойти отрыв замерзающей части сезонно-талого слоя от глубинных толщ многолетней мерзлоты. Тундровые ландшафты отличаются большой уязвимостью по отношению к внешним воздействиям, и протаивание грунтов будет сопровождаться их просадками, обводнением территории или высыханием болот и уменьшением прочностных характеристик грунтов. Более значительному протаиванию подвержены песчаные грунты. На севере Западной Сибири характерно преобладание песчаных грунтов в руслах рек. Такие же грунты преобладают на полуострове Ямал в местах разработки газовых месторождений.

Большая часть сельскохозяйственных районов интенсивного земледелия России находится в зоне сезонного промерзания, и изменения глубины промерзания, несомненно, будут оказывать влияние на сельскохозяйственное производство. Изменения глубин сезонного промерзания под влиянием потепления климата до сих пор практически не исследовались. Однако эти изменения можно оценить с помощью тех же моделей, описывающих теплопередачу в грунтах, которые применяются для оценки глубин протаивания вечномерзлых грунтов. В течение XXI века ожидается уменьшение глубины промерзания на ЕТР и в южных регионах Сибири и расширение области, в которой промерзание отсутствует, на юго-западе России. Изменение глубины сезонного промерзания так же, как глубины сезонного протаивания, существенно зависит от типа грунтов, толщины снежного покрова и температуры на поверхности в холодное время года.

**Изменения морского льда в Арктике.** Расчеты будущих изменений ледяного покрова Северного Ледовитого океана говорят об ускоряющемся сокращении его площади и массы. Наибольшие изменения будут происходить в конце XXI века. Сокращение площади ледяного покрова особенно хорошо обнаруживается при анализе сезонных минимумов и максимумов. Расчеты по ансамблю МОЦАО СМIP3 показывают, что максимальная площадь морского льда, которая наблюдается в марте, будет сокращаться в течение XXI века на 2% за десятилетие, а минимальная площадь льда,

**Таблица TP7.4.** Средние за год значения массы тающего снега и межмодельные стандартные отклонения (%) в начале, середине и конце XXI века по отношению к значениям за базовый период (1980–1999 гг.), рассчитанные по ансамблю из 10 МОЦАО

Речной бассейн, регион	2011–2030 гг.	2041–2060 гг.	2080–2099 гг.
Балтийский водосбор	93 ± 8	85 ± 11	67 ± 17
Северные реки	99 ± 4	98 ± 6	93 ± 13
Южные реки	91 ± 8	77 ± 11	52 ± 14
Волга	98 ± 5	94 ± 8	81 ± 15
Обь	99 ± 2	100 ± 5	93 ± 10
Енисей	102 ± 3	103 ± 3	105 ± 5
Лена	102 ± 2	106 ± 4	114 ± 5
Водосборы Чукотки	104 ± 4	106 ± 4	114 ± 10
Амур	99 ± 5	99 ± 4	93 ± 8
ЕТР	97 ± 4	93 ± 7	81 ± 13
Западная Сибирь	101 ± 2	102 ± 3	102 ± 6
Восточная Сибирь	103 ± 2	104 ± 3	109 ± 5
Россия в целом	101 ± 2	101 ± 3	99 ± 6



**Рис. TP7.7.** Изменения площади морского льда (%) в Северном полушарии в марте (а) и сентябре (б), рассчитанные по ансамблю из 12 МОЦАО для сценария А2. Кривыми представлены средние по ансамблю изменения площади морского льда по отношению к периоду 1910–1959 гг., интервал изменчивости для которого обозначен двумя красными линиями, соответствующими 5%-ному уровню значимости. Выделенная цветом область показывает разброс модельных оценок.

которая достигается в сентябре, будет сокращаться соответственно на 7% по отношению к площади льда в базовый период (рис. TP7.7). Более того, масса льда будет сокращаться на 5% в марте и на 7% в сентябре за десятилетие по отношению к массе в соответствующие месяцы базового периода (1980–1999 гг.). Причем масса льда сокращается быстрее, чем его площадь в сентябре, что говорит

о более быстром уменьшении площади многолетнего морского льда в Арктике по сравнению с площадью сезонного льда. В расчетах нескольких МОЦАО ледяной покров становится полностью сезонным в конце XXI века.

**Изменения уровня Мирового океана.** Наиболее достоверные оценки повышения среднего уровня Мирового океана, приведенные в ОД4,

показывают, что в конце XXI века это повышение может составить по сравнению с периодом 1980–1999 гг. для трех сценариев увеличения содержания ПГ в атмосфере следующие значения (указан диапазон): В1 — 0,19–0,37 м; А1В — 0,23–0,47 м; А2 — 0,25–0,50 м. Термическое расширение воды в результате повышения ее температуры вносит основной (60–70%) вклад в повышение уровня океана. Расчеты по климатическим моделям показывают, что термическое расширение будет продолжаться в течение всего XXI века. Более того, поскольку температура глубокого океана изменяется очень медленно, термическое расширение будет продолжаться в течение нескольких столетий даже, если концентрация парниковых газов в атмосфере стабилизируется. Пока еще недостаточно изучены динамические процессы в ледниковых щитах Гренландии и Антарктики, которые могут внести вклад в повышение уровня океана в XXI веке.

## ПОСЛЕДСТВИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ И ОЖИДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

### 8. Природные экосистемы суши

#### НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Состояние природных экосистем суши складывается под воздействием всей совокупности факторов среды. Среди них климат играет очень заметную роль. Некоторые параметры экосистем суши являются особенно зависимыми от климата, и последствия его изменения обнаруживаются, несмотря на “маскирующее” воздействие иных, не климатических факторов, в частности местной хозяйственной деятельности. Эти изменения лучше всего выявляются в широких масштабах на сети пунктов наблюдений, где влияние человека минимально (например, на заповедных территориях).

Изменения в состоянии экосистем суши, связанные с изменением климата, обнаружены в сроках фенологических событий у растений и животных, приросте деревьев, границах растительных зон, степени опустынивания, биологическом разнообразии, первичной продуктивности экосистем, содержании углерода в почвах.

*Сроки фенологических событий.* Данные наблюдений указывают на то, что в конце XX века сроки фенологических событий у растений — распускание листьев, цветение, пожелтение листьев и т. д. — изменились (рис. TP8.1). На Европейской территории России это — сдвиг весенних сроков в сторону более ранних дат, что является ожидаемым откликом на потепление климата. В то же

время повсеместного на территории России ожидаемого сдвига сроков фенологических событий у наземных растений в сторону более ранних дат не произошло. Причина — существенная нелинейность отклика растений на изменение климата. Они реагируют не на изменение среднегодовых значений гидрометеорологических величин, а на изменение характеристик годового хода их суточных значений.

Наблюдаемые изменения весенних и осенних сроков не всегда приводят к увеличению продолжительности вегетационного периода. Смещение сроков у животных менее определено.

Изменения сроков фенологических событий у отдельных видов приводят к временному рассогласованию жизненных циклов в разных компонентах природных экосистем, что потенциально может сказаться на их структуре и функции.

*Прирост деревьев.* Исследование древесно-кольцевых хронологий лиственницы из разных регионов Сибири (Таймыр, район Индигирки, Тува) показало, что радиальный прирост деревьев реагирует на потепление климата не в соответствии с ожиданием. А именно, несмотря на потепление во второй половине XX века, индекс радиального прироста (характеризует прирост дерева (мм/год), сглаживает его короткопериодные колебания и исключает влияние фактора возраста дерева) указывает на уменьшение радиального прироста во второй половине XX века (рис. TP8.2).

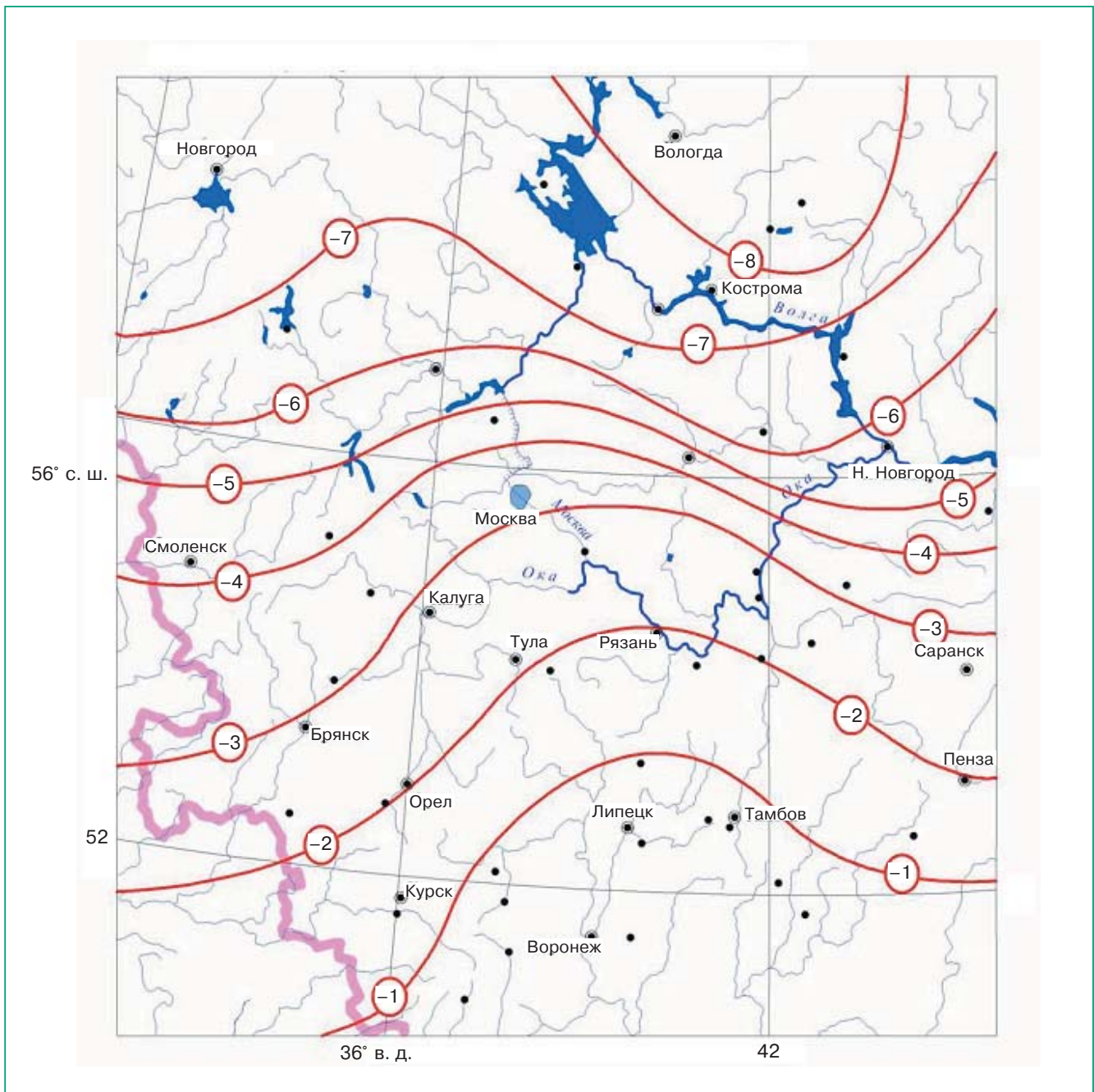
Поскольку теоретически потепление в условиях достаточного увлажнения должно приводить к увеличению прироста деревьев, наблюдаемое его уменьшение может объясняться лишь особенностями изменения климата в те сезоны, климат которых в основном определяет прирост.

*Границы леса.* В самом северном в мире древостое — урочище Ары-Мас — в XX веке произошло увеличение сомкнутости древостоев и продвижение границы леса (лиственница) в зону тундры (рис. TP8.3). Эти лесотундровые массивы не подвержены локальному антропогенному воздействию. Причина наблюдаемых изменений растительности — изменение климата Северной Евразии.

В некоторых горных районах страны наблюдается заметное изменение высотных границ растительных зон. Так, в горных экосистемах Национального парка “Таганай” (Южный Урал) произошло продвижение верхней границы леса вверх (рис. TP8.4).

*Климатическое опустынивание.* Опустынивание есть результат взаимодействия множества факторов. Среди них — изменение климата, которое особенно проявляется в условиях экстремальной хозяйственной нагрузки.



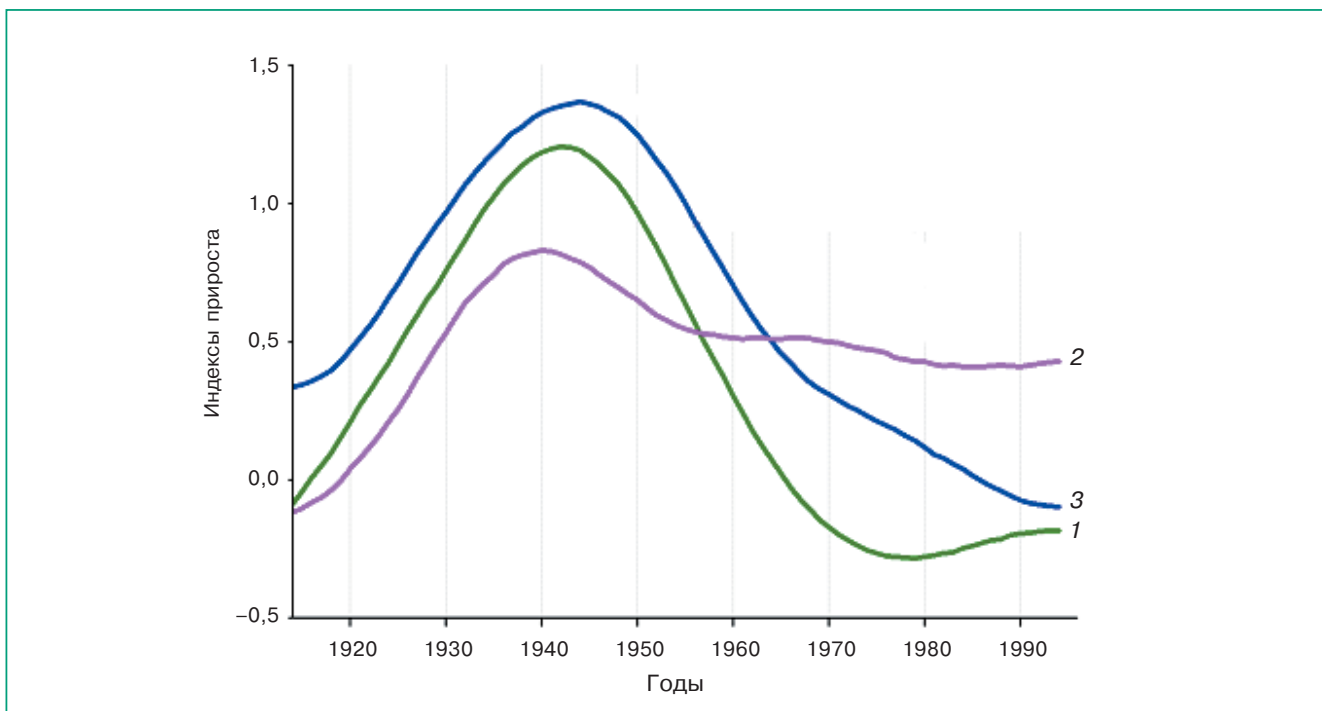


**Рис. ТР8.1.** Изолинии сдвига сроков (сутки) развертывания первых листьев у березы бородавчатой на ЕТР за период 1970–2000 гг.; точками показаны пункты фенологических наблюдений.

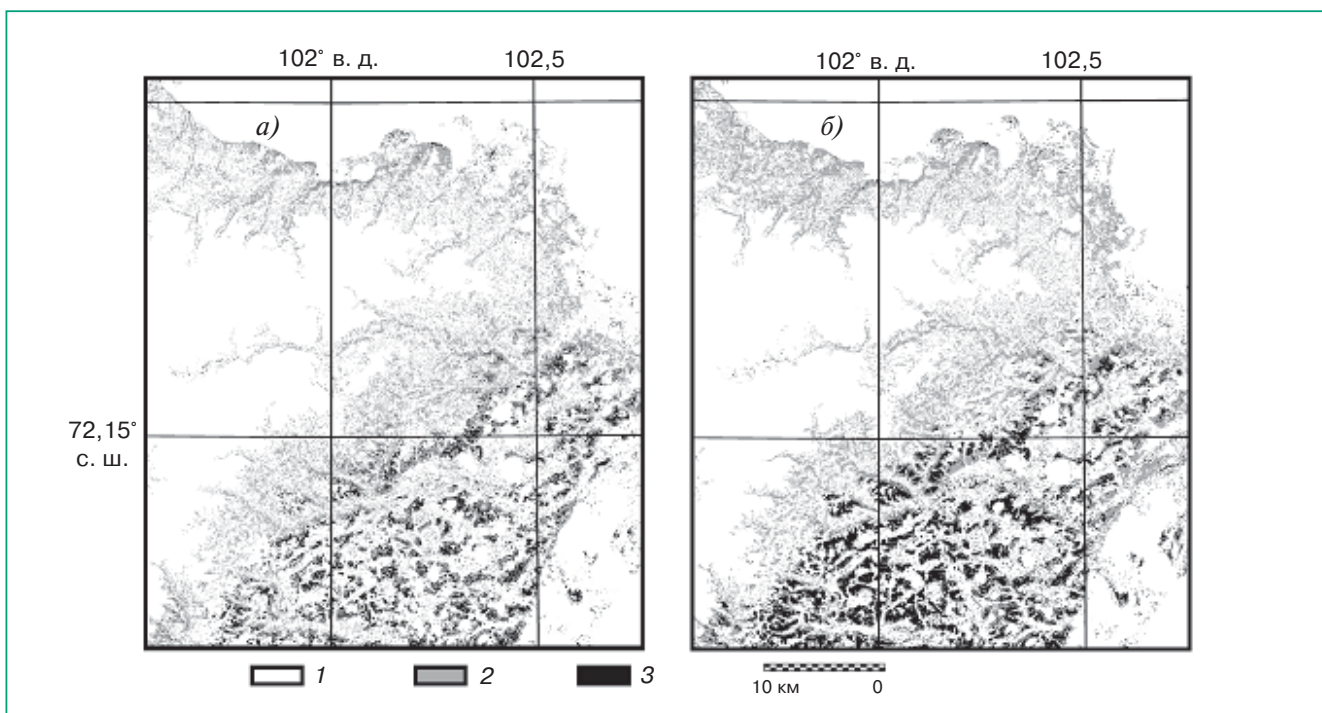
Граница ближайшей к России области климатического опустынивания — Северо-Туранской — находится на расстоянии нескольких сотен километров от территории России. Эта граница оставалась довольно стабильной в последние два десятилетия XX века. В Северо-Туранской области в 1992–2001 гг. по сравнению 1982–1991 гг. прослеживается тенденция ослабления климатического опустынивания на Прикаспийской низменности и

некоторого его усиления на территории между Аральским морем и оз. Балхаш.

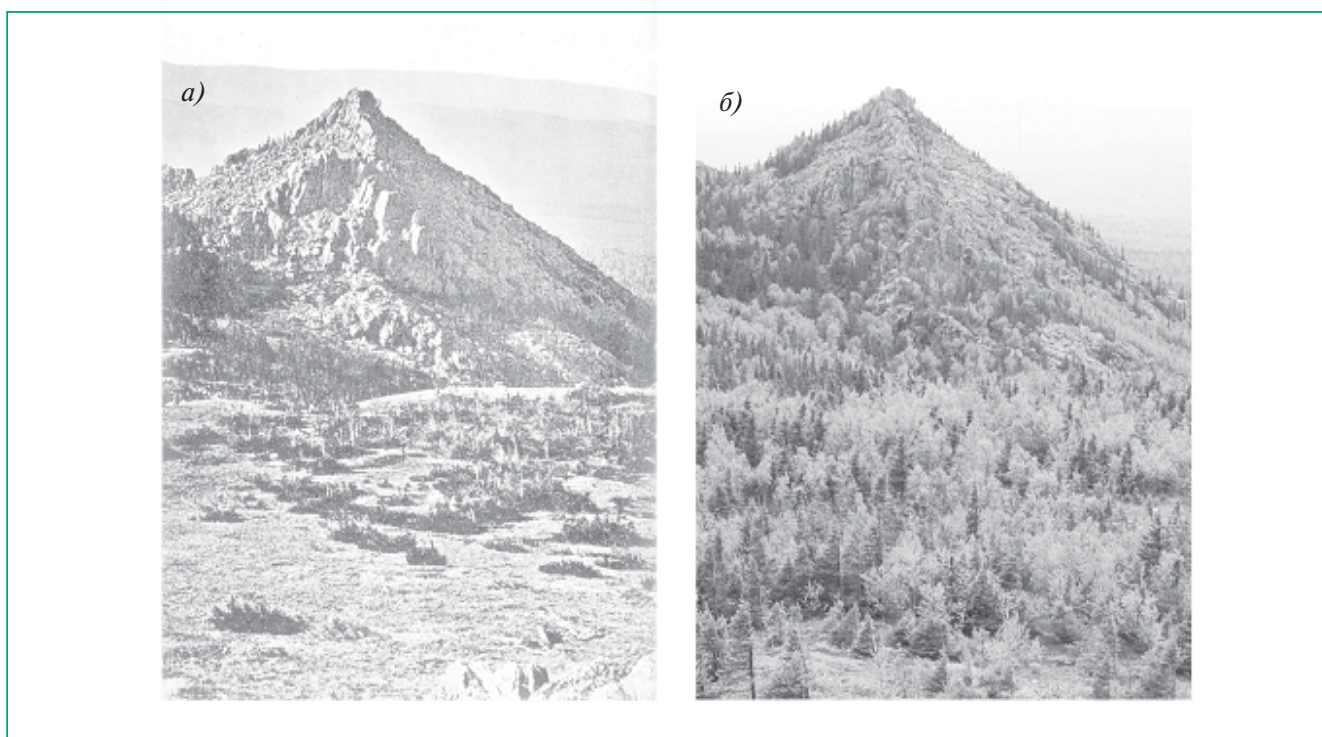
На территории России засушливые земли, находившиеся в условиях опустынивания в XX веке, оказались в этом состоянии по антропогенным причинам. Это — чрезмерный выпас скота на юго-востоке ЕТР и потеря плодородия почвы в результате распашки целинных и залежных земель на юго-западе Сибири.



**Рис. TP8.2.** Индексы радиального прироста лиственницы, произрастающей на полярной (Таймыр (1) и Индигирка (2)) и верхней (в горах Тувы (3)) границах ареала на севере и юге Сибири соответственно.



**Рис. TP8.3.** Снимки урочища Ары-Мас. а — 1973 г.; б — 2000 г.; 1 — фон (тундра и пойма реки), 2 — редины и редколесья (сомкнутость крон < 0,3), 3 — древостои (сомкнутость крон ≥ 0,3).



**Рис. ТР8.4.** Изменение положения верхней границы леса: Южный Урал, район вершины Трех Сестер, 1027,5 м над уровнем моря, национальный парк “Таганай”. а) 1903 г., б) 2000 г.

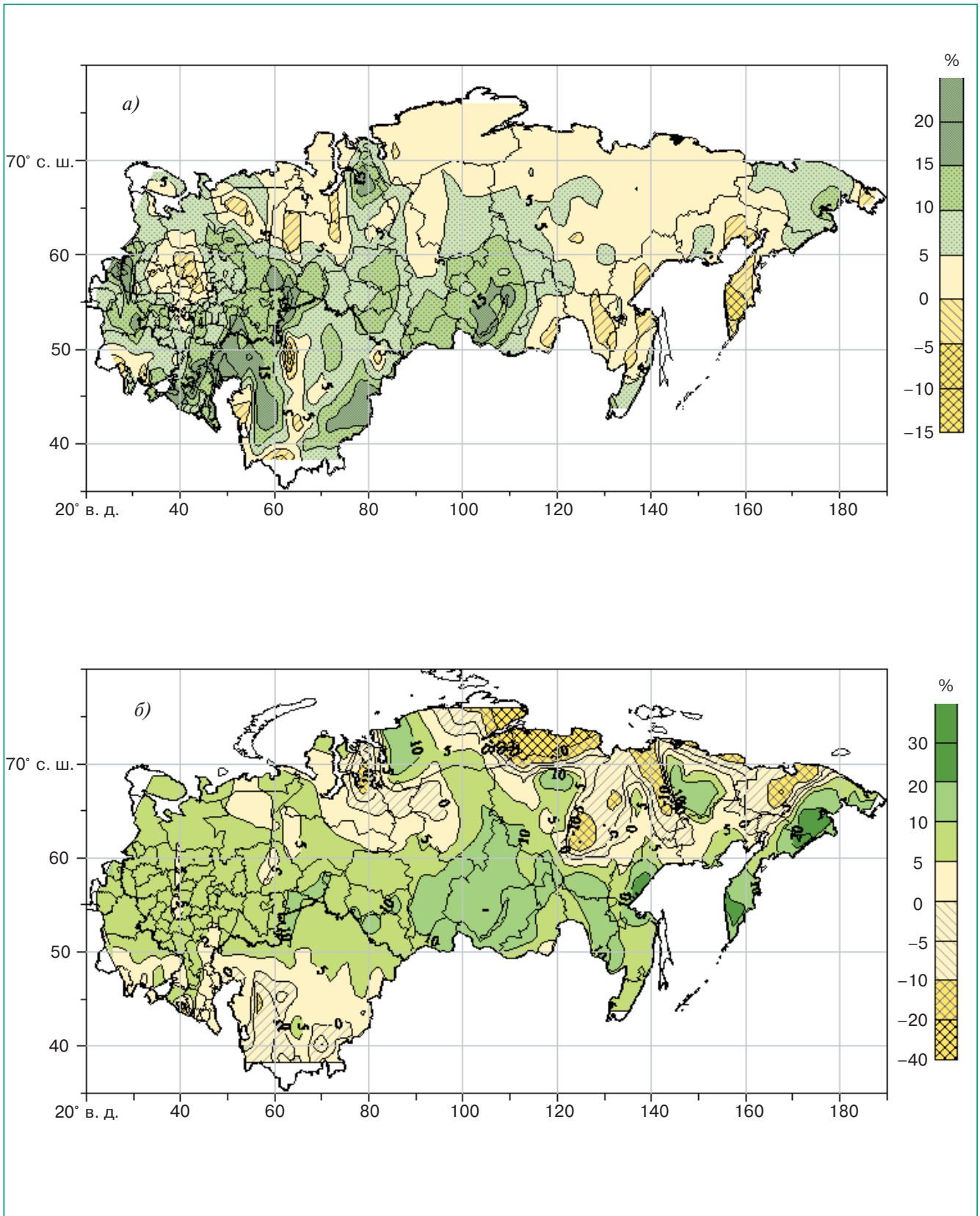
С 1980-х годов на ЕТР наблюдается восстановление растительного покрова на землях, ранее находившихся в состоянии опустынивания. Повышение увлажнения территории весной из-за изменения климата стало одной из предпосылок широкомасштабного восстановления злаковых сообществ (остепенения). При этом увеличиваются биомасса сообществ, их проективное покрытие и число видов растений. Другой причиной восстановления растительного покрова стало резкое ослабление антропогенной нагрузки на пастбища в начале 1990-х годов. Например, в Калмыкии наибольшее распространение сильно деградированных пастбищ имело место в период 1982–1991 гг. на Центрально-Черноземельской песчаной равнине, на стыке Южной Сарпинской низменности и Астраханской низменной равнины, а также в Приволжской песчано-супесчаной полосе с массивами переветренных песков. Эти пастбища трансформировались в умеренно и слабо деградированные в 1992–2001 гг. Площадь сильно деградированных пастбищ в Калмыкии была минимальной в период 1991–1998 гг. Однако она стала резко увеличиваться после 1999 г. вследствие увеличения нагрузки на пастбища и достигла почти 10 тыс. км<sup>2</sup> в 2001 г.

На юго-западе Сибири, в западной части Алтайского края в конце XX века признаки ан-

тропогенного опустынивания — снижение почвенного плодородия и изреживание травяного покрова — наблюдаются с 1970–1990-х годов. Усиление аридности климата и частоты атмосферных засух (особенно весенних) в конце XX века усилило эти тенденции. Таким образом, засушливые земли России подвержены преимущественно антропогенному опустыниванию. Они не входят в область климатического опустынивания, а их аридизация лишь эпизодически поддерживается климатическими факторами в годы опасных засух. Процесс восстановления растительного покрова на деградированных засушливых землях ЕТР вследствие благоприятных изменений климата может не дать результатов из-за увеличения хозяйственной нагрузки, которое обозначилось в начале XXI века.

*Особо охраняемые природные территории.* Изменение климата сказывается на состоянии особо охраняемых территорий, к которым относятся прежде всего заповедники. Последствиями изменения климата являются сдвиги сроков фенологических событий у растений и животных (о чем уже сказано выше), изменения видового состава и численности популяций. Эти изменения могут быть как прямым следствием изменения климата, так и косвенным, например, возникать из-за уси-





**Рис. TP8.5.** Потенциальные изменения (%) годичной первичной продукции экосистем (а) и содержания органического углерода в почве (б), обусловленные изменением климата, за период 1975–2004 гг.



ления давления биотических факторов, которое, в свою очередь, есть следствие изменения климата.

Так, в Центрально-Черноземном заповеднике сочетание поздних весенних заморозков и летне-осенних засух негативным образом отразилось на состоянии дубовых древостоев и способствовало появлению локальных очагов их усыхания в середине и конце 1990-х годов. С 1975 г. в Сихотэ-Алинском заповеднике отмечается гибель дубовых лесов (дуб монгольский), вызванная грибными заболеваниями, что связывается с продвижением на север ареала патогенных грибов вследствие потепления.

Хотя экосистемы заповедников и защищены от хозяйственных нагрузок, существенное влияние на них оказывают антропогенные лесные пожары. Они возникают как в результате неосторожного обращения с огнем непосредственно на территории заповедников (в ряде случаев там есть населенные пункты), так и вследствие лесных пожаров на окружающих незаповедных территориях. К концу XX века изменение климата привело к увеличению уровня пожароопасности во многих заповедниках, например, в Баргузинском.

*Первичная продуктивность экосистем и содержание углерода в почвах.* Расчетные оценки значений этих показателей, соответствующие наблюдаемым изменениям климата в 1975–2004 гг., указывают на увеличение их **потенциальных значений** на большей части территории бывшего СССР (рис. TP8.5). Уменьшение содержания гумуса характерно, в основном, для тундровой зоны Сибири и пустынь Приаралья. Остальные очаги возможного уменьшения содержания гумуса — на юге Украины, Северном Кавказе и в Прикаспийской низменности — имеют небольшие площади. Практически на всей ЕТР сложились условия, способствующие накоплению органического углерода в почве, но самые благоприятные для этого климатические условия сформировались на Азиатской территории России, южнее 60° с. ш. от Урала до побережья океана на Дальнем Востоке.

### ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

К концу XXI века, согласно некоторым сценариям антропогенного воздействия на глобальный климат, ожидается существенное увеличение концентрации диоксида углерода в атмосфере и повышение средней глобальной температуры воздуха по отношению к уровню конца XX века. Это скажется на состоянии экосистем на территории России.

Потепление и увеличение концентрации CO<sub>2</sub> создадут условия для более эффективного использования солнечной энергии и воды высшими растениями. В то же время в некоторых регионах растения окажутся в условиях возросшего риска за-

сухи и лесных пожаров (особенно на юге страны), изменения почвенно-гидрологического режима и термического режима многолетней мерзлоты.

Вследствие потепления могут заметно измениться сроки фенологических событий у растений. Так, даже при небольшом повсеместном потеплении на 1°C в ряде регионов расчетный срок зеленения березы сдвинется в сторону более ранних дат на несколько суток, а ведь существующие перспективные оценки глобального потепления к концу XXI века — увеличение на 1,8–4,0°C и более по отношению к уровню конца XX века.

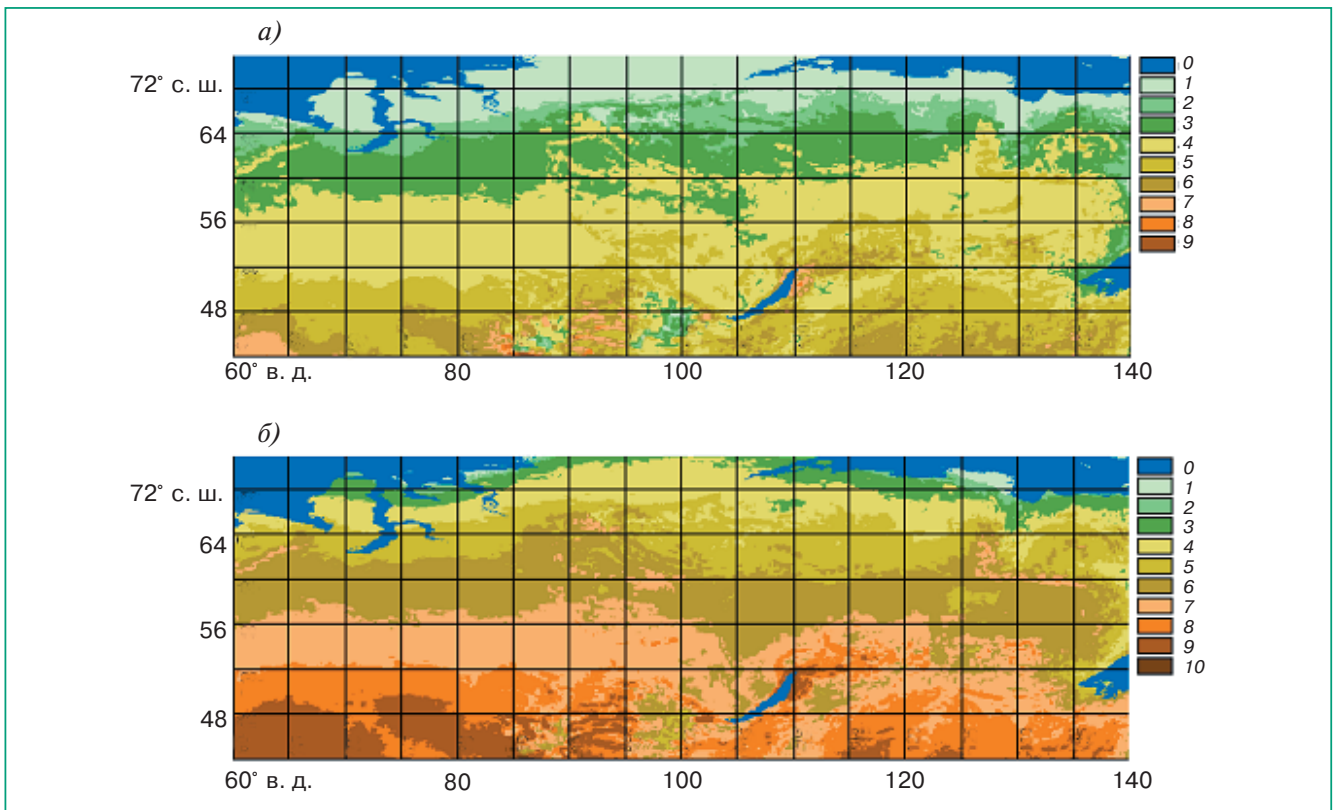
Ожидаемое в XXI веке потепление приведет к изменению видового состава и численности популяций в сообществах растений, а также к сдвигу границ растительных зон. Поскольку последний процесс существенно (на десятилетия — столетие) отстает от изменений климата, то фактически растительные зоны не будут занимать те территории, которые соответствуют текущему климату в том случае, если бы он сохранялся продолжительное время — столетие и более, за которое распределение растительности может прийти в равновесие с климатом, т. е. стать равновесным.

*Состояние растительности.* Потенциальное, **равновесное** распределение растительности в Сибири, соответствующее климату 2090 г., существенно отличается от современного. В условиях более сухого, чем современный, климата площадь лесов может сократиться в два раза. Граница между лесами и степью в Центральной Сибири сдвинется на несколько сотен километров к северу по отношению к сегодняшней. Площадь степной зоны в Южной Сибири увеличится на 30% в результате уменьшения площади лесов, при этом площадь опустыненных степей увеличится в два раза.

На рис. TP8.6 приведены современные данные о флористическом разнообразии и расчетные значения, потенциально (когда растительность достигает равновесного состояния при заданном климате) соответствующие возможному климату 2090 г. Различия, наблюдаемые на рис. TP8.6a и TP8.6б, существенны.

Однако **фактические** изменения растительности, ожидаемые в XXI веке на территории России, будут менее значительны. Палеоаналоги указывают на то, что скорость расселения большинства древесных пород будет составлять лишь около 200–300 м в год, у березы и осины — от 500 до 1000 м в год. В табл. TP8.1 суммированы возможные изменения, которые могут фактически произойти в растительных сообществах на ЕТР вследствие изменения климата в разные периоды XXI века.

При изменении климата в XXI веке границы растительных зон будут, как правило, сдвигаться к северу. Однако на ЕТР лесная зона может расширяться как к северу, так, возможно, при гумидном потеплении и к югу. В Сибири площадь лесов



**Рис. TP8.6.** Распределение современного (а) и в 2090 г. (б) флористического разнообразия в Сибири — число видов сосудистых растений в расчете на 100 000 км<sup>2</sup>. Рисунок б характеризует равновесное состояние растительности, соответствующее климату 2090 г. 0 — вода, 1 — до 100, 2 — 100–300, 3 — 300–600, 4 — 600–900, 5 — 900–1200, 6 — 1200–1500, 7 — 1500–1800, 8 — 1800–2100, 9 — 2100–3000, 10 — 3000–4000.

может сократиться при одновременном увеличении флористического разнообразия.

Перспективные оценки климата указывают на то, что в середине XXI века на юге России возможно как аридное (сопровождается уменьшением увлажнения), так и гумидное (сопровождается увеличением увлажнения) потепление. Однако наблюдаемые до настоящего времени изменения климата на юге ЕТР более соответствуют гумидному сценарию.

При этом предположении к середине XXI века дальнейшего ослабления аридности следует ожидать только в восточной части степных и лесостепных районов ЕТР. На остальной части ЕТР изменения аридности будут незначительными за исключением степных районов Краснодарского края, где усиление аридности вероятно. К концу XXI века аридность климата возрастет на ЕТР в лесостепи, степи и полупустыне. Более сухими станут степи Краснодарского края и Ростовской области.

Площадь опасной атмосферной засухи несколько сократится к середине XXI века. Изменения частоты опасных засух будут носить локальный характер. Слабое увеличение этой частоты

возможно к концу века. Изменения ареала и частоты опасной почвенной засухи будут минимальными и в середине, и в конце XXI века.

Чрезмерное усиление хозяйственной нагрузки на аридные земли в условиях меняющегося климата может создать предпосылки для катастрофического локального опустынивания.

Ожидается, что при умеренном потеплении преобладающая часть почв России сможет накапливать углерод при сохранении достаточного уровня увлажненности почв. Сильное потепление и увеличение аридных площадей на юге страны могут сместить общий баланс почвенного углерода в отрицательную область.

*Экосистемы заповедников.* В условиях меняющегося климата выполнение основной функции природных заповедников и других особо охраняемых природных территорий — сохранения биологического разнообразия — может быть затруднено.

В настоящее время 9% всех известных видов деревьев на территории России уже подвержены в той или иной степени риску исчезновения. Дополнительная нагрузка в виде изменения климата может оказаться критической для них. При про-

**Таблица ТР8.1.** Изменения растительных сообществ на ЕТР, которые могут произойти в условиях потепления климата в XXI веке (использован метод палеоаналогов)

Современная растительность	2020–2030 гг.	2050-е годы	Конец XXI века
Тундра	Увеличение численности кустарников и термофильных трав	Распространение кустарниковых тундр за счет моховых	Расселение древесных пород, сдвиг к северу границы леса
Березовая и еловая лесотундра	Увеличение численности деревьев за счет местного банка семян	Увеличение площади участков лесов и редколесий	Увеличение сомкнутости лесных сообществ, на юге — проникновение термофильных лесных элементов
Темнохвойная европейская тайга	Увеличение численности березы и осины в коренных ценозах	Увеличение роли термофильных элементов	На юге — иммиграция широколиственных пород
Хвойно-широколиственные леса	Увеличение численности термофильных трав, березы и осины в коренных ценозах, увеличение численности дуба и др. широколиственных пород в подросте. Возможно снижение численности ели у южной границы ареала	Увеличение численности широколиственных пород. Постепенное сокращение численности ели вплоть до ее исчезновения на юге ареала	Постепенное сокращение численности бореальных элементов и преобладание широколиственно-лесных видов трав, деревьев и кустарников
Широколиственные леса	Увеличение численности термофилов (трав, подростов деревьев и кустарников)	Продолжение процессов, начавшихся в 2030-х годах	Иммиграция граба и бука со спутниками* на восток от их современных ареалов
Широколиственная лесостепь	Увеличение численности деревьев (за счет местного банка семян), расселение их на степных участках	Продолжение процессов, начавшихся в 2030-х годах	Иммиграция граба со спутниками в центральные и восточные районы лесостепи
Степь	Расселение деревьев из речных долин и посадок, увеличение численности мезофильных трав	Продолжение процессов, начавшихся в 2030-х годах	Иммиграция термофильных растений с запада
Полупустыня	Увеличение численности злаков и др. мезофитов за счет местного банка семян. Уменьшение ценотической роли полыни	Продолжение процессов, начавшихся в 2030-х годах. Вблизи северной границы зоны — начало расселения мезофильных степных видов	Иммиграция степных видов
Пустыня	Увеличение численности злаков и др. мезофитов за счет местного банка семян. Уменьшение ценотической роли эдификаторов пустынных ценозов	Продолжение процессов, начавшихся в 2030-х годах	Формирование мезофитных растительных сообществ видами местной флоры, на севере возможно участие иммигрантов

*Примечание.* \* К числу спутников граба и бука, т. е. растений, постоянно встречающихся в грабовых и буковых лесах на равнинах и в нижнем горном поясе, относятся липа крупнолистная, клен явор, черешня, бересклет европейский, дерен красный.

должны быстрого продвижения верхней границы леса вверх в Национальном парке “Таганай” (Южный Урал) в ближайшие 50 лет горно-тундровые сообщества могут практически полностью исчезнуть. Через 30–50 лет на заповедных территориях Алтай-Саянского региона существенно сократится площадь высокогорных сообществ. У большинства растений продолжительность вегетационного периода увеличится на 1–2 недели (преимущественно в период весенних месяцев). В заповедных экосистемах бассейна Амура в XXI веке вследствие изменения климата могут произойти смещение сроков наступления фенологических событий и изменение численности и характера поведения животных, состояния растительных сообществ.

Для разных видов животных ожидаемые в XXI веке изменения климата могут иметь как положительное, так и негативное значение. Так, в Сихотэ-Алинском заповеднике следует ожидать продвижения на север ареалов амурского тигра и пятнистого оленя. Численность лося предположительно будет снижаться. При увеличении продолжительности безморозного периода следует ожидать продвижение теплолюбивых видов рептилий и земноводных на север, в частности дальневосточной жерлянки, красноспинного полоза, тигрового ужа и др. В Среднем Приамурье ожидается продвижение на север границ ареалов таких птиц, как чомга (или большая поганка), хохлатый осоед, грач, белокрылый погониш, индийская камышевка, ходулочник. Изменения суммы осадков в осенне-зимний период и температурного режима могут привести к нарушению естественных сезонных миграционных процессов у ряда животных, например, у мигрирующей селемджинской популяции сибирской косули в Норском заповеднике или кабарги в других заповедниках. В заповедниках Алтай-Саянского региона (Алтайский, Саяно-Шушенский заповедники и др.) многие ожидаемые в XXI веке изменения климата в целом неблагоприятны для животных. В краткосрочной перспективе, в ближайшие 15–20 лет, наиболее неблагоприятно будет существенное потепление в весенне-зимние месяцы. В более отдаленной перспективе все больше будет сказываться сужение отдельных природных зон, а также их “островная фрагментация”.

В северных экосистемах в условиях повышения температуры, увеличения количества осадков и глубины сезонного протаивания многолетней мерзлоты в зоне тундры возрастет роль влаголюбивых, относительно термофильных трав из числа местных тундровых видов, увеличится роль кустарничков. Вместе с тем следует ожидать нарушения растительного покрова в результате усиления термокарстовых и солифлюкционных про-

цессов. В зоне лесотундры возрастет роль древесной растительности, главным образом березы.

Уменьшится площадь ягельников — основной кормовой базы северных оленей. Смягчение климата, возможно, будет благоприятно для молодняка оленей — приведет к снижению смертности. Песец будет испытывать сильную конкуренцию с лисицей, ареал которой сместится к северу вследствие потепления. На Таймыре летняя жара и засуха могут привести к резкому снижению численности лемминга и, как следствие, “переключению” песцов и хищных птиц на казарку и к ряду других негативных последствий. Увеличение повторяемости таких климатических условий может привести к подрыву популяции казарки. Возможное сокращение ареала краснозобой казарки оценивается в 67% площади даже при умеренном сценарии потепления. Для северных оленей и овцебыков, как и для всех копытных, наибольшую опасность представляет увеличение частоты и интенсивности весенних и осенних оттепелей и заморозков, так как образующаяся на снегу ледяная корка не позволяет животным добраться до корма.

Для белого медведя потепление климата может иметь как положительные (уменьшение смертности молодняка), так и отрицательные последствия (сокращение площади льдов — уменьшение возможностей охоты на тюленей).

## 9. Криосфера суши

### НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Изменения климата, в первую очередь изменение термического режима и осадков, непосредственно сказываются на состоянии объектов криосферы — континентальной многолетней мерзлоте, ледниковых системах арктических островов и горных ледниковых системах. Это приводит не только к изменению их роли в климатической системе, но и меняет условия хозяйственной деятельности в ряде регионов, где она зависит от состояния этих объектов.

*Континентальная многолетняя мерзлота.* Деградация многолетней мерзлоты уже сейчас причиняет заметный ущерб населению и экономике многих северных стран, и перспектива ее усиления вызывает серьезные опасения. Проблема является существенной и для России, где многолетнемерзлые породы занимали в XX веке более половины (63–67%) территории страны.

Вместе с современным повышением температуры воздуха происходит изменение термического режима почвогрунтов. В период 1960–1990 гг. температура почвогрунтов в Западной Сибири, Восточной Сибири и Забайкалье увеличивалась со скоростью 0,05–0,08°C в год.



Однако при практически повсеместном и заметном повышении среднегодовой температуры воздуха на территории России на некоторых участках континентальной многолетней мерзлоты не наблюдается синхронного увеличения глубины сезонного протаивания. Это можно объяснить многофакторностью формирования температурного режима почвогрунтов. Он формируется не только под влиянием средней температуры воздуха, но также особенностей годового хода температуры воздуха, высоты снежного покрова, влажности почвы, состояния растительного покрова.

Повышение температуры почвогрунтов и увеличение глубины сезонного протаивания в конечном счете приводят к изменению южных границ криолитозоны, что обнаруживается при сравнении карт распространения континентальной многолетней мерзлоты за разные периоды XX века. На южной границе многолетней мерзлоты наблюдались как периоды расширения, так и отступления. На протяжении XX столетия южная граница многолетней мерзлоты смещалась на 1–2 градуса широты в периоды похолодания 1960–1970-х годов и последующего потепления.

*Оледенение арктических островов.* Заметные изменения произошли в состоянии оледенения российских арктических островов: архипелаги Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и Северная Земля. Оно менялось в соответствии с потеплением климата. Хотя происходили как отступление, так и наступание ледников, во второй половине XX века общей тенденцией было отступление. На Земле Франца-Иосифа средняя скорость отступления 17 м/год, общие потери льда в море — 4 км<sup>3</sup>/год. Убыль объема ледников с учетом баланса массы их поверхности составила за 50 лет 75 км<sup>3</sup> (1,5 км<sup>3</sup>/год). Площадь оледенения сократилась на 375 км<sup>2</sup>. Для ледников Новой Земли средняя скорость отступления составила 30 м/год, а площадь оледенения сократилась на 285 км<sup>2</sup>. Средняя скорость отступления ледников Северной Земли составила 2,7 м/год. Площадь оледенения сократилась на 131 км<sup>2</sup>.

*Горное оледенение (на территории бывшего СССР).* В середине XX века общая площадь горного оледенения материковой части территории СССР составляла по данным Каталога ледников СССР (1967–1978 гг.) 22 209 км<sup>2</sup>, а суммарный объем воды, аккумулированной в ледниках, оценивался примерно в 1570 км<sup>3</sup>. Во второй половине XX века, в особенности в его конце, деградация горного оледенения стала доминирующей тенденцией. Это наблюдалось на горных ледниках Урала, Памиро-Алая, Северного Тянь-Шаня, Алтая, Большого Кавказа, северо-востока Сибири и Камчатки.

За 1953–1981 гг. ледники Полярного Урала потеряли до 20–30% своей массы, причем основная

часть этой потери пришлось на 1953–1963 гг. В 1990-х годах началась их интенсивная деградация.

В 1972–1990 гг. ледники на Восточном Памире отступали в среднем со скоростью 4,8 м/год, на Центральном Памире — 6 м/год, на Южном Памире — 3,5–5,5 м/год. В 1990–2001 гг. отступление ледников замедлилось.

В 1955–1990 гг. на Северном Тянь-Шане скорость отступления ледников северного склона Зайлийского Алатау составила 8,5 м/год, а площадь чистого льда сократилась на 29,2%. На внутренних хребтах Северного Тянь-Шаня устойчивое сокращение оледенения отмечалось с середины XIX века. Наименьшие темпы отступления (2–5 м/год) получены по повторным снимкам на ледниках массива Ак-Шыйрак. Площадь ледника Григорьева в целом за последние 150 лет сократилась более чем на 10%. Продолжают сокращаться (на 4–6 м/год) ледники Джунгарского Алатау. С 1956 по 1990 г. площадь оледенения южного склона хребта сократилась на 40%.

За 1952–1998 гг. площадь оледенения всего Алтая уменьшилась на 7%. Во время потепления последних десятилетий наиболее подверженными воздействию меняющегося климата оказались ледники, расположенные на юге и востоке Алтайской горной системы.

На Большом Кавказе в XIX–XX веках размеры оледенения уменьшались. При этом происходило уменьшение площади ледников, их распадение на части и отчленение от них притоков, а также их исчезновение. За 1895–2000 гг. на Большом Кавказе число ледников увеличилось на 255, или на 14%, в результате распадения и отчленения притоков, и произошло это как на северном, так и южном склонах. Площадь оледенения уменьшилась на 948,3 км<sup>2</sup>, или на 43,2%. Одновременно в среднем произошло сокращение толщины и объема ледников. Толщина ледников за рассматриваемый период уменьшилась в среднем на 9 м, или на 23%, а объем льда — в среднем на 88 км<sup>3</sup>, или на 56% по отношению к значениям 1895 г. Ледники Большого Кавказа отступили в среднем на 600 м.

В горах Сунтар-Хаята в последнее тридцатилетие наибольшие потери в абсолютных величинах понесли ледники сложно-долинных и долинных типов различных экспозиций — самые крупные по размерам ледники по аэрофотосъемке 1945 г. Сокращение площади составило в среднем по группе от 0,9 до 0,45 км<sup>2</sup>. Доля потерянной площади у каровых, карово-долинных и висячих ледников, меньших по размеру по сравнению с долинными и сложно-долинными, больше, чем у последних (от 10 до 80%). В основном это ледники экспозиций северных направлений. Ледники южных направлений в процентном отношении потеряли меньше площади (0,2–46%).

На хребте Черского в абсолютных цифрах долинны и сложно-долинны ледники северной и северо-западной экспозиций потеряли максимум площади — в среднем по группам от 0,84 до почти 2 км<sup>2</sup>. Наибольшая потеря площади у каровых ледников характерна для тех, которые открыты с северо-западного и северо-восточного направлений (0,7–0,8 км<sup>2</sup>). Относительная доля утраченной поверхности также велика у ледников северо-восточной, восточной и северо-западной экспозиции, причем для всех морфологических типов, но особенно долинных, карово-долинных и каровых.

В целом к 2003 г. оледенение гор Сунтар-Хаята по площади сократилось по сравнению с серединой XX века на 19,3%, в абсолютных цифрах — на 37,2 км<sup>2</sup>. Для ледников хребта Черского сокращение оказалось более значительным за период 1970–2003 гг. и составило 28%, или 43 км<sup>2</sup> по абсолютной величине (уменьшение площади от 156 до 113 км<sup>2</sup>).

На Камчатке наиболее чувствительны к климатическим изменениям ледники Кроноцкого полуострова. Почти все они имеют отрицательный баланс массы и отступают. Так, фронт ледника Корято с 1971 по 1997 г. отступил на 300–310 м, причем во вторую половину периода скорость отступления возросла вдвое. В целом оледенение невулканических районов Камчатки, включая Срединный хребет, сокращается, в то время как в вулканических районах тенденции неоднозначны.

### ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Дальнейшее потепление климата на протяжении XXI века приведет к усилению изменений в состоянии континентальной многолетней мерзлоты. Будут меняться ее термический режим, глубина сезонного протаивания и границы распространения. Будет продолжаться деградация горного оледенения.

*Континентальная многолетняя мерзлота.* Оттаивание многолетней мерзлоты при потеплении будет происходить в разных типах ландшафтов. На рис. TP9.1 представлены изменения в состоянии многолетней мерзлоты к 2020 и 2050 гг., которые были рассчитаны с использованием сценария IS92 мето-

дом ансамблевого осреднения результатов расчета по нескольким климатическим моделям.

В табл. TP9.1 представлены изменения температуры в приповерхностном слое многолетней мерзлоты и глубины сезонного протаивания к середине XXI века по сравнению с состоянием на конец XX века по крупным регионам. Эти оценки получены в предположении об умеренном потеплении (сценарий B1, использовалось несколько климатических моделей). Согласно этим оценкам, температура многолетней мерзлоты увеличится на 1–2°C. Для глубины сезонного протаивания оценки менее определены: 10–50% по отношению к значениям конца XX века.

На территории России смещение к северу южной границы зоны многолетней мерзлоты (криолитозоны) к середине XXI века составит до 100–200 км. При сохранении наблюдающейся в настоящее время в Западной Сибири интенсивности оттаивания многолетнемерзлых пород (примерно до 4 см в год) через 20–25 лет граница криолитозоны в этом регионе может сдвинуться на 30–80 км к северу, а к 2050 г. — на 150–200 км.

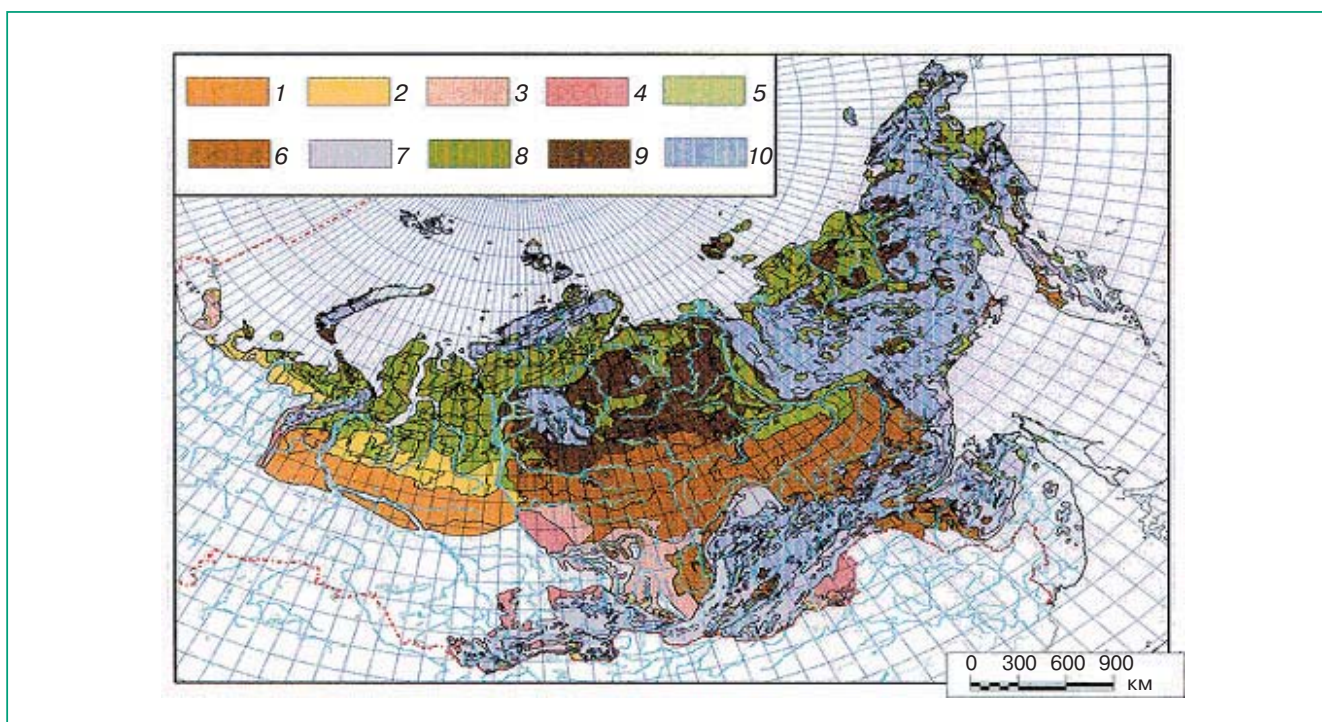
Потепление климата окажет влияние на эмиссию метана с земной поверхности в атмосферу на территории России вследствие увеличения глубины сезонного протаивания многолетней мерзлоты и ее деградации в некоторых регионах. Суммарная эмиссия метана с поверхности почв криолитозоны России составляет в настоящее время около 20 млн. т в год. К середине XXI века суммарное годовое нетто-поступление метана в атмосферу из многолетнемерзлых болот на территории России может увеличиться на 6–10 млн. т. Однако это не окажет заметного влияния на среднюю глобальную температуру приземного воздуха.

### Горное оледенение

*Большой Кавказ.* При сохранении современных тенденций изменения климата в регионе деградация горного оледенения на Большом Кавказе будет продолжаться. В табл. TP9.2 представлены данные о площади оледенения в 2000–2050 гг. Ожидается ее повсеместное сокращение.

**Таблица TP9.1.** Ожидаемые к середине XXI века региональные изменения температуры  $\Delta T$  в приповерхностном слое многолетней мерзлоты и глубины сезонного протаивания  $d$  по отношению к значениям конца XX века

Регион	$\Delta T$ , °C	$d$ , %
Север Скандинавии	1,0–2,0	10–20
Западная Сибирь	1,5–2,0	15–25
Якутия	1,5–2,0	25–50
Чукотка и Дальний Восток	1,0–2,0	40–50



**Рис. TP9.1.** Возможные изменения многолетней мерзлоты на территории России к 2020 и 2050 гг. вследствие изменения климата. Повсеместное оттаивание к 2020 г. на равнинах (1), повсеместное оттаивание к 2050 г.: на равнинах (2), на плоскогорьях (3), в горах (4), частичное оттаивание к 2050 г.: на равнинах (5), на плоскогорьях (6), в горах (7), относительно стабильное состояние: на равнинах (8), на плоскогорьях (9), в горах (10).

**Таблица TP9.2.** Уменьшение площади оледенения Большого Кавказа за 2000–2050 гг.

Большой Кавказ	2000–2020 гг.		2020–2050 гг.		2000–2050 гг.	
	в целом за период, км <sup>2</sup>	в среднем за год, км <sup>2</sup> /год	в целом за период, км <sup>2</sup>	в среднем за год, км <sup>2</sup> /год	в целом за период, км <sup>2</sup>	в среднем за год, км <sup>2</sup> /год
Склон северный	142,2	7,1	159,2	5,3	301,4	6,0
южный	22,8	1,1	47,1	1,6	69,9	1,4
Большой Кавказ	165,0	8,2	206,3	6,9	371,3	7,4

*Примечание.* Предположения об изменении климата: температура воздуха за период абляции повысится на 2,4°C к 2020 г. и на 3,0°C к 2050 г.; атмосферные осадки за период аккумуляции увеличатся к 2020 г. на 11% и к 2050 г. на 23%.

В западной и восточной частях Большого Кавказа будет происходить исчезновение ледников, в центральной части — увеличение их числа в результате отчленения притоков и распада единых ледников на части.

Ледниковый сток за 2000–2050 гг. сократится на 0,85 км<sup>3</sup>/год, или на 32%. На северном склоне за 2000–2050 гг. сокращение будет почти в два раза больше, чем на южном, — 39 и 21% соответственно.

*Северо-восток России.* Если антропогенное воздействие на глобальный климат в XXI веке бу-



дет увеличиваться в соответствии с максимальными сценариями (например, А2), это окажет существенное воздействие на горные ледниковые системы северо-востока Сибири и Камчатки. Для перспективной региональной оценки использовались результаты расчетов климата будущего с помощью климатической модели ЕСНАМ4. В условиях выбранного сценария за XXI столетие увеличение средней температуры летом составит от 3,1 до 3,8°C. На северо-востоке Сибири твердые осадки увеличатся везде, кроме южного массива Сунтар-Хаята. На Камчатке ожидается, напротив, некоторое уменьшение твердых осадков везде, за исключением юго-востока, где они слегка увеличатся.

В новых климатических условиях граница питания ледников на северо-востоке Сибири поднимется. Наименьший ее подъем ожидается в северных частях — на 320 м против 500 м на юге. Примерно треть площади ледников останется на хребте Черского, на севере Орулгана и Сунтар-Хаята. Ледники не будут покрывать южный очаг оледенения Орулгана и Сунтар-Хаята.

На Камчатке наибольший подъем границы питания ожидается на расположенном на юге полуострова Ичинском вулкане — на 1210 м. Отступление ледников Срединного и Кроноцкого хребтов, вулканов Шивелуч и юго-востока Камчатки ускорится. Площадь оледенения уменьшится дифференцированно: до нуля — полное исчезновение малых ледниковых систем; с сохранением 70% площади — Ключевская группа вулканов; половина площади оледенения — вулканы Шивелуч и Толбачек. Ледники исчезнут с невысоких хребтов Тумрок и Гемчен, а также с хребта Валагинского. На Кроноцком хребте останется 10% от современной площади оледенения. Примерно треть площади ледников останется на Срединном хребте Камчатки и вокруг Ичинского вулкана. Ледники, окаймляющие сопки юго-востока Камчатки, сохранят более 40% площади.

## 10. Моря

### НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Пограничные моря России подвержены влиянию меняющегося климата. В XX веке изменения состояния, связанные с климатом, обнаружены как для северных (Балтийское, арктические, Берингово), так и южных (Черное, Азовское, Каспийское) морей. Изменения установлены в физических (термический и ледовый режимы, уровень, соленость) и биологических (видовой состав, ареалы видов, продукционно-деструкционные процессы) параметрах.

**Биологические системы северных морей.** Уязвимость северных морских экосистем к изменению климата обусловлена их особыми свойствами, в частности световым режимом, сроками ледового периода, температурой воды, пищевыми цепями. Изменения в состоянии северных морских экосистем, связанные с изменением климата, обнаружены в их микробиологических показателях, фитопланктоне, зоопланктоне, зообентосе, ихтиофауне, а также в популяциях морских птиц и млекопитающих.

**Балтийское море.** В заливах изменились видовой состав и фенологические сроки фитопланктона, повысилось его биоразнообразие, главным образом, из-за зеленых водорослей. Так, в Куршском заливе сейчас регистрируются не два, а три пика: весенний, летний и осенний, не отмеченный в 1970-е годы. Период вегетации планктонных водорослей расширился, весенний и летний максимумы сместились к более ранним датам примерно на три недели. Уменьшение солености и повышение температуры моря привели к снижению доли видов зоопланктона, приспособленных к высокой солености и низкой температуре, к увеличению доли тепловодных и мелкоразмерных форм. С 1970-х годов наметилась тенденция повышения биомассы зоопланктона; в конце 1990-х — начале 2000-х годов биомасса зоопланктона была больше, чем в предыдущие годы, в 1,7 раза зимой и в 11,4 раза летом. Произошло успешное вселение целого ряда видов из других мест обитания. Изменения в вертикальном распределении солености и концентрации кислорода привели к обеднению донной фауны в конце XX века. Изменение среды вследствие изменения климата способствовало успешной интродукции бентосных видов из других регионов, таких как Черноморско-Каспийский регион. В сообществе рыб в открытой части моря доминировали треска, шпрот и сельдь. Вследствие изменения климата соотношение вес-возраст у сельди уменьшилось в 1980-х годах в разных частях Балтики; индивидуальная масса шпрота снизилась позже, в 1990-х годах. Изменения климата оказали влияние на популяции морских птиц, изменяя области их распространения, численность, признаки и особенности видов, сроки и пути миграции. В период 1987–2002 гг. произошел широкомасштабный сдвиг ядра популяции с юга на север у таких видов птиц, как лебедь-шипун, хохлатая чернеть, обыкновенный гоголь, большой крохаль. Время размножения птиц и сроки весенней миграции в некоторых случаях сдвинулись к более ранним датам.

**Белое море.** В конце XX века в регионе был хорошо выражен положительный тренд температуры воздуха. Климат стал более влажным. С конца 1970-х — начала 1980-х годов среднегодовой



уровень Белого моря повысился на 10–12 см. Вследствие изменения климата численность и видовое разнообразие бактериопланктона увеличились. Уменьшение суровости зим и ледовитости моря создали условия не только для зимовки ряда перелетных водоплавающих птиц, но и для существования оседлых беломорских популяций (обыкновенной гаги и атлантического чистика). Однако уменьшение ледовитости моря отрицательно сказывается на условиях воспроизводства беломорской популяции гренландского тюленя и ведет к снижению его численности. Современное изменение климата создает благоприятные условия для развития марикультур в Белом море.

*Баренцево море.* Изменение климата проявилось в повышении температуры воды, уменьшении ледовитости северной части моря и подъеме его уровня за 1970–2005 гг. на 10–12 см. Основное промысловое значение имеют треска, пикша, мойва, сайда, сельдь, а также креветки. Эти промысловые объекты составляют около 90% общего вылова. Влияние современного потепления на популяции рыб положительное. Зарегистрированы представители новых видов-вселенцев, которые могут привести к некоторой модификации морской экосистемы, последствия которой оценить трудно. Современные изменения климата способствуют проникновению североатлантических популяций морских птиц. В море обитает 12 разновидностей китов. Основные — арктический гренландский кит, нарвал, белый кит и малый остроносый кит. Наиболее распространенными являются белуха и малый остроносый кит, они считаются промысловыми видами. Современные изменения климата приводят к увеличению численности китов. В море обитает семь разновидностей ластоногих. Наиболее многочисленным является гренландский тюлень. Условия его обитания ухудшились, поскольку кромка арктических льдов сдвигается к северу из-за потепления.

Сокращение площади арктических льдов угрожает существованию белого медведя.

*Чукотское море.* К 2002 г. плотность бактериальной микрофлоры Чукотского моря возросла в среднем в 1,5–2 раза по сравнению с уровнем 1993 г.; средняя численность гетеротрофных сапрофитных бактерий была в 3,7 раза больше, чем в 1993 г.

*Берингово море.* С 1981 по 1993 г. на эпипелагиали Берингова моря численность бактериопланктона увеличилась в среднем в 4,0 раза и в 6,7 раза суточная продукция бактериальной биомассы, что свидетельствует о тенденции эвтрофирования под воздействием антропогенных факторов и, возможно, изменения климата. В 1993 г. по сравнению с 1950 г. в условиях повышения температуры воды в западной части Берингова моря было выявлено повышенное число видов фитопланктона с тропическим типом ареала. По данным за 1993 г., в глубоких слоях в Анадырском заливе появились ранее не встречавшиеся виды водорослей.

*Морская хозяйственная деятельность в Арктике.* В Арктике изменения температуры приземного воздуха в XX веке определялись как естественными колебаниями климата, так и фактором глобального антропогенного потепления вследствие эмиссии парниковых газов в атмосферу. Наложение этих двух процессов привело к своеобразному ходу среднегодовой температуры воздуха, которому свойственны периоды потепления и похолодания. В то же время общей долговременной тенденцией является потепление. Соответственно и площадь морских арктических льдов в XX веке в долговременном плане в целом постепенно уменьшалась.

Климат существенно влияет на ледовые условия в районах, где проходят трассы Северного морского пути (рис. TP10.1), а также на береговую инфраструктуру. Средняя продолжительность периода сквозного безледокольного плавания по



Рис. TP10.1. Трассы плавания вдоль Северного морского пути (1) и районы с тяжелыми ледовыми условиями (2).

трассам Северного морского пути — от 0 до 35 суток. Для сквозного плавания в период повышенной ледовитости (1962–1983 гг.) была необходима ледокольная проводка в 50% случаях, при пониженной ледовитости (1933–1961 гг.) — в 17% случаев, а в период 1984–2004 гг. — только в 14% случаев. В 2001–2005 гг. существенно улучшились ледовые условия плавания в конце теплого сезона — в августе и сентябре — по высокоширотным трассам к северу от арктических архипелагов Земля Франца-Иосифа, Северная Земля, Новосибирские острова. Максимальное увеличение протяженности пути плавания по чистой воде и уменьшение протяженности пути в сплоченных льдах отмечались во время сезонного минимума площади льда (сентябрь).

В последние 50 лет наблюдаются отступление фронтов и сокращение площади некоторых выводных ледников в Западной Арктике. При этом число айсбергов, отделяющихся от выводных ледников, не убывает. В отдельные годы наблюдается смещение границы распространения айсбергов к югу. Смещение ледовых массивов, появление айсбергов увеличивают риск для морских перевозок, добычи углеводородов и рыбного промысла.

Вследствие более активной деградации многолетнемерзлых пород, разрушения арктических берегов, навалов льда и некоторых других процессов отмечаются негативные последствия для прибрежной инфраструктуры. Увеличение безледного периода усиливает негативное воздействие волнения на берега, прибрежные и морские сооружения. Морям Лаптевых и Восточно-Сибирскому свойственны наибольшие скорости размыва побережья. Берега разрушаются и под действием подвижек льда, и в результате действия штормов, когда в воде содержится мелкобитый лед.

### Южные моря

В южных морях (Черном, Азовском и Каспийском) в XX — начале XXI века наблюдались изменения уровня моря, температуры воды на разных глубинах, концентрации хлорофилла в поверхностном слое и солености. Изменения этих климатозависимых параметров происходили на фоне изменения климата на водосборах южных морей, изменения стока впадающих в них рек и режима испарения.

#### Черное море

*Уровень.* С 1875 г. до 1920-х годов наблюдалась слабая, но стабильная тенденция к понижению уровня моря. С середины 1920-х годов до примерно 1985 г. уровень повышался со средней скорос-

тью  $1,83 \pm 0,7$  мм/год, а за период 1993–2005 гг. —  $2,06 \pm 0,3$  см/год.

*Температура.* Судя по данным 19 гидрологических станций вдоль побережья Черного моря, в период 1923–1985 гг. изменения температуры поверхности моря (ТПМ) не были однонаправленными. В период 1982–2002 гг. средняя годовая ТПМ повысилась примерно на  $1,3^\circ\text{C}$  при некотором ее понижении в 1982–1993 гг. и интенсивном увеличении в 1993–2002 гг. Понижение температуры в поверхностном (0–50 м) и холодном промежуточном (50–100 м) слоях примерно на  $1^\circ\text{C}$  с конца 1960-х годов до 1993 г. сопровождалось ее увеличением в главном термочлине — на  $0,12^\circ\text{C}$  на глубине 200 м и  $0,04^\circ\text{C}$  на глубине 300 м.

*Хлорофилл.* Согласно спутниковым данным SeaWiFS, вся поверхность Черного моря характеризовалась положительными аномалиями концентрации хлорофилла в 1997–2001 гг. (относительно ее среднего значения в период с сентября 1997 г. до середины 2006 г.) и отрицательными в 2002–2005 гг. Межгодовые колебания концентрации хлорофилла были связаны со стоком Дуная. Потепление вод Черного моря после 1995 г. привело к ослаблению или исчезновению зимнего (февраль – март) пика биомассы фитопланктона. Необычно длительное цветение фитопланктона наблюдалось в теплые 1998 и 1999 гг. и, особенно, в 2001 г., когда была зарегистрирована самая высокая средняя за зиму и за год ТПМ за период 1982–2002 гг.

*Соленость.* В 1960–1995 гг. происходили изменения солености и соответственно вертикальной стратификации верхнего 300-метрового слоя Черного моря. Период относительно больших значений солености поверхностного слоя 0–50 м (1966–1975 гг.) сменился периодом понижения солености (1976–1995 гг.) в среднем на  $0,2\text{‰}$ . В главном термочлине, напротив, соленость в этот период увеличилась (на  $0,33\text{‰}$  на глубине 100 м и на  $0,14\text{‰}$  на глубине 300 м), что привело к усилению стратификации вод и ослаблению вертикального обмена между поверхностным слоем моря и его глубинными водами.

*Сток рек.* В период 1860–2000 гг. сток Дуная (среднее многолетнее значение — около  $200 \text{ км}^3/\text{год}$ , обеспечивает вместе с Днестром и Днестром 80% суммарного речного стока в море) увеличивался в среднем на  $0,126 \text{ км}^3/\text{год}$ . Это привело к повышению уровня моря вследствие стока на 4 см при его общем увеличении за этот период на 11 см.

#### Азовское море

*Уровень.* В 1992–2004 гг. уровень Азовского моря в среднем увеличивался со скоростью

$2,11 \pm 0,2$  см/год; наиболее интенсивное повышение наблюдалось в период 2002–2004 гг.

**Температура.** Со второй половины 1920-х годов до примерно 1982 г. ТПМ в среднем менялась мало — положительный тренд был порядка  $0,01^\circ\text{C}/\text{год}$ . В последующий период 1982–2000 гг. положительный тренд ТПМ увеличился в несколько раз и составил примерно  $0,04^\circ\text{C}/\text{год}$ . При этом, как и в Черном море, ТПМ в среднем уменьшалась в 1982–1993 гг. и увеличивалась в 1993–2000 гг. В последние десятилетия преобладали мягкие зимы с незначительной ледовитостью моря.

**Хлорофилл.** При повышении солености Азовского моря в 1959–1972 гг. наблюдалось значительное снижение биомассы фитопланктона.

**Соленость.** В период 1922–1977 гг. наблюдалось увеличение солености Азовского моря, связанное с антропогенными (зарегулированность и изъятие стока рек бассейна) и климатическими (изменение общей увлажненности бассейна) факторами, от примерно  $10,7\text{‰}$  в 1920-х годах до  $13,9\text{‰}$  в 1977 г., что примерно на  $3,0\text{‰}$  больше естественной нормы. Однако в 1977–2002 гг. наблюдался в среднем отрицательный тренд средней по морю солености; она уменьшилась до примерно  $11\text{‰}$  в 1982 г., затем несколько увеличилась примерно до  $12\text{‰}$  к 1985 г. и в дальнейшем снова уменьшилась. В период 1993–2005 гг. региональные проявления климатических изменений (увеличение стока рек в результате роста атмосферных осадков и уменьшение испарения) привели к уменьшению солености до значений условно-естественного режима (т. е. наблюдавшихся до зарегулирования стока рек бассейна моря).

**Сток рек.** Сток рек, впадающих в Азовское море, с 1900 г. до середины 1970-х годов в среднем уменьшался. С конца 1970-х годов по настоящее время наблюдается увеличение речного стока.

### Каспийское море

**Уровень.** В многолетнем ходе уровня Каспия в XX веке можно выделить несколько характерных периодов: 1900–1929 гг. и 1942–1969 гг. — относительно стабильного (или умеренного понижения) уровня, 1930–1941 гг. и 1970–1977 гг. — его резкого понижения, 1978–1995 гг. — резкого повышения уровня. В итоге — понижение уровня моря с примерно  $-25,7$  м БС в 1900 г. до  $-29,0$  м БС в 1977 г. и его повышение до  $-27,0$  м БС в 2001 г. С 2002 г. ( $-27,1$  м БС) наблюдается повышение уровня Каспия в среднем на  $7,5 \pm 1,3$  см/год.

**Температура.** В 1900–1970 гг. ТПМ Каспия увеличивалась в среднем примерно на  $0,01^\circ\text{C}/\text{год}$ . В 1982–2000 гг. положительный тренд ТПМ увеличился в среднем в несколько раз ( $0,05^\circ\text{C}/\text{год}$  в Среднем Каспии и  $0,10^\circ\text{C}/\text{год}$  в Южном), т. е.

ТПМ выросла примерно на  $1,5^\circ\text{C}$ . При этом, как и в Черном море, наблюдались ярко выраженные уменьшение средней годовой ТПМ в 1989–1992 гг. и ее увеличение в 1992–1995 гг.

**Хлорофилл.** В Северном Каспии в 1998–2002 гг. преобладали положительные аномалии концентрации хлорофилла (относительно ее среднего значения за период 1997–2004 гг.), а в 2003–2004 гг. — отрицательные. В Среднем и Южном Каспии отрицательные аномалии в 1997–2000 гг. сменились ее резким увеличением в 2001 г. (особенно в Южном Каспии) и 2002 г. с последующим уменьшением в 2002–2004 гг.

**Соленость.** Значительные многолетние изменения солености наблюдались в основном в мелководном Северном Каспии, где они обусловлены, главным образом, изменениями волжского стока. На южной границе Северного Каспия (разрез о. Чечень — п-ов Мангышлак) при уменьшении водности Волги в 1950–1970 гг. произошло повышение солености в поверхностном слое 0–10 м на  $0,5\text{--}0,8\text{‰}$ . Однако с увеличением стока в 1980-х годах она здесь уменьшилась на  $0,5\text{--}0,6\text{‰}$ .

**Сток рек.** Суммарный приток пресных вод в Каспийское море в период 1880–2001 гг. существенно менялся. Он мало изменялся в среднем с 1880 по 1930 г. (межгодовая изменчивость при этом была значительной, размах — около  $240 \text{ км}^3/\text{год}$  при среднем значении примерно  $300 \text{ км}^3/\text{год}$ ), уменьшался с 1930-х годов до 1977 г. (с минимумом в 1975 г. —  $181 \text{ км}^3/\text{год}$ ) и увеличивался с 1978 по 2001 г. с максимумом в 1994 г. ( $387 \text{ км}^3/\text{год}$ ) и некоторым снижением в последующие годы.

### ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

**Биологические системы северных морей.** Ожидаемые изменения климата существенно затронут среду обитания гидробионтов, структурные и функциональные характеристики экосистем северных морей. Изменение климата может стать главным фактором, воздействующим на морские биоресурсы в течение следующих нескольких десятилетий.

Среди последствий изменения климата для ценных промысловых видов рыб, млекопитающих и морских птиц и других морских организмов в условиях существующих сценариев будут как благоприятные, так и неблагоприятные.

Основные ожидаемые последствия изменения температуры в поверхностном слое океана для морских экосистем — сдвиги географического распределения морской биоты и изменение биологического разнообразия, в особенности в высоких широтах. Изменения климата, наряду с режимом эксплуатации рыбных стад, окажут существенное влияние на рыбный промысел.



*Балтийское море.* Согласно данным регионального моделирования, во всем бассейне в течение столетия потеплеет в среднем на 3–5°C, в большей степени — в восточной и северной частях в зимние месяцы, а в южной — летом. Вследствие этого в конце XXI века вегетационный период увеличится на 20–50 суток в северных районах и на 30–90 суток в южных. Значительно уменьшится площадь морского льда в течение зимы, более всего — в Финском, Рижском и Ботническом заливах и во внешних частях юго-западного архипелага у побережья Финляндии. Продолжительность ледового сезона уменьшится на 1–2 месяца в северной части моря и на 2–3 месяца в центральной.

Годовая сумма осадков увеличится, особенно в северной части моря. Зимние осадки увеличатся в большей степени, чем летние. В южных районах осадки увеличатся в меньшей степени, чем в северных, особенно летом. Речной сток в море увеличится (в северных районах в большей степени, чем в южных). Летний сток увеличится в меньшей степени, чем зимний. Средняя соленость, возможно, уменьшится.

Потепление и ассоциированное с ним изменение режима моря могут привести к усилению активности бактерий, что должно увеличить круговорот и минерализацию в поверхностных водах, так что седиментация органического вещества может уменьшиться. Возможны также изменения во времени цветения и видовом составе фитопланктона, что может разрушить существующую пищевую цепь и спровоцировать изменения на более высоких трофических уровнях. Повышение температуры в поверхностном слое Балтийского моря может привести к ослаблению весеннего и осеннего конвективного перемешивания, воздействуя, таким образом, на распределение пищевых элементов в фотической зоне, а изменение речного стока может привести к изменению поступления пищевых элементов с водосбора. Ожидаемое повышение температуры воды, вероятно, положительно скажется на выживаемости мезозoopланктона в зимнее время и его росте и размножении летом. Роль более мелкого мезозoopланктона (простейшие, кладоцеры, коловратки, мелкие copepodы эстуариев) будет возрастать в пелагической пищевой цепи.

Воздействие потепления на морских млекопитающих скажется, главным образом, через значительное сокращение ледового покрова, что негативно повлияет на тюленей, размножающихся на льду, в первую очередь, на кольчатых нерп и серых тюленей.

Ожидается, что ледовый покров будет существенно уменьшаться в районах размножения нерп, так что в 2071–2100 гг. в южных районах для воспроизводства нерп останется только 18–48

ледовых дней. Ареал кольчатых нерп уменьшится и сдвинется к северу. Возможно исчезновение популяций, размножающихся в Финском, Рижском заливах и на архипелаге у побережья Финляндии.

Ожидаемое увеличение уровня моря и ветрового волнения может негативно повлиять на распространение, места добывания пищи и воспроизводства серых и обыкновенных тюленей. Повышение температуры поверхности воды и сокращение площади ледового покрова могут оказаться благоприятными для морских свиной и обыкновенных тюленей.

Морские птицы, мигрирующие и зимующие на Балтике, могут быть больше всего подвержены влиянию потепления — они смогут зимовать севернее, чем сейчас.

*Чукотское и Берингово моря.* Ожидаемое потепление климата в регионе Чукотского моря и сопровождающие его процессы — изменение температуры поверхностного слоя воды, увеличение продолжительности сезона вегетации фитопланктона, таяние многолетней мерзлоты и увеличение речного стока, размыв береговой линии — в конечном итоге будут способствовать поступлению в море дополнительной органики и активизации развития гетеротрофной сапрофитной микрофлоры.

При увеличении температуры в верхнем квазиоднородном слое воды на 1, 2 и 4°C произойдет увеличение первичной продукции органического вещества на 1, 2,6 и 4,6% соответственно, а бактериальной деструкции — соответственно на 2, 4 и 7%. При повышении температуры на 2–4°C увеличение биомассы планктона наиболее существенным окажется для зоопланктона — на 2–4%. При этом концентрация нитратов понизится на 1–2%, а аммония — увеличится на 1–1,6% (эти показатели соответствуют увеличению температуры в теплый период года).

*Морская хозяйственная деятельность в Арктике.* Дальнейшее увеличение концентраций парниковых газов в атмосфере и связанное с этим глобальное потепление скажется на климате Арктики. Его изменение в XXI веке будет определяться двумя факторами — региональным откликом на глобальное антропогенное потепление, проявляющимся в положительном долговременном (вековом) тренде температуры воздуха в Арктике, и циклическими изменениями регионального климата с характерным временем в несколько десятилетий, имеющими естественные причины.

В целом, учитывая долговременную тенденцию к потеплению в Арктике в течение XXI века, региональное, так же как и трансарктическое судоходство по Северному морскому пути, возможно, получают выгоды от сокращения площади мор-



ского льда и удлинения сезона навигации. Облегчение ледовых условий на трассе Северного морского пути создаст предпосылки для увеличения продолжительности безледокольного плавания в навигационный период.

Однако значительность амплитуды упомянутых циклических изменений может привести к тому, что температуре воздуха в Арктике в XXI веке будут присущи периоды увеличения и уменьшения, несмотря на общую тенденцию к потеплению в масштабе 100 лет и более. Такой ход температуры скажется на характере ледовитости в Арктике. Общей тенденцией в XXI веке будет уменьшение ледовитости, но отдельные периоды ее увеличения также возможны. Вследствие этого в ряде регионов в условиях плавания по Северному морскому пути могут наблюдаться циклические изменения — периоды уменьшения и увеличения ледовитости. Так, до 2015 г. сохранится вероятность формирования сложных и очень сложных ледовых условий в проливах Вилькицкого и Шокальского, а также в проливах Дмитрия Лаптева, Санникова и Лонга. Однако до 2015 г. продолжительность ледового периода на Северном морском пути от пролива Карские Ворота к востоку останется не менее шести месяцев в году.

Условия освоения ресурсов на шельфе арктических морей весьма зависимы от климата. Это связано с воздействием гидрометеорологической обстановки — в том числе морского дрейфующего льда, обломков айсбергов, штормовых ветров и волнения — на добывающие сооружения и транспортирующие средства. При дальнейшем изменении климата вероятность появления дрейфующих льдов будет уменьшаться, а возрастет вероятность

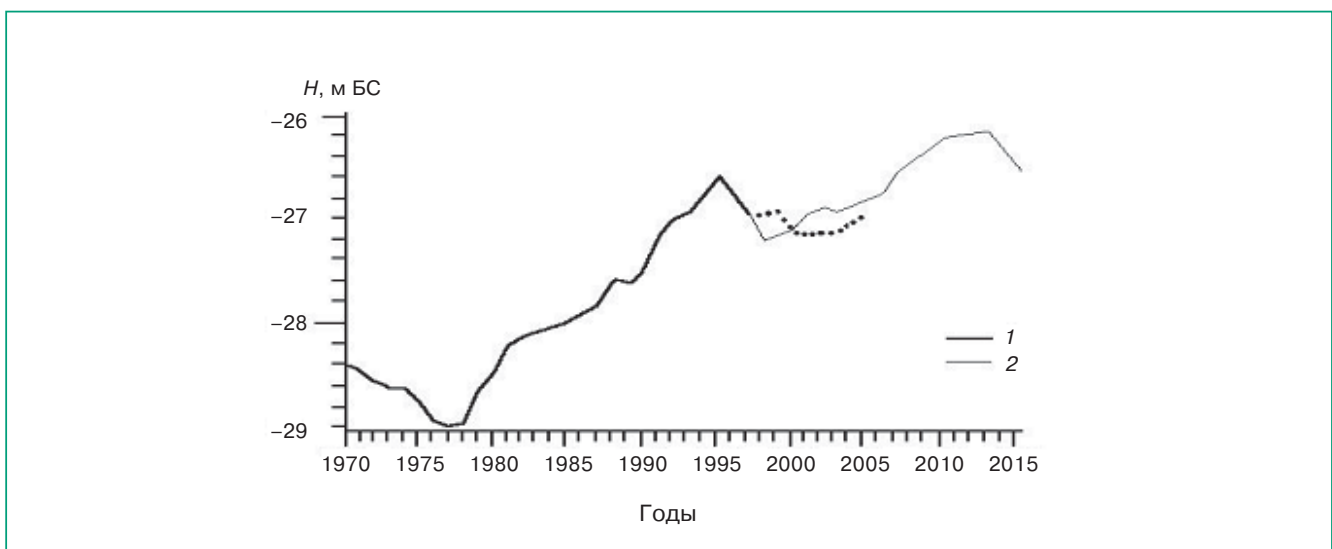
увеличения высоты ветровых волн и появления обломков айсбергов от деградирующих ледников на арктических островах.

Морской лед при утончении и сокращении сплоченности, вероятно, станет более динамичным во многих прибрежных регионах, где прежде существовали относительно стабильные условия, что может создать дополнительный риск для хозяйственной деятельности.

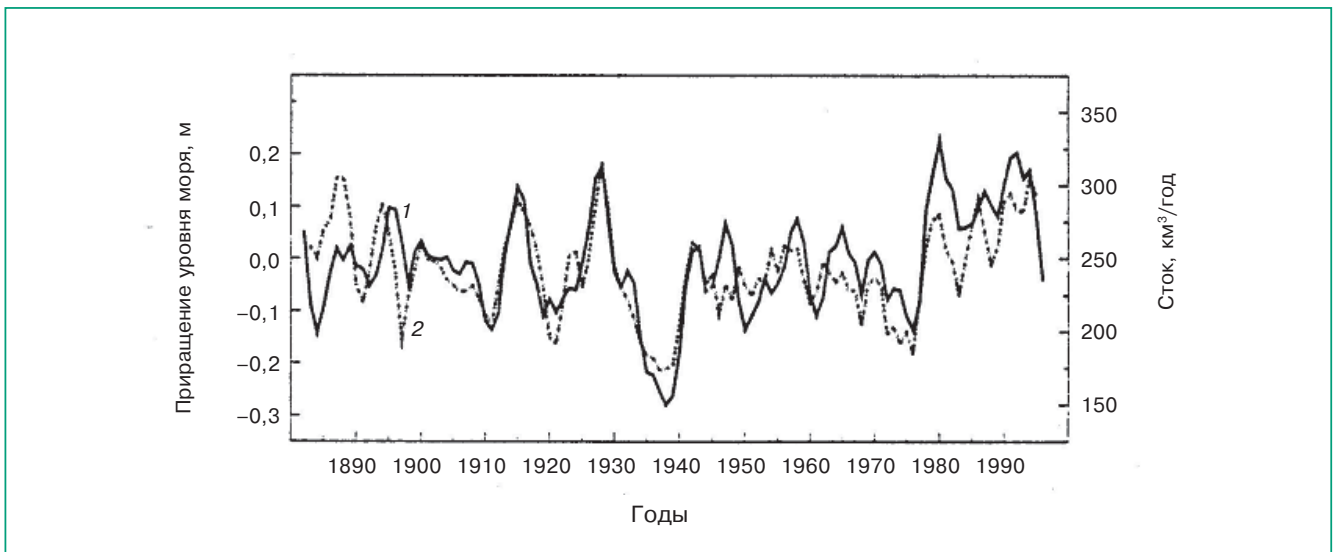
**Уровень Каспийского моря.** Изменение уровня Каспийского моря в XXI веке может определяться разноплановыми факторами. Это — метеорологические факторы (атмосферная циркуляция, осадки и эвапотранспирация на водосборе), гидрологические факторы (сток впадающих рек и видимое испарение) и региональные антропогенные факторы (регулирование стока рек и изменение свойств подстилающей поверхности с хозяйственными целями). При этом изменение климата на водосборе моря в масштабе века и более будет иметь существенную глобальную составляющую.

*В среднесрочной перспективе* — ближайшие десятилетия — в формировании уровня Каспия наибольшую роль будут играть, наряду с региональными антропогенными факторами, естественные колебания климата в бассейне моря, определяемые в основном характером атмосферной циркуляции в регионе.

На рис. TP10.2 приведены фактические данные об уровне Каспия и его перспективная оценка на ближайшее десятилетие, построенная на основе корреляционных связей с климатическими предикторами. В ближайшее десятилетие существенного повышения уровня Каспия не



**Рис. TP10.2.** Фактические данные об уровне (Н) Каспийского моря (1) и его прогностическая оценка (2). Точки показывают фактический ход уровня моря после построения прогностической кривой (1997 г.)



**Рис. TP10.3.** Приращение уровня Каспийского моря за год (1, левая ось ординат) и годовой сток Волги (2, правая ось ординат).

ождается — уровень Каспия не превзойдет  $-26$  м БС.

Существующие *долгосрочные оценки* уровня Каспийского моря на XXI век неоднозначны. Колебания уровня в прошлом сходны с колебаниями стока Волги (рис. TP10.3). Расчеты, в которых ведущим фактором формирования уровня моря считается сток Волги, показывают возможность значительного повышения уровня к концу XXI века. Однако другие исследования, в которых более детально учитываются факторы испарения с поверхности моря и эвапотранспирации на водосборе, указывают на возможность существенного понижения уровня Каспия в течение XXI века.

На территории России Каспий может затопить от  $4170 \text{ км}^2$  при повышении его уровня на  $1$  м и до  $18620 \text{ км}^2$  при повышении на  $5$  м.

Повышение уровня Каспия выше отметки  $-26$  м БС может оказать существенное негативное влияние на населенные пункты и хозяйственные объекты, привести к негативным изменениям ландшафта в прибрежной полосе шириной до  $30$  км.

## 11. Технические системы

### НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

*Состояние зданий и сооружений, транспорт.* В последние годы наблюдается увеличение числа случаев разрушения зданий, которое частично связано с изменением климата, а также с недостаточным учетом климатических факторов при их проектировании и эксплуатации. При этом основной

метеорологической причиной разрушения зданий являются снеговые нагрузки.

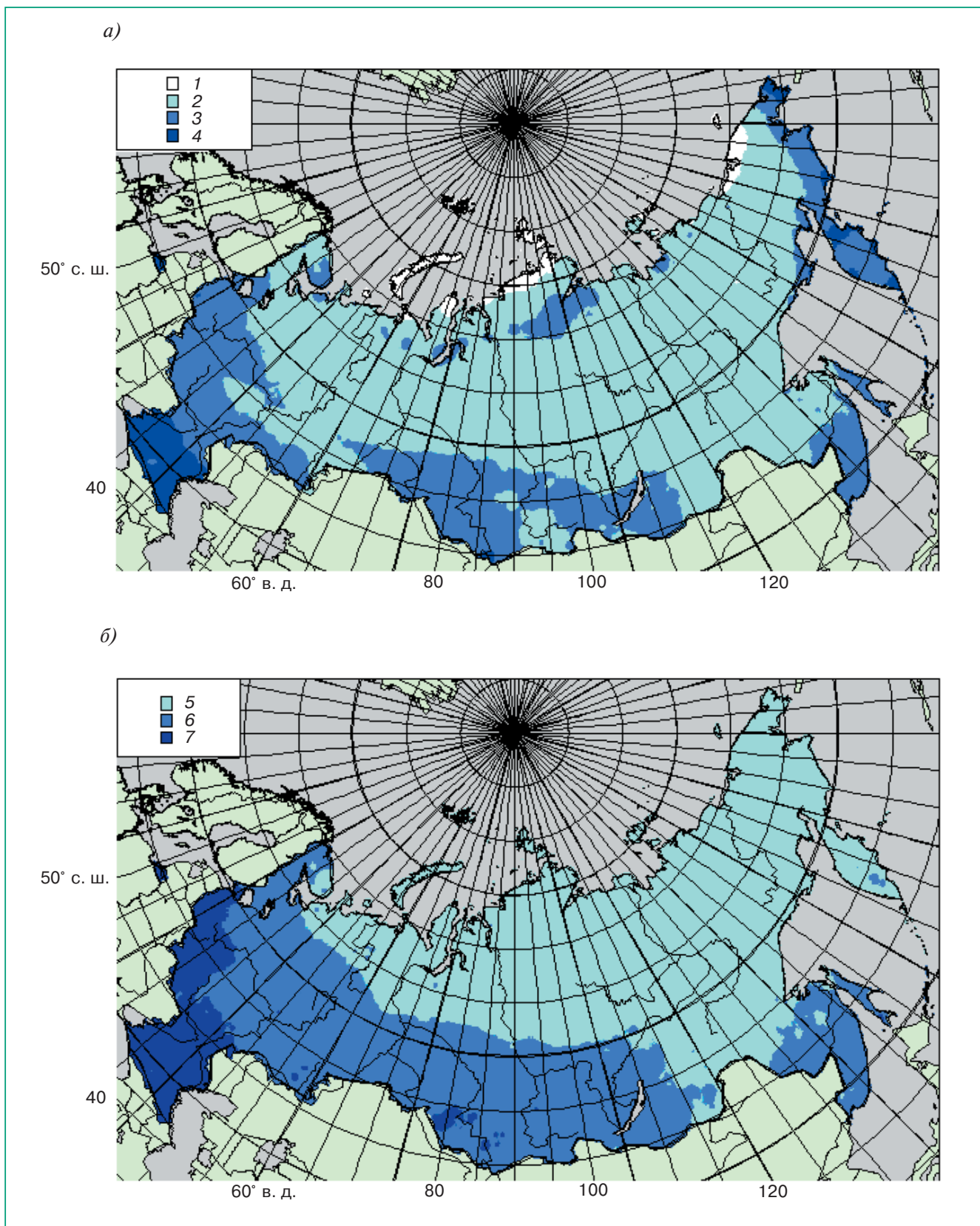
В связи с увеличением повторяемости оттепелей и заморозков в осенне-зимний и зимне-весенний периоды в ряде регионов, например на ЕТР и в Приморье, наблюдается ухудшение условий эксплуатации зданий и сокращение их долговечности.

Ветровые и гололедно-ветровые нагрузки, которые раньше оказывали существенное негативное влияние на состояние воздушных линий связи и электропередач, в конце XX века стали играть меньшую роль вследствие уменьшения средней скорости ветра на большей части территории страны.

Наблюдаемая тенденция к увеличению как осадков (особенно жидких и смешанных), так и частоты обильных снегопадов на значительной части территории России осложняет эксплуатацию автомобильных и железных дорог, создает опасность размыва некоторых их участков. Частота опасных для транспорта экстремальных гидрометеорологических явлений увеличилась на севере страны в конце XX — начале XXI века. Связано это в основном с увеличением числа смерчей, шквалов и ураганов, несмотря на уменьшение средней скорости ветра.

Увеличение температуры зимой и весной негативно сказывается на сезонных транспортных коридорах в районах Крайнего Севера (зимники, замерзшие реки). Учатившиеся в последнее время заморозки и оттепели приводят к увеличению повторяемости гололедицы на дорогах.

Многие промышленные и жилые здания, нефтяные вышки, насосные станции и трубопрово-



**Рис. ТР11.1.** Расчетное сокращение (%) продолжительности отопительного периода (а) и индекса потребления топлива (б) за последние три десятилетия. 1) 0–1,9; 2) 2–3,9; 3) 4–5,9; 4) 6–7,9; 5) 4–6; 6) 6–8; 7) 8–10.

ды, дороги, мосты, взлетно-посадочные полосы в северных регионах построены на многолетней мерзлоте и рассчитаны на эксплуатацию в определенном диапазоне климатических условий. Их изменения могут привести к повышению температуры почвогрунтов, увеличению глубины сезонного протаивания и, как следствие, к уменьшению несущей способности фундаментов и их прочности.

В Западной Сибири на магистральных нефте- и газопроводах около 21% всех аварий вызваны механическими воздействиями, в том числе связанными с потерей устойчивости фундаментами и деформацией опор. В 1990–1999 гг. число зданий, получивших повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием на 42% в Норильске, на 61% в Якутске и на 90% в Амдерме.

Особую опасность в условиях потепления вызывают криопэги, которые представляют собой линзы разного размера с высокоминерализованной водой, имеющей отрицательную температуру. Они образуются в мерзлых грунтах с повышенным содержанием солей и широко распространены на морских террасах вдоль Арктического побережья, в частности на полуострове Ямал в районах перспективных нефтяных и газовых месторождений. Даже небольшое увеличение температуры грунта может нарушить имеющееся равновесие и привести к таянию значительных массивов приповерхностной многолетней мерзлоты. Особую опасность это представляет для газовых и нефтяных скважин и для опор трубопроводов.

**Термический режим помещений.** Вследствие потепления на большей части территории России уменьшилась потребность в отоплении помещений в холодный период года и возросла потребность в кондиционировании помещений в теплое время года.

Сократилась расчетная продолжительность отопительного периода, определяющая количество топлива для нужд отопления (рис. TP11.1).

#### ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

В условиях меняющегося климата в XXI веке будут изменяться климатические нагрузки на технические системы — здания, сооружения, автомобильные и железные дороги и т. д. Это повлияет на их прочностные характеристики и режим эксплуатации. Изменятся продолжительность отопительного периода в холодное время года, продолжительность периода кондиционирования помещений в теплое время года, а также потребность в топливе для поддержания комфортных термических условий в помещениях.

**Состояние зданий и сооружений, транспорт.** В условиях потепления увеличение повторяемости

оттепелей и появление оттепелей в районах, где они ранее не наблюдались, приведут к существенному сокращению долговечности зданий на севере страны, а увеличение снеговых нагрузок приведет к дополнительному риску разрушения зданий и сооружений.

Гололедная нагрузка на здания и сооружения значительно увеличится в Южном, Приволжском и Дальневосточном федеральных округах, а также на Дальнем Востоке. Ветровые нагрузки в среднем почти повсеместно уменьшатся.

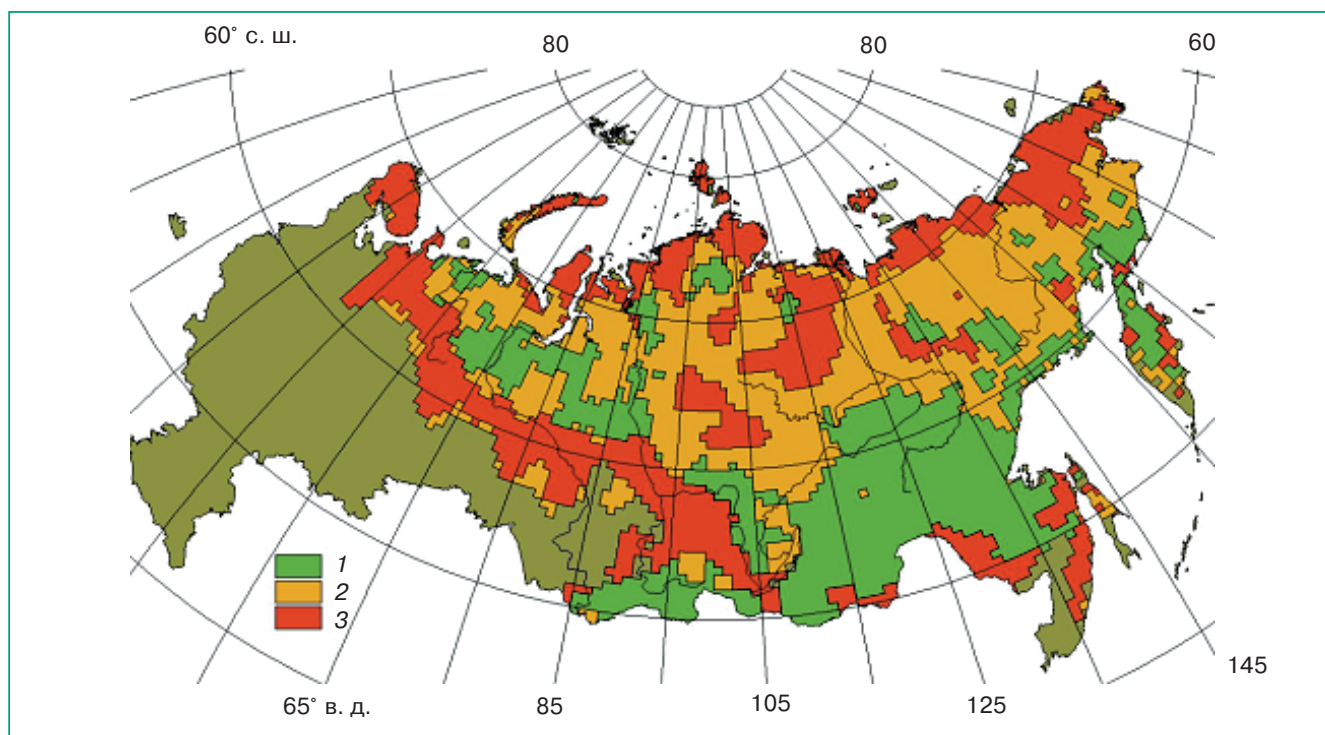
Увеличение межлетних расходов и уровней воды в реках в условиях уменьшения промерзания почвогрунтов будет способствовать повышению уровня грунтовых вод и подтоплению равнинных территорий севера и северо-запада ЕТР и Верхней Волги. Это ускорит деформацию и разрушение фундаментов разного рода зданий и технических сооружений, а также усилит карстовые процессы, что создаст дополнительные риски.

В России проложено около 50 тыс. км нефтепроводов и около 150 тыс. км газопроводов, пересекающих многие сотни и тысячи рек. Усиление процесса размыва русел в условиях меняющегося климата повышает риск более раннего наступления аварийных ситуаций на подводных участках трубопроводов. Места наиболее проблемных подводных переходов трубопроводов расположены в Приволжском федеральном округе в бассейнах Верхней и Средней Волги, на малых и средних реках (области Нижегородская, Оренбургская, Самарская, Саратовская, Ульяновская, Пермский край, республики Башкортостан, Марий Эл, Мордовия, Татарстан, Удмуртия и Чувашия); во всех субъектах Российской Федерации Южного федерального округа; в Тюменской области Уральского федерального округа; в Красноярском крае, в областях Новосибирская, Омская, Томская, Иркутская Сибирского федерального округа; в Хабаровском крае и в Сахалинской области Дальневосточного федерального округа.

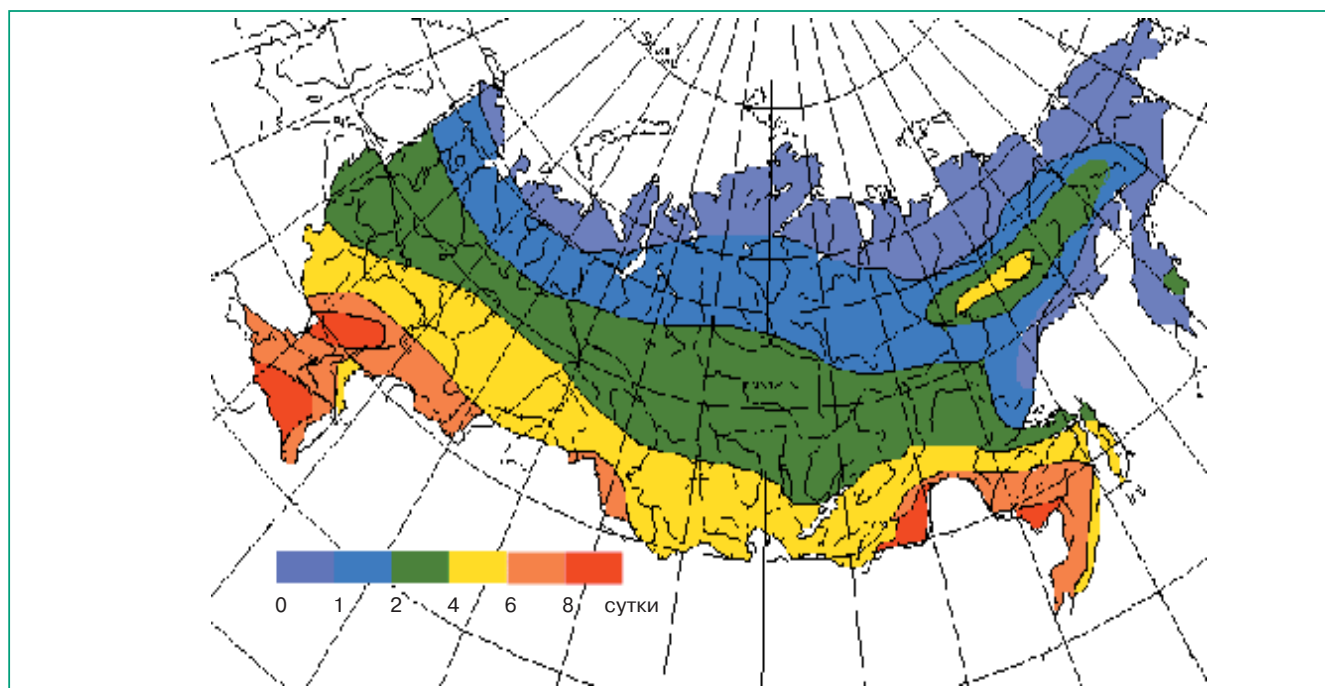
При учащении заморозков и оттепелей увеличится повторяемость гололедицы на дорогах. Прежде всего это относится к большей части территории Северо-Западного, Центрального, Уральского и Приволжского федеральных округов, а также к центральным частям Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. В высоких широтах в начале и конце зимы вследствие потепления может ухудшиться состояние “зимников”, что создаст дополнительные опасности для движения по дорогам.

В XXI веке будет происходить дальнейшее уменьшение прочности и ослабление несущей способности фундаментов из-за деградации многолетнемерзлых грунтов. Их несущая способность будет заметно уменьшаться при увеличении тем-

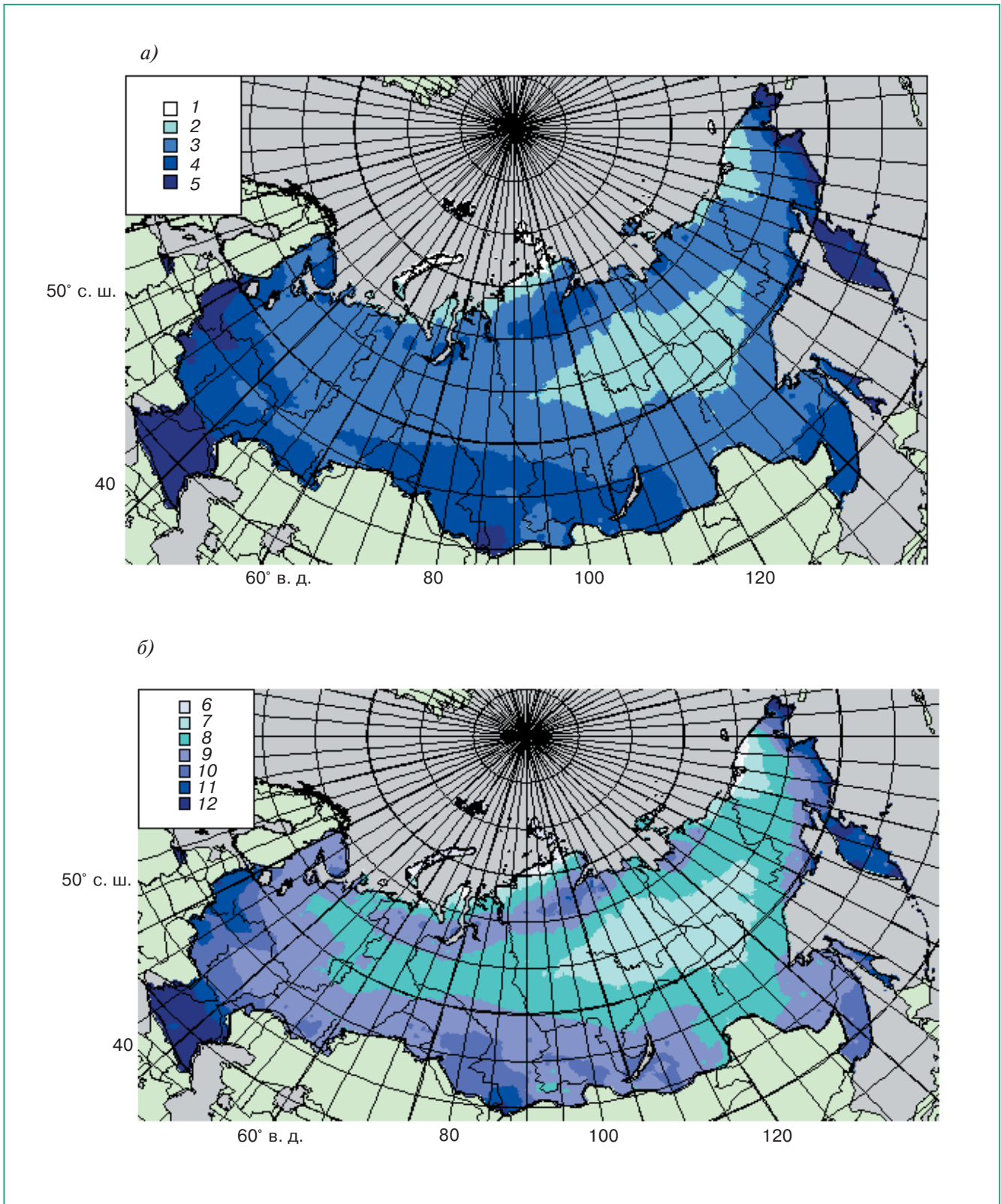




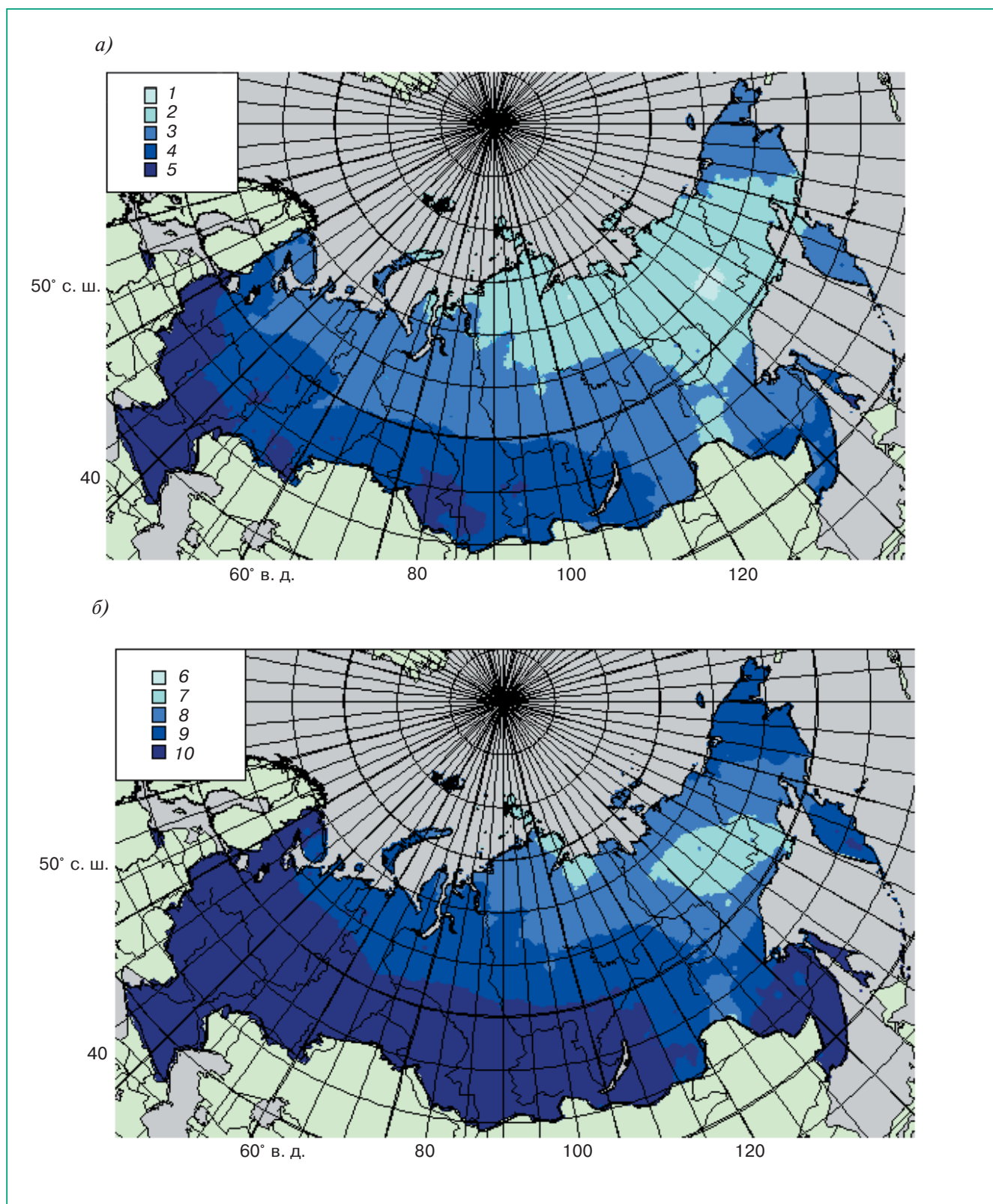
**Рис. ТР11.2.** Перспективная оценка геокриологической опасности, связанной с таянием многолетней мерзлоты, для середины XXI века. 1 — устойчивая область, 2 — зона умеренных рисков, 3 — зона высокой геокриологической опасности.



**Рис. ТР11.3.** Ожидаемое к 2015 г. увеличение максимальной продолжительности (сутки) периодов года с температурой выше 25°C.



**Рис. ТР11.4.** Сокращение продолжительности (%) отопительного периода на территории России к 2025 г. (а) и к 2050 г. (б) по сравнению с нормой 1961–1990 г. 1) 0–1,9; 2) 2–3,9; 3) 4–5,9; 4) 6–7,9; 5) 8–10; 6) 0–3,9; 7) 4–5,9; 8) 6–7,9; 9) 8–9,9; 10) 10–11,9; 11) 12–13,9; 12) 12–14.



**Рис. ТР11.5.** Сокращение индекса потребления (%) топлива на территории России к 2025 г. (а) и к 2050 г. (б) по сравнению с нормой 1961–1990 гг. 1) 4–5,9; 2) 6–7,9; 3) 8–9,9; 4) 10–11,9; 5) 12–14; 6) 6–7,9; 7) 8–9,9; 8) 10–11,9; 9) 12–13; 10) 14–16.



пературы. Перспективная оценка степени этой опасности для территории России в предположении об умеренном антропогенном воздействии на глобальный климат (сценарий В1, климат будущего оценивался с помощью модели GFDL) приведена на рис. TP11.2.

В область наибольших значений индекса гео-криологического риска попадают Чукотка, бассейны верхнего течения Индигирки и Колымы, юго-восточная часть Якутии, значительная часть Западно-Сибирской равнины, побережье Карского моря, Новая Земля, а также часть островной мерзлоты на севере ЕТР. В этих районах имеется развитая инфраструктура, в частности газо- и нефтедобывающие комплексы, система трубопроводов Надым – Пур – Таз на северо-западе Сибири, Билибинская атомная станция и связанные с ней линии электропередач от Черского на Колыме до Певека на побережье Восточно-Сибирского моря.

**Термический режим помещений.** К 2015 г. в России наибольшее повышение температуры холодных суток составит от 0,7–1,2°C на севере страны и до 0,3–0,5°C на юге по отношению к средним значениям за период 1961–1990 гг. В связи с этим продолжительность отопительного периода к 2015 г. уменьшится в среднем на 1–4 суток.

К 2015 г. повышение температуры наиболее жарких суток года и продолжительности периода наиболее высоких температур (рис. TP11.3) приведет к увеличению затрат на кондиционирование помещений, в том числе промышленных предприятий.

Географическое распределение изменений продолжительности отопительного периода для всей территории страны в 2025 и 2050 гг. (рис. TP11.4) было рассчитано в предположении о существенном росте антропогенного воздействия на глобальный климат (сценарий А2). При этом для характеристики климата будущего были синтезированы результаты расчетов нескольких климатических моделей (CGCM2, HadCM3, ECHAM4). На рис. TP11.5 представлены соответствующие изменения потребности в топливе для обогрева помещений.

По сравнению с нормой 1961–1990 гг. на большей части территории России расчетная продолжительность отопительного периода сократится не более чем на 5% к 2025 г. и на 5–10% к середине XXI века. На юге и западе ЕТР, в некоторых северных и дальневосточных районах (например, Камчатка, Чукотка) ожидаемое уменьшение продолжительности отопительного периода в 1,5–2 раза больше, чем в среднем по стране. Ожидаемые относительные изменения (%) затрат на отопление помещений (индекс потребления

топлива) имеют те же пространственные закономерности, но будут приблизительно вдвое больше.

## 12. Водные ресурсы, сельское хозяйство, здоровье населения

### НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

**Водные ресурсы.** Наиболее общей характеристикой водных ресурсов является речной сток. Данные гидрологических наблюдений указывают на заметные изменения речного стока в последние десятилетия XX века по сравнению с базовым периодом 1946–1978 гг.

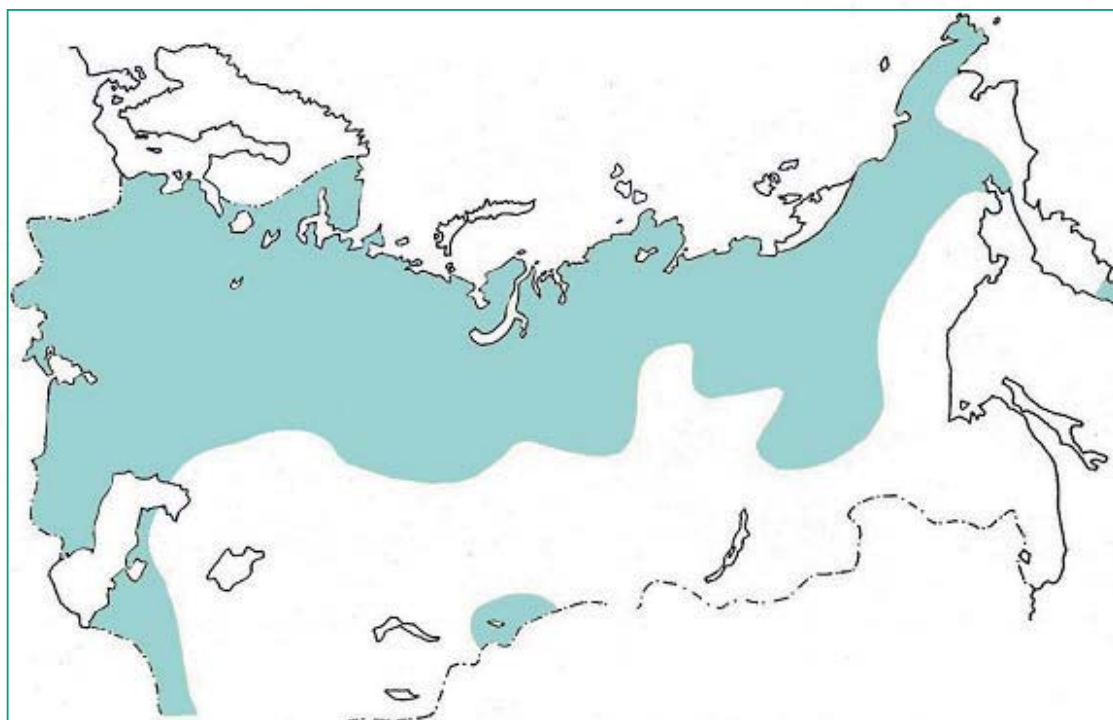
В целом за год в последние 20–25 лет повышенная фаза водности отмечается на большей части рек ЕТР. Самое значительное увеличение годового стока (на 15–40%) имело место в бассейнах рек, расположенных между 56 и 60° с. ш. Рост межженного стока в 1980–1990-х годах обеспечил увеличение водных ресурсов даже в бассейнах рек юго-запада ЕТР, где имело место некоторое уменьшение весеннего половодья.

На АТР в 1978–2000 гг. наиболее значительным (на 20–40%) увеличение стока было на реках, сток которых формируется на восточном склоне Уральских гор, в широтном поясе 56–60° с. ш. (левые притоки Тобола и Иртыша). В последнее десятилетие XX века повышение водности наблюдалось на большей части бассейна Лены; годовой сток реки Вилюй в 1990–2000 гг. превысил норму на 25–30%. Существенное уменьшение годового стока на АТР произошло только в одном регионе — в бассейне Верхней Оби, где оно составило от 5 до 20%. Незначительное уменьшение годового стока (в пределах 5%) отмечается в бассейне Верхнего Енисея. Суммарный годовой сток шести крупнейших рек Евразии, впадающих в Северный Ледовитый океан (Енисей, Обь, Лена, Колыма, Северная Двина, Печора), с 1936 по 2002 г. увеличился.

Увеличение средней годовой температуры воздуха и особенно температуры зимой оказало значительное влияние не только на водность рек России, но и позитивно сказалось на запасах пресной воды, на судоходности и ледовом режиме крупных озер и других внутренних водоемов России.

Увеличение стока рек России можно интерпретировать как следствие некоторого увеличения количества осадков, особенно в высоких широтах, а также уменьшения интенсивности испарения. В 1949–1990 гг. испаряемость практически повсеместно уменьшилась на ЕТР и АТР (рис. TP12.1). Скорость уменьшения испаряемо-





**Рис. ТР12.1.** Тренды испаряемости в 1949–1990 гг. на территории бывшего СССР. Голубым цветом выделена область отрицательных трендов; на остальной части территории тренды положительные или отсутствуют.

сти на Европейской территории России увеличивается с севера к югу и в зоне сухих степей составляет в среднем 50–60 мм за 40 лет.

### *Сельское хозяйство*

#### *Продуктивность сельскохозяйственных культур.*

Изменения агроклиматических показателей в основных сельскохозяйственных регионах страны в 1975–2004 гг. были в целом благоприятны для сельского хозяйства России.

Средняя температура января повышалась с темпом более чем на 1°C за 10 лет на территории Черноземного центра, Поволжья и северо-запада ЕТР. Минимальные скорости повышения температуры в январе отмечены в Западной Сибири. Таким образом, вероятность повреждения сельскохозяйственных культур низкими температурами за последние 30 лет существенно уменьшилась. Повышение средней температуры июля было не столь значительным, но в ряде регионов скорость ее повышения достигала 1°C за 10 лет.

Наблюдалось практически повсеместное уменьшение амплитуды годового хода температуры воздуха, что свидетельствует об уменьшении степени континентальности климата и улучшении

агрометеорологических условий возделывания сельскохозяйственных культур.

Увеличение теплообеспеченности сельскохозяйственных культур (сумма среднесуточных значений температуры воздуха за период с температурой выше 10°C) было максимальным в Прибайкалье — в среднем более чем на 150°C за 10 лет. Уменьшение теплообеспеченности (до –50°C за 10 лет) наблюдалось на востоке и юго-востоке ЕТР, а менее выраженное — на юге Дальнего Востока.

Продолжительность вегетационного периода с температурой воздуха выше 10°C увеличивалась на большей части территории России, за исключением Волго-Вятского района. Продолжительность вегетационного периода сельскохозяйственных культур в Сибири и на Дальнем Востоке увеличивалась на 10–12 суток, однако при этом во многих районах длительность периода без заморозков не изменилась. Напротив, на значительных площадях северо-восточной части Северо-Западного федерального округа, в Центральном и Приволжском федеральных округах отмечено сокращение продолжительности периода без заморозков.

Аридность (сухость) климата на юге и юго-востоке ЕТР за последние 30 лет не повысилась. Это относится прежде всего к территориям Севе-

**Таблица ТР12.1.** Оценка влияния изменений агроклиматических условий на продуктивность зерновых культур по регионам России в 1975–2004 гг.

Регион	Доля в валовых сборах, %	Увлажненность		Теплообеспеченность		Термические условия зимовки		Континентальность климата	
		тренд	оценка	тренд	оценка	тренд	оценка	тренд	оценка
Северо-Кавказский	19,3	↗	+	↗	+	↗	+	↘	+
Поволжский	17,6	↗	+	↔	↔	↗	+	↘	+
Уральский	15,7	↗	+	↘	—	↗	+	↘	+
Западно-Сибирский	13,7	↔	↔	↗	+	↘	—	↔	↔
Центрально-Черноземный	10,6	↘	—	↗	+	↗	+	↘	+
Центральный	10,1	↘	↔	↗	+	↗	+	↘	+
Волго-Вятский	5,7	↗	+	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Восточно-Сибирский	5,3	↘	—	↗	+	↗	+	↔	↔
Дальневосточный	1,2	↘	↔	↗	+	↗	+	↘	+
Северо-Западный	0,6	↘	+	↗	+	↗	+	↘	+

*Примечание.* Характеристика тренда: ↗ — увеличение, ↘ — уменьшение; оценка изменения агроклиматических условий: + — улучшение, — — ухудшение; ↔ — без существенных изменений.

ро-Кавказского, Поволжского и Уральского регионов. В Западной Сибири отмечено уменьшение индекса сухости на западе региона и увеличение на территории Алтайского края. В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке наблюдалось слабое увеличение индекса сухости.

В табл. ТР12.1 приведены качественные оценки влияния изменений агроклиматических условий на продуктивность зерновых культур по регионам России в 1975–2004 гг.

*Северо-Кавказский регион.* Доля этого региона в производстве зерна в России максимальна — около 19%. Основные причины падения урожайности зерновых в отдельные годы — засухи весенне-летнего и осеннего периодов, а также вымерзание озимых. На Северном Кавказе наблюдалось весьма быстрое повышение температуры в январе, которое служит интегральной характеристикой условий зимовки. Так, за последние 30 лет средняя температура января повысилась более чем на 2°C. Сохранности озимых культур способствовало увеличению увлажненности осеннего периода практически на всей территории региона. Влагообеспеченность в регионе увеличилась. Увеличение теп-

лообеспеченности свидетельствует о возможности расширения посевов более теплолюбивых и продуктивных сельскохозяйственных культур.

*Поволжский регион.* Доля этого самого засушливого региона России в валовых сборах зерна около 18%. За последние 30 лет в Поволжье заметного улучшения теплообеспеченности сельскохозяйственных культур не наблюдалось. Зимние температуры повысились, в связи с чем условия зимовки сельскохозяйственных культур улучшились. Влагообеспеченность увеличилась практически повсеместно. Однако на северо-западе региона наблюдается рост засушливости в летний период, что может отрицательно сказаться на урожайности прежде всего яровых культур. Тем не менее фактические значения урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом по региону возросли.

*Уральский регион.* Доля этого региона в производстве зерна составляет около 16%. Как и в Поволжье, сколько-нибудь заметного увеличения теплообеспеченности в сельскохозяйственных районах Урала не наблюдалось. Напротив, на юге региона температура в июле понижалась со средней скоростью до 0,3°C за 10 лет. Аридность

территории заметно снизилась за рассматриваемый период, а влагообеспеченность сельскохозяйственных культур увеличилась. Наблюдалось увеличение сезонных сумм осадков при некотором уменьшении осенних осадков в отдельных районах. Как и в большинстве регионов России, на Урале отмечалось уменьшение континентальности климата.

*Западно-Сибирский регион.* В этом регионе отмечено понижение температуры зимой. Так, температура воздуха в январе на северо-западе понижалась со скоростью  $0,5^{\circ}\text{C}$  за 10 лет, хотя на востоке региона наблюдалось ее повышение. Теплообеспеченность растений увеличивалась повсеместно, хотя напряженность термического режима, оцениваемая величиной июльской температуры, уменьшалась в отдельных районах на границе с Казахстаном со скоростью до  $0,3^{\circ}\text{C}$  за 10 лет.

Урожайность зерновых уменьшалась на западе региона (Курганская и Челябинская области) и в Алтайском крае. На остальной — большей части территории региона — отмечено увеличение урожайности зерновых культур.

*Центрально-Черноземный регион.* В этом регионе с относительно большой повторяемостью засух и максимальным для сельскохозяйственных районов России повышением температуры воздуха в июле (более  $1^{\circ}\text{C}$  за 10 лет в среднем по региону) прослеживалась тенденция к уменьшению увлажнения. Это может сказаться отрицательно на продуктивности зерновых культур. Однако улучшение условий увлажнения осеннего периода в результате роста осадков и уменьшение вероятности повреждения озимых культур в результате вымерзания в какой-то мере смягчают отрицательные последствия увеличения аридности климата.

*Центральный и Волго-Вятский районы.* Суммарный вклад этих регионов в валовой сбор зерна в России составляет 15–16%. Это достаточно увлажненная зона нечерноземных почв. Наблюдаемое быстрое увеличение теплообеспеченности сельскохозяйственных культур в Центральном и менее значимое в Волго-Вятском регионе способствуют росту сельскохозяйственного потенциала. Некоторое уменьшение увлажнения в Центральном экономическом районе не должно существенно сказаться на урожайности зерновых культур (за исключением аномально засушливых лет). Наблюдаемое увеличение продолжительности вегетационного периода способствует улучшению условий проведения полевых работ.

*Восточно-Сибирский регион.* Доля этого региона в производстве зерна — около 5%. Здесь наблюдается самое быстрое в России (за исключением Калининградской области) увеличение теплообеспеченности сельскохозяйственных культур — в среднем на  $0,94^{\circ}\text{C}$  за 10 лет, что сопровождается

значительным увеличением температуры в июле — порядка  $0,6^{\circ}\text{C}$  за 10 лет на большей части региона. Повышение температуры и уменьшение увлажненности летнего периода ведут к падению урожайности яровых зерновых культур.

*Дальневосточный регион.* Положительным фактором развития сельского хозяйства этого региона является наблюдаемое увеличение теплообеспеченности сельскохозяйственных культур (на  $0,5\text{--}1,0^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) на значительной территории с развитым сельским хозяйством. Отметим, что это не сопровождается заметным повышением температуры в июле. Увеличение аридности не ведет к снижению продуктивности сельского хозяйства из-за большой исходной увлажненности территории.

*Северо-Западный регион.* Этот регион относится к зоне наибольшей скорости увеличения теплообеспеченности и повышения температуры в июле. При достаточной или даже избыточной влагообеспеченности территории наблюдаемое увеличение индекса сухости, а также уменьшение увлажнения следует рассматривать как положительный фактор для сельскохозяйственного производства. Увеличение теплообеспеченности и удлинение вегетационного периода существенно расширяют возможности для развития сельского хозяйства западноевропейского типа.

Таким образом, наблюдаемые в 1975–2004 гг. изменения климата были благоприятными для сельскохозяйственного производства в регионах России, обеспечивающих производство около 85% товарного зерна. Положительные тренды урожайности зерновых и зернобобовых культур в 70% субъектов Российской Федерации это подтверждают.

**Насекомые — вредители сельскохозяйственных культур.** Ущерб, наносимый насекомыми — вредителями сельскохозяйственных растений, значителен. Многие из них, в том числе саранчовые и колорадский жук, существенно зависимы от климата. При изменении климата возможны изменения ареалов видов и численности организмов, что влияет на размер ущерба.

Массовое размножение саранчовых — опасных вредителей сельскохозяйственных растений — в России в последнее десятилетие XX века приобрело значительные масштабы (в 1999 г. наблюдалось на 1 млн. га) и фактически охватило все степные районы юга России. Начиная с конца 1980-х — начала 1990-х годов массовое размножение саранчовых наблюдалось в Среднем и Нижнем Поволжье (Саратовская, Астраханская, Волгоградская области), в Калмыкии, на Северном Кавказе и прилегающих к нему территориях. С 1997 г. нашествию саранчовых подверглись 16 субъектов Российской Федерации. Массовые очаги появились в Ростовской, Оренбургской

областях, в Краснодарском крае, на юге Сибири. При этом общая сумма прямых затрат на борьбу с саранчовыми только в Ставропольском крае за год — около 2,8 млрд. руб.

Колорадский жук — вредитель картофеля и некоторых других, важных в продовольственном отношении пасленовых культур. Ежегодно в России он снижает урожай картофеля на 1/3. Во второй половине 1960-х годов колорадский жук появился в западных районах Брянской и Смоленской областей и в течение последующих 10 лет расселился на территории всех картофелеводческих районов. Вся территория России к югу от Псковской, Тверской, Ивановской областей, а также Татарстана стала зоной его массового размножения. К концу XX века ареал колорадского жука расширился и в восточном направлении. В него вошли Челябинская и Оренбургская области, сразу ставшие зонами массового размножения вредителя, а также Омская и Новосибирская области и частично Алтайский край. Колорадский жук на территории России приблизился к климатически обусловленным границам своего ареала, который, однако, имеет тенденцию к расширению в результате потепления климата.

**Здоровье населения.** Прямое воздействие изменения климата на здоровье населения связано в основном с усилением экстремальности климата — увеличением числа дней с экстремально высокой или (и) низкой температурой, частоты и интенсивности наводнений, штормов, тайфунов и т. д. Косвенное воздействие связано в основном с уменьшением объемов доступной доброкачественной питьевой воды, увеличением частоты повышенных уровней загрязнения воздуха при неблагоприятных метеорологических условиях и изменением ареалов инфекционных климатозависимых болезней человека. Потепление также сказывается (часто — негативно) на традиционном укладе жизни и здоровье коренных народов Арктического региона.

**Волны тепла и холода.** Устойчивая, продолжительная жаркая погода (волна тепла) вызывает увеличение смертности и заболеваемости сердечно-сосудистыми заболеваниями. К группам наибольшего риска относятся дети младшего возраста, люди преклонного возраста, лица, профессиональная деятельность которых связана с пребыванием на открытом воздухе, и лица с низким уровнем доходов, для которых адаптационные возможности (например, использование кондиционеров) малодоступны. В крупных городах группой риска являются также люди, живущие или работающие в «островах тепла». Волна тепла, наблюдавшаяся в Париже в 2003 г., привела к заметному повышению заболеваемости и смертности.

Исследования, проведенные в Твери, показали, что при увеличении максимальной температуры суток в летний период на 10°C по сравнению с климатической нормой число обращений за экстренной медицинской помощью и смертность от отдельных причин увеличиваются на 100%, а общая смертность — на 8%.

В июле 2001 г. Москва пережила необычайно продолжительную волну тепла, во время которой среднесуточная температура превышала 25°C в течение 9 последовательных суток (при средней многолетней норме 3 суток). В максимуме этой волны (23 июля 2001 г.) суточная смертность достигла рекордно высокого значения — она превысила среднее многолетнее значение смертности для июля на 93%.

Воздействие экстремально высокой температуры часто усугубляется загрязнением атмосферного воздуха вследствие неблагоприятных метеорологических условий.

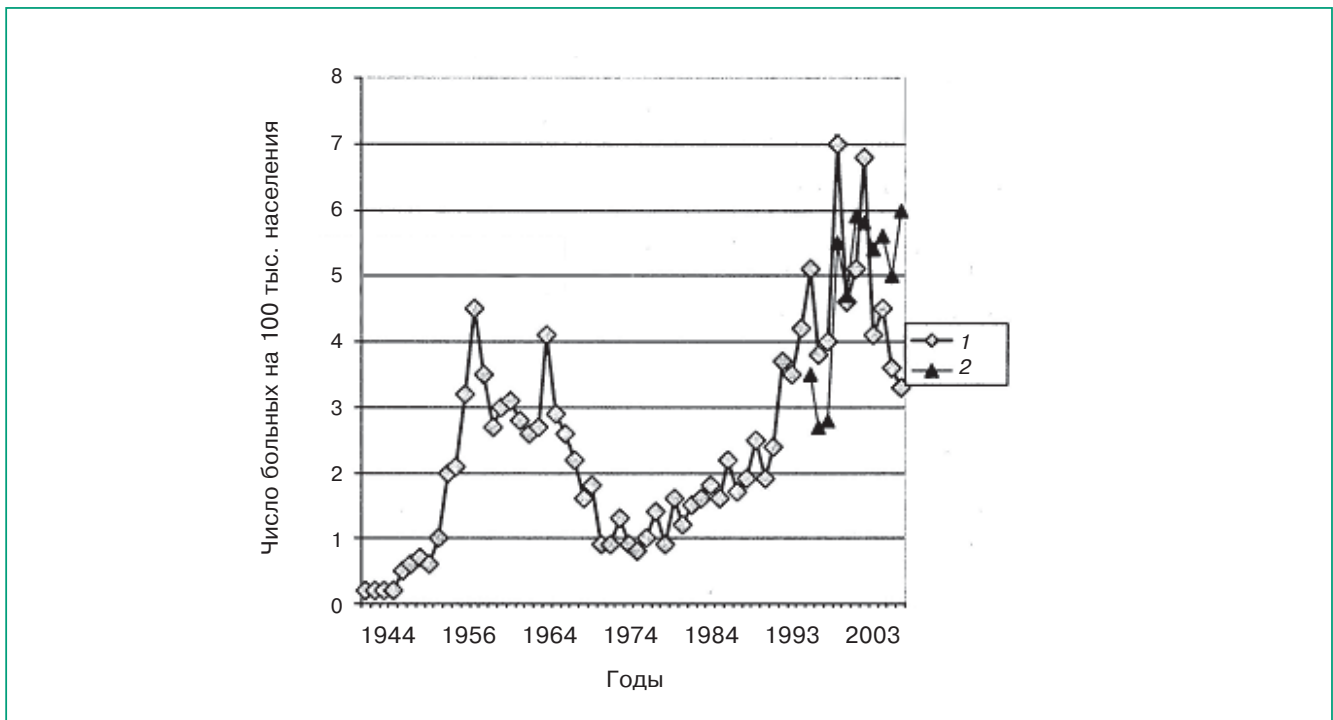
Устойчивая, продолжительная холодная погода (волна холода) наблюдалась в Москве в январе — феврале 2006 г., когда экстремально низкая температура наблюдалась в течение 26 дней. Периоды дополнительной смертности прослеживались после волны холода с запаздыванием на 4–5 суток и особенно сказались на возрастной группе пожилых людей старше 75 лет.

**Инфекционные и паразитарные болезни.** Эти болезни человека и животных, в том числе трансмиссивные (т. е. передаваемые посредством переносчиков — комаров, блох, клещей и других), распространены практически повсеместно. Изменение климата приводит к изменению условий их распространения.

К концу XX века заболеваемость *иксодовым клещевым боррелиозом* (ИКБ, наиболее распространенная природно-очаговая трансмиссивная инфекция в России), а также *клещевым энцефалитом* (КЭ) существенно повысилась (рис. TP12.2). Увеличение заболеваемости происходит в основном в Волго-Вятском, Уральском и Западно-Сибирском регионах (ИКБ) и регионах Урала и Сибири (КЭ). Наблюдается расширение ареала этих заболеваний. Кроме увеличения времени пребывания населения в местообитаниях клеща — лесах, дачных участках и т. д., одной из ведущих причин увеличения заболеваемости населения иксодовым клещевым боррелиозом и клещевым энцефалитом является изменение климата — он становится более мягким по температурному режиму и более влажным. Это способствует расширению ареалов и повышению численности переносчиков.

Растет также и заболеваемость другими инфекциями, обусловленная ростом численности переносчиков. Например, увеличение температуры, количества осадков и высоты снежного по-





**Рис. TP12.2.** Заболеваемость (число больных на 100 тыс. населения) клещевым энцефалитом (1) и иксодовым клещевым боррелиозом (2) в России в 1944–2003 гг.

кровя способствовало увеличению численности рыжей полевки — основного резервуара вирусов — возбудителей *геморрагической лихорадки с почечным синдромом*. С середины 1980-х годов это заболевание стало чаще регистрироваться, и к началу XXI века число заболевших возросло более чем в 3 раза. Около 80% зарегистрированных случаев этого заболевания на ЕТР приходится на расположенные в Приуралье и Среднем Поволжье республики Башкортостан, Удмуртия, Татарстан, Марий Эл, Чувашия, а также Самарскую, Ульяновскую, Пензенскую области. Показатель заболеваемости по этим регионам превышает 10 случаев на 100 тыс. населения, тогда как в среднем по России — 4,0. Особенно высока заболеваемость в Башкортостане и Удмуртии — за последние 25 лет показатели заболеваемости составили 53,8 и 40,0 случаев соответственно.

Существенный рост заболеваемости *крымской геморрагической лихорадкой* отмечен с 2000 г. в Калмыкии и Волгоградской области, а в Дагестане — с 2001 г. Одна из причин — потепление климата, вследствие чего ареал клеща — переносчика этой инфекции — расширился к северу, возросла его численность.

В 1999 г. в Волгоградской и Астраханской областях возникла эпидемическая вспышка *лихорадки Западного Нила*, в результате которой были гос-

питализированы почти 500 человек. Этот год был одним из наиболее теплых за более чем 160 лет наблюдений, с чем и связывается аномальный рост заболеваемости. В последующие годы это заболевание продвинулось дальше на север и достигло Новосибирской области.

Изменение климата в России в 1966–1995 гг. по сравнению с 1936–1965 гг. было таково, что климатообусловленный риск распространения *малярии человека* повсеместно уменьшился на густонаселенной части страны, но увеличение произошло в субрегиональном масштабе в Средней Сибири. Таким образом, наблюдаемое изменение климатических условий на территории России в конце XX века по сравнению с его серединой в целом по стране не привело к ухудшению эпидемиологической ситуации по малярии. Тем не менее в отдельных регионах сложились условия, способствующие накоплению числа источников инфекции в течение эпидемиологического сезона и росту передачи малярии.

#### ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

При продолжении и усилении антропогенного воздействия на глобальный климат в России в XXI веке будут меняться условия обеспеченности возобновляемыми ресурсами. Это касается в том

числе водных ресурсов и продукции сельского хозяйства. Изменится нагрузка климатических факторов на здоровье населения.

**Водные ресурсы.** В предположении о значительном усилении антропогенного воздействия на глобальный климат (сценарий А2, климат будущего рассчитывался с помощью модели HadCM3) в 2010–2039 гг. произойдут заметные изменения водных ресурсов.

На ЕТР наибольшее увеличение стока ожидается на Волге и Урале (9–10%), а также на северных реках (4–8%). Уменьшение (не более 3%) ожидается на реках бассейна Азовского моря. Пики половодья повсеместно сместятся с мая на апрель.

На АТР годовой сток рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, увеличится на 3–11%. Наибольшее относительное увеличение стока ожидается на Лене и Индигирке, а наименьшее — на Оби; в среднем по Сибири — на 7%. В Восточной Сибири увеличится сток весеннего половодья. Для рек степной и лесостепной частей бассейна Оби будет типично более раннее начало весеннего половодья.

Возобновляемые водные ресурсы увеличатся в целом по стране на 8–10%. При этом водообеспеченность в расчете на одного жителя увеличится на большей части территории в среднем на 12–14%. Однако в ряде густонаселенных регионов — на территориях черноземных областей Центрального и Южного федеральных округов, а также на юго-западной части Сибирского федерального округа, которые и в современных условиях имеют довольно ограниченные водные ресурсы, — следует ожидать уменьшения водных ресурсов на 5–15% и увеличения нагрузки на них на 5–25% в результате изменений климата и увеличения водопотребления. Практически повсеместно произойдет увеличение зимнего стока рек.

Ожидаемые изменения климата приведут к изменению условий хозяйственной деятельности на реках. Изменится приток воды в водохранилища и его сезонное распределение. Возможно сокращение периода ледостава на 15–27 суток, при

этом максимальная толщина льда уменьшится на 20–40%; произойдут значительные изменения в процессах замерзания и вскрытия рек и водоемов. Это будет способствовать увеличению периода навигации, но при этом сокращается период доставки грузов в труднодоступные районы по зимним автомобильным трассам, проложенным по замерзшим руслам больших рек (важно для Сибирского и Дальневосточного ФО, особенно для Республики Саха (Якутия) и Магаданской области).

**Сельское хозяйство.** Потепление климата на территории России может сопровождаться принципиально разными тенденциями изменений режима осадков — уменьшением увлажнения (аридное потепление) или же увеличением увлажнения (гумидное потепление). Ожидаемые параметры таких изменений в XXI веке представлены в табл. TP12.2. Параметры аридного потепления рассчитаны в рамках сценария существенного антропогенного воздействия на глобальный климат А1FI. Климат будущего при аридном потеплении рассчитывался с помощью модели HadCM3. Параметры гумидного потепления рассчитаны с помощью региональной климатической модели ГГО в рамках сценария умеренного антропогенного воздействия на глобальный климат В2.

В табл. TP12.3 представлены ожидаемые изменения урожайности сельскохозяйственных культур для первой половины XXI века при аридном потеплении.

Аридное потепление неблагоприятно для производства сельскохозяйственной продукции — урожайность зерновых и кормовых культур будет уменьшаться практически на всей территории степной и лесостепной зоны страны (при неизменных прочих, неклиматических условиях земледелия).

При гумидном потеплении следует ожидать роста урожайности, по крайней мере до середины XXI века. В дальнейшем под влиянием изменения климата урожайность зерновых в Черноземной зоне будет ниже современного уровня на 10–13%, а в Нечерноземной зоне превысит современную

**Таблица TP12.2.** Возможные изменения термических параметров климата на территории России при аридном и гумидном потеплении

Климатический сценарий	Изменения параметров климата			
	Средняя температура воздуха, °С		Сумма среднесуточных температур выше 10°С	Продолжительность периода с температурой воздуха выше 10°С, сутки
	июль	январь		
Аридный	5,1	5,2	1094	34
Гумидный	1,3	4,8	266	13

**Таблица ТР12.3.** Ожидаемые изменения урожайности сельскохозяйственных культур (%) в первую половину XXI века при аридном потеплении

Регион	Зерновые культуры					Кормовые культуры				
	Годы									
	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050
Северный	4,8	7,1	6,6	6,3	9,1	5,6	6,0	14,5	18,4	17,9
Северо-Западный	4,0	7,9	8,2	10,5	9,2	8,1	13,3	17,4	21,6	22,9
Центральный	-1,9	-0,8	0,2	-1,3	-6,7	1,0	3,4	5,0	4,6	-0,7
Волго-Вятский	-5,6	-6,8	-5,2	-8,2	-13,0	0,9	2,8	4,1	3,2	-0,9
Черноземный центр	-6,9	-14,1	-19,1	-26,9	-34,0	-7,2	-7,5	-12,4	-19,3	-24,9
Поволжье, север	-12,9	-13,3	-13,9	-27,4	-40,0	-1,5	-2,6	-4,1	-9,6	-22,9
Поволжье, юг	-3,0	-1,3	2,2	1,0	3,1	-8,0	-8,7	-9,0	-11,5	-12,5
Северо-Кавказский	-22,1	-23,8	-26,4	-25,9	-19,0	-12,7	-14,4	-17,1	-21,3	-24,9
Уральский	-14,2	-15,9	-19,0	-26,4	-32,0	-1,5	-0,4	0,5	-1,5	-10,1
<b>ЕТР</b>	<b>-8,1</b>	<b>-8,6</b>	<b>-9,3</b>	<b>-13,2</b>	<b>-17,0</b>	<b>-2,0</b>	<b>-1,0</b>	<b>-0,4</b>	<b>-2,1</b>	<b>-7,4</b>

на 11–29%. На юге Сибири урожайность зерновых культур будет меньше современной на 20–25%.

При потеплении, соответствующем содержанию парниковых газов в атмосфере около 550 млн<sup>-1</sup> в СО<sub>2</sub>-эквиваленте (удвоенная доиндустриальная концентрация СО<sub>2</sub>), площадь земледельческой зоны России увеличится на 4,7–4,8 млн. км<sup>2</sup>, т. е. примерно в 1,5 раза. В условиях потепления создадутся условия для изменения районирования сельскохозяйственных культур. Так, площадь земель, где могут вызревать ранние сорта кукурузы, увеличится в несколько раз. На территории России расширится зона (до 1 млн. км<sup>2</sup>), благоприятная для развития субтропического земледелия.

Уже к 2010 г. граница выращивания средне-спелых сортов кукурузы на зерно и позднеспелых сортов подсолнечника продвинется к северу до линии Москва — Владимир — Йошкар-Ола — Челябинск. Окажется возможным расширение посевов сахарной свеклы до линии Иваново — Ижевск — Курган. Для использования благоприятных изменений климата, для повышения урожайности сельскохозяйственных культур необходима замена возделываемых культур и (или) сортов на более позднеспелые и продуктивные, а также расширение посевов вторых (пожнивных) культур.

При дальнейшем потеплении в России может увеличиться неблагоприятное воздействие насекомых — вредителей сельскохозяйственных культур на валовые сборы продукции растениеводства (эта тенденция наметилась в конце XX — начале XXI века). Многие из этих организмов существенно зависят от климата, при потеплении может возрасти их численность и расширится ареал.

Ожидаемые изменения климата создадут предпосылки для дальнейшего распространения саранчовых в Ставропольском крае, Калмыкии, Волгоградской, Астраханской, Саратовской и Ростовской областях, а также в некоторых южных регионах Сибири.

Вследствие изменения климата к 2025 г. можно ожидать дальнейшего продвижения границы ареала колорадского жука на север. Однако существенного значения для производства картофеля в стране в целом это иметь не будет, если современные границы зоны возделывания картофеля существенно не изменятся.

**Здоровье населения.** Ожидается, что в XXI веке волны тепла — периоды экстремально высоких значений температуры — будут наблюдаться чаще, а значения температуры будут повышаться. Это увеличит риск для здоровья некоторых групп населения. В них входят дети младшего возраста, люди пенсионного возраста, лица, профессиональная деятельность которых связана с пребыванием на открытом воздухе, а также проживающие в городских условиях, где плотная многоэтажная застройка и недостаточность зеленых насаждений способствуют установлению особенно высокой температуры в жаркую погоду (“острова тепла”). Сочетание волн тепла с повышенным загрязнением атмосферного воздуха из-за неблагоприятных метеорологических условий может стать дополнительным источником риска.

В результате изменения гидрологического цикла проблемы обеспечения населения водой могут обостриться. В дальнейшем возможно ухудшение ситуации и с качеством воды, особенно в Калмыкии, Дагестане, Карачаево-Черкесии.

Ожидается, что потепление климата скажется на состоянии природных очагов облигатно-трансмиссивных инфекций с неисключительно трансмиссивным путем передачи (чума), факультативно-трансмиссивных инфекций (туляремия) и несколько более — нетрансмиссивных инфекций (лептоспирозы, сальмонеллез). Еще в большей степени потепление повлияет на возбудителей сапронозов, естественных сочленов почвенных (псевдотуберкулез, листериоз) и водных (легионеллез, холера, мелиоидоз) экосистем.

Северная граница потенциального (определяемого температурой) ареала малярии человека в условиях потепления в долгосрочном плане сдвинется к северу. В то же время в среднесрочной перспективе движение границы может быть сложным — сдвиг к северу в одних регионах и к югу в других. В рамках инерционного сценария изменения климата до 2025 г. общая эпидемиологическая ситуация по малярии в России не ухудшится, а на густонаселенной ЕТР — улучшится.

На побережье Черного моря возможно укоренение комаров, являющихся переносчиками желтой лихорадки и лихорадки денге. Вероятно возникновение природных очагов и клинических случаев лихорадки Западного Нила в Саратовской, Самарской, Оренбургской, Воронежской, Курской, Белгородской, Омской и Новосибирской областях, Алтайском крае. Смещение границ ареалов иксодовых клещей к северо-востоку будет способствовать росту заболеваемости клещевым энцефалитом, боррелиозами и риккетсиозами. Для большинства членистоногих переносчиков болезней человека ожидается расширение периода активности, т. е. более ранний выход из зимовки весной и более поздний уход в диапаузу осенью.

### 13. Последствия экстремальных метеорологических явлений

#### НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Ущерб, наносимый экстремальными гидрометеорологическими явлениями, по оценкам ООН, составляет 70% суммарного ущерба от воздействия природных катастроф и стихийных бедствий. В России отмечается более 30 видов таких опасных явлений. Их общее число за 1991–2005 гг. увеличилось как во всем мире, так и в России (рис. ТР13.1). Из них 52% наблюдались на ЕТР и 48% на АТР.

К широкомасштабным последствиям экстремальных метеорологических явлений относятся засухи, лесные пожары и наводнения. В горной местности особую опасность представляют сели и лавины.

**Засухи.** Характерны для многих зернопроизводящих регионов страны, существенно снижают

урожаем сельскохозяйственных культур. Повышенная частота (более 40–60% лет за период 1951–1985 гг.) сильной и очень сильной почвенных засух на землях под озимыми зерновыми культурами наблюдается на территории Южного и Приволжского федеральных округов. В последнее тридцатилетие XX века — начале XXI века обширные общие засухи отмечались в 1972, 1975, 1979, 1981, 1995, 1998 и 2002 гг.

Засухи 1975 и 1981 гг. охватили все зернопроизводящие районы страны и не имели аналогов с 1891 г. Валовой сбор зерна в целом по стране был на 20 и 23% меньше среднего сбора соответственно.

Однако долговременных — за 1881–2000 гг. — тенденций изменения частоты и интенсивности атмосферных засух (являющихся предшественниками почвенных засух) на территории России в целом не обнаружено. В разных регионах России наблюдались значительные колебания влагообеспеченности, чередование периодов ее увеличения и уменьшения.

**Лесные пожары.** Леса занимают значительную часть территории России — около 45%. Они играют заметную роль в сохранении биоразнообразия, как накопители углерода и поставщики кислорода, а также как источник биоресурсов.

При установившейся на длительное время сухой и жаркой погоде возрастает риск лесного пожара. В 1994–2003 гг. в России пожарами было уничтожено 3,1 млн. га лесных насаждений, или 80% погибших от всех причин древостоев. В 2004 г. по вине населения возникло 71,2% пожаров, от сельскохозяйственных палов — 12,1%, от грозных разрядов — 8,4% и других причин — 8%. Прямые потери от лесных пожаров (стоимость сгоревших и поврежденных древостоев, лесной продукции и др.) в 2004 г. составили почти 20 млрд. руб. В целом по России в 1985–2004 гг. выявлена общая тенденция увеличения числа учетных лесных пожаров (рис. ТР13.2).

Расчетные оценки горимости леса, выполненные для периода 1971–2004 гг. исходя из данных гидрометеорологических наблюдений (рис. ТР13.3), характеризуют региональные особенности изменения пожароопасности. Существенное повышение пожароопасности лесов в России произошло в 1971–2004 гг. на обширных территориях, в том числе там, где имеются леса, представляющие ценность как источник биоресурсов и резервуар биоразнообразия.

**Наводнения.** На реках России опасные наводнения могут быть вызваны прохождением высокой волны уровня воды при максимальных расходах весеннего, весенне-летнего или летнего половодья, дождевых или снегодождевых паводках редкой повторяемости, заторах льда, совокупным



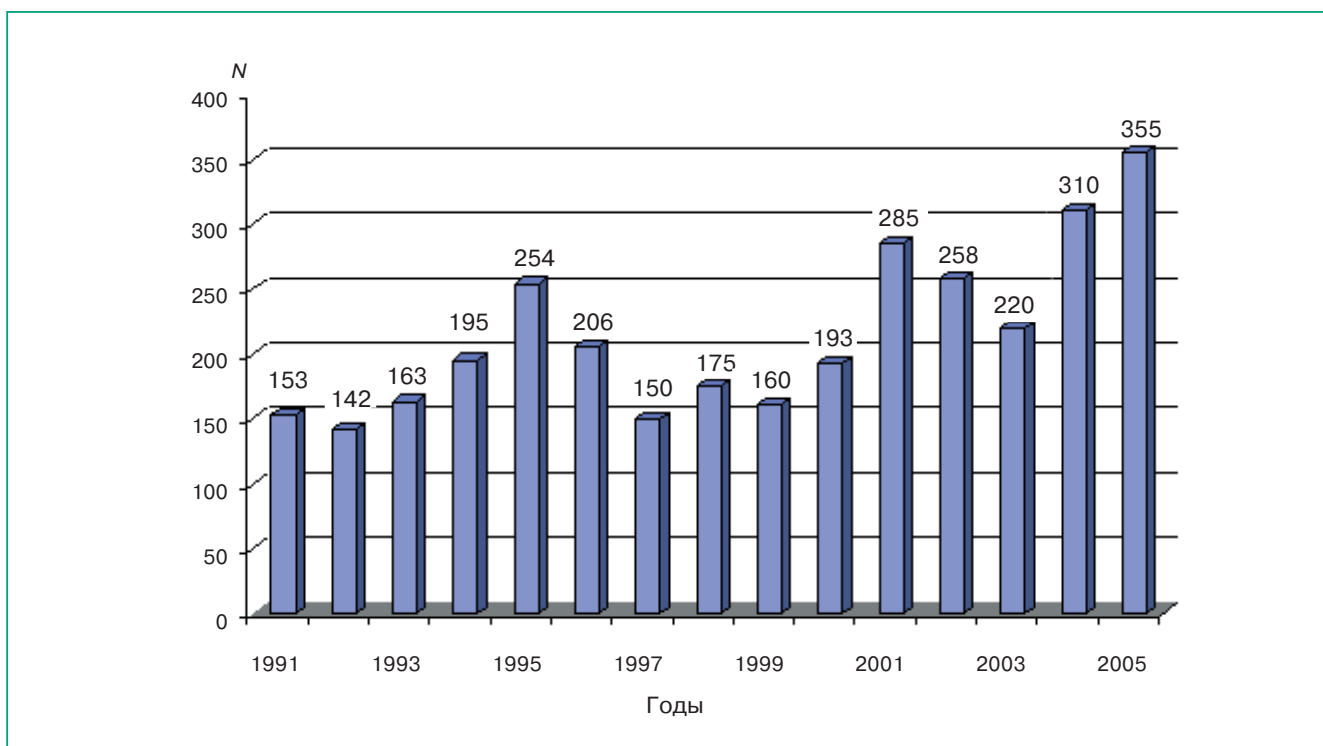


Рис. ТР13.1. Общее число  $N$  опасных гидрометеорологических явлений в 1991–2005 гг. в России.

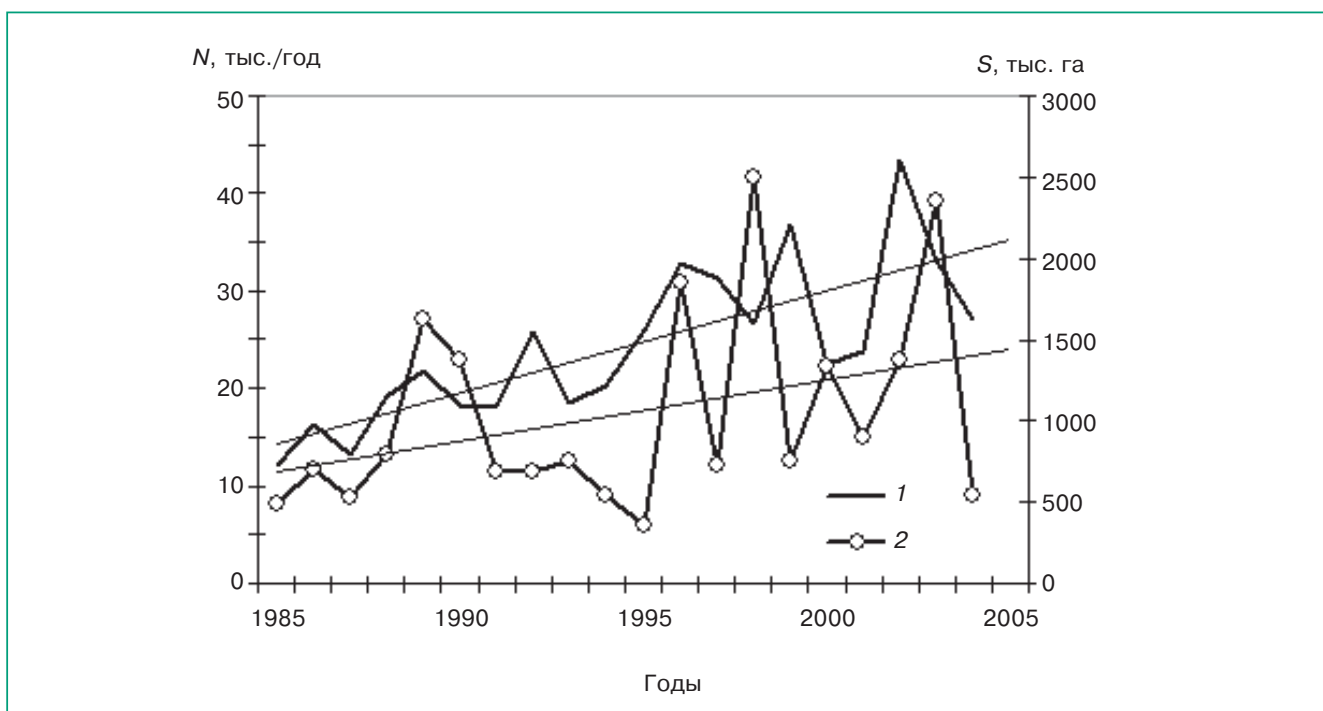
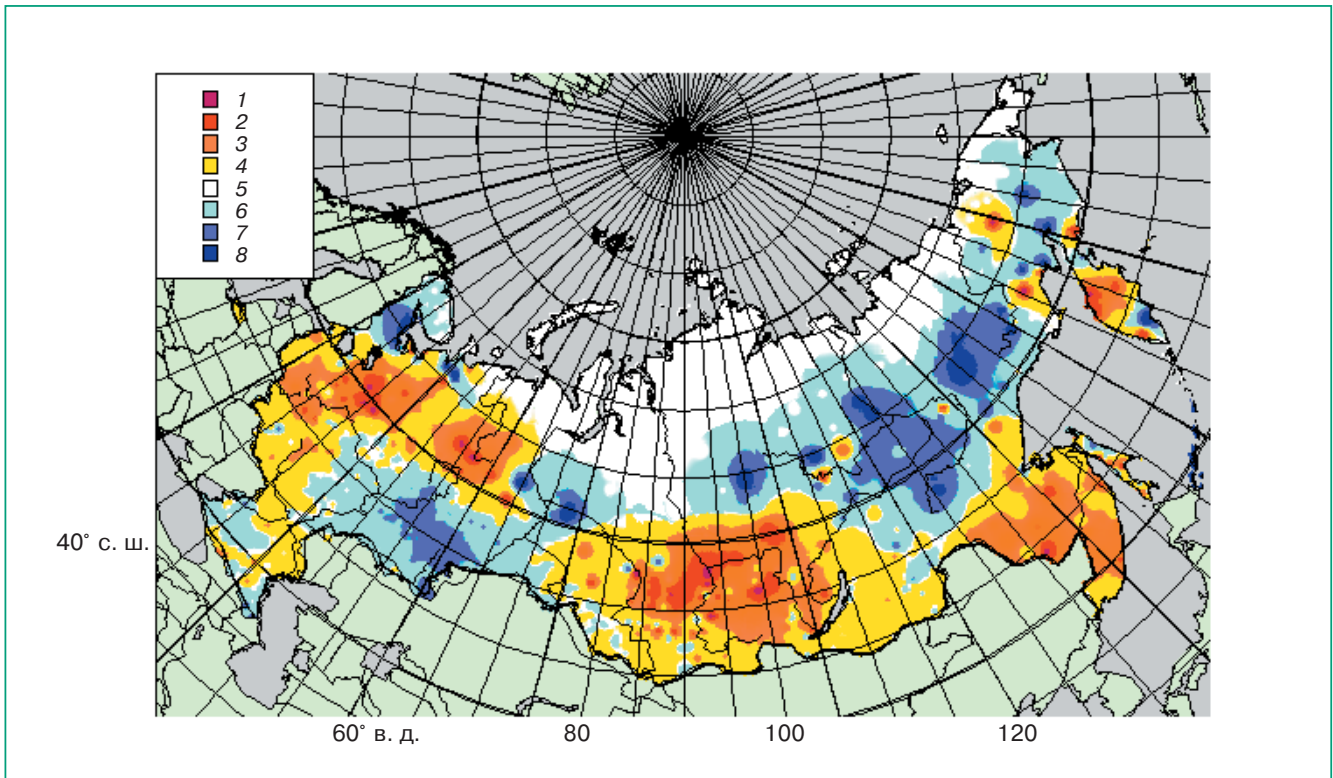


Рис. ТР13.2. Число лесных пожаров  $N$  (1) и лесная площадь  $S$  (2), пройденная пожарами, в 1985–2005 гг.; прямые линии — линейные тренды.



**Рис. TP13.3.** Изменение числа суток (%) в календарном году с высокой пожароопасностью на территории России за 1971–2004 гг. 1) 75–100; 2) 50–74; 3) 25–49; 4) 1–24; 5) 0; 6) –1...–24; 7) –25...–49; 8) –50...–75.

действием этих факторов, а на морских побережьях и в устьях рек — нагонами воды при ветрах, дующих с моря, тайфунах и цунами.

В последние десятилетия XX и в начале XXI века на большей части территории России наблюдалось увеличение максимальных расходов воды рек в периоды половодья. В 2001–2005 гг. во многих экономических районах России повторяемость высоких и катастрофических наводнений увеличилась на 15% по сравнению с последним десятилетием прошлого века. Это увеличение было наиболее существенным на реках юга Дальнего Востока (Приморье), горных реках Северного Кавказа, реках юга Западной Сибири, бассейнах Лены и Енисея, в несколько меньшей степени — на реках севера ЕТР. Наличие данных долговременных наблюдений за нагонными наводнениями в устье р. Нева свидетельствует об их наиболее интенсивном увеличении в конце прошлого столетия в Санкт-Петербурге (рис. TP13.4).

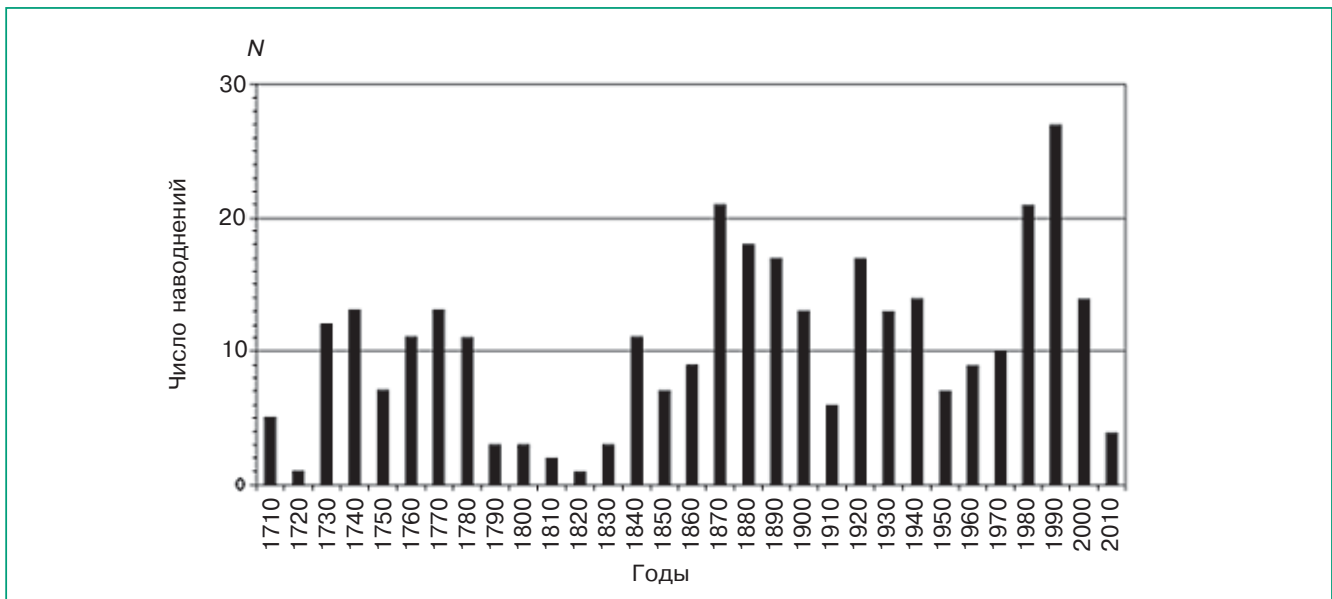
**Сели и лавины.** Опасные проявления селевой и лавинной активности наблюдались в XX веке на Большом Кавказе. Во все сезоны календарного года количество осадков увеличилось, причем как в целом за год, так и за теплый и холодный периоды. Наиболее значительное увеличение количе-

ства атмосферных осадков произошло в конце XX века в высокогорной зоне. Это способствовало увеличению повторяемости селей и лавин.

Селевые потоки повсеместно отмечались на северном склоне Большого Кавказа. Здесь насчитывается более 1700 селевых бассейнов общей площадью около 7000 км<sup>2</sup>. Преобладают дождевые сели — 84%, а гляциально-дождевые составляют 10%. В 1983–2003 гг. наблюдалось усиление селевой активности. Зарегистрировано прохождение около 680 селевых потоков.

Лавинной опасности на Большом Кавказе подвергаются 45 участков автомобильных дорог общей протяженностью более 1000 км. Лавины угрожают 36 населенным пунктам и 25 спортивно-оздоровительным объектам. Лавинной опасности подвержены дороги, населенные пункты и другие объекты, расположенные в одном крае и шести республиках.

В регионе сосредоточено более 8000 лавинных очагов. В течение лавиноопасного периода года сходит более 400 снежных лавин. Максимальные объемы зарегистрированных лавин варьируют от 900 тыс. м<sup>3</sup> (район реки Малый Зеленчук) до 1500 м<sup>3</sup> (район реки Теберда). В целом преобладают лавины с объемом менее 10 тыс. м<sup>3</sup>; они составля-



**Рис. TP13.4.** Распределение числа  $N$  наводнений в Санкт-Петербурге за 1703–2002 гг. по десятилетиям; данные за последнее незавершившееся десятилетие 2001–2010 гг. неполны.

ют около 70%, а лавины с объемом до 100 тыс. м<sup>3</sup> составляют 28%. На лавины с объемом более 100 тыс. м<sup>3</sup> приходится около 2%. Продолжительность лавиноопасного периода, число очагов, объем и повторяемость схода лавин по территории распространены неравномерно. Однако определенной тенденции в изменении частоты лавин не наблюдалось.

#### ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Дальнейшее потепление и изменения других параметров климата в долгосрочном плане могут привести к усилению неблагоприятных широкомасштабных последствий экстремальных метеорологических явлений в России. Это относится прежде всего к засухам, лесным пожарам и наводнениям и будет происходить не повсеместно, а в региональном масштабе.

В условиях меняющегося климата возможно увеличение повторяемости таких опасных локальных явлений, как сели и лавины в горах.

**Засухи.** В предположении о продолжающемся усилении антропогенного воздействия на глобальный климат в течение XXI века на территории России на обширных территориях возможно усиление засушливости. Расчеты климата будущего (сценарий В2, климат будущего оценивался с помощью региональной модели ГГО) указывают на то, что изменения температуры и осадков на ЕТР весьма неравномерны (табл. TP13.1). Перспективные оценки были выполнены для четырех наиболее крупных водосборов: Балтийского моря, северных рек (Северной Двины, Мезени и Печоры),

южных рек (Днестра, Днепра, Дона) и водосборов Волги и Урала.

На юге Восточной Европы, на водосборах Дона и Днепра в летний период ожидаются существенное повышение температуры воздуха и уменьшение количества осадков, что указывает на возможное увеличение вероятности засух в конце XXI века. Положение усугубляется тем, что на этой территории ожидается увеличение повторяемости экстремально высоких значений температуры при одновременном увеличении частоты суточных сумм осадков менее 0,5 мм.

Увеличение температуры воздуха и уменьшение количества осадков могут привести к более интенсивным проявлениям почвенной засухи на юге ЕТР, к снижению урожайности сельскохозяйственных культур в регионе и уменьшению водных ресурсов в конце XXI века. В случае аридного потепления эти явления будут более выражены и могут наблюдаться также в более высоких широтах.

**Лесные пожары.** Ожидаемое изменение климата в XXI веке может привести к увеличению пожароопасности лесов. В предположении о существенном антропогенном воздействии на глобальный климат (сценарий А2, климат будущего оценивался на основе синтеза результатов расчета с помощью климатических моделей CGCM2, HadCM3 и ECHAM4) пожароопасность в лесу в первую половину XXI столетия заметно увеличится в некоторых регионах России (рис. TP13.5a).

На преобладающей части лесопокрытой территории в первой половине XXI века ожидается увеличение числа суток в году с горимостью “высокой и больше” на 20–60% на юге ЕТР и Запад-

**Таблица ТР13.1.** Изменения температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), суммы осадков  $\Delta R$  (%) и речного стока  $\Delta Q$  (%) по сезонам и за календарный год на крупных водосборах ЕТР в 2091–2100 гг. по отношению к периоду 1991–2000 гг.

Водосбор	Характеристика изменения климата	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Северные реки	$\Delta T$	6,1	3,4	1,9	4,1	3,9
	$\Delta R$	30	29	12	18	22
	$\Delta Q$	88	13	6	41	20
Балтийский	$\Delta T$	4,4	3,1	2,2	3,1	3,2
	$\Delta R$	24	23	8	28	20
	$\Delta Q$	96	19	12	57	38
Волга, Урал	$\Delta T$	5,1	2,6	2,5	3,7	3,5
	$\Delta R$	26	23	1	14	14
	$\Delta Q$	117	10	3	29	26
Южные реки	$\Delta T$	3,8	2,2	2,8	3,4	3,1
	$\Delta R$	23	20	-13	4	8
	$\Delta Q$	11	3	-16	-1	4

ной Сибири, в средних широтах Восточной Сибири и Дальнего Востока. За исключением южных степных районов на всей упомянутой территории произрастают леса.

В 2050 г. по сравнению с 2025 г. увеличится пожароопасность на территориях к северу от  $60^{\circ}$  с. ш., покрытых хвойными лесами и лиственничниками (рис. ТР13.5б).

**Наводнения.** При ожидаемом увеличении количества осадков в холодные периоды года наблюдаемая в конце XX — начале XXI века тенденция увеличения максимального стока рек и частоты высоких наводнений сохранится до конца столетия на большей части территории России. Ожидается увеличение вероятности опасных наводнений в весенние половодья на реках бассейнов Лены и Енисея, в меньшей степени — Печоры, Северной Двины, горной части бассейна Оби. Потепление обусловит более ранние сроки начала половодья, а это приведет к повышению вероятности заторных наводнений на Лене и других сибирских реках. В северных районах Сибири и на Дальнем Востоке ожидается увеличение осадков и в теплый период года, что повысит вероятность наводнений при дождевых, снегово-дождевых половодьях и паводках, особенно в горных районах.

Максимальный сток половодья рек центральной части ЕТР изменится незначительно, возможно его уменьшение на реках бассейнов Дона и Днепра. Поэтому на этих реках сохранится редкая повторяемость высоких наводнений.

В перспективе на ЕТР ожидается увеличение частоты дождей, количества и интенсивности ливневых осадков. Поэтому вероятность формирования дождевых паводков и вызываемых ими навод-

нений на малых и средних реках увеличится, особенно на Северном Кавказе.

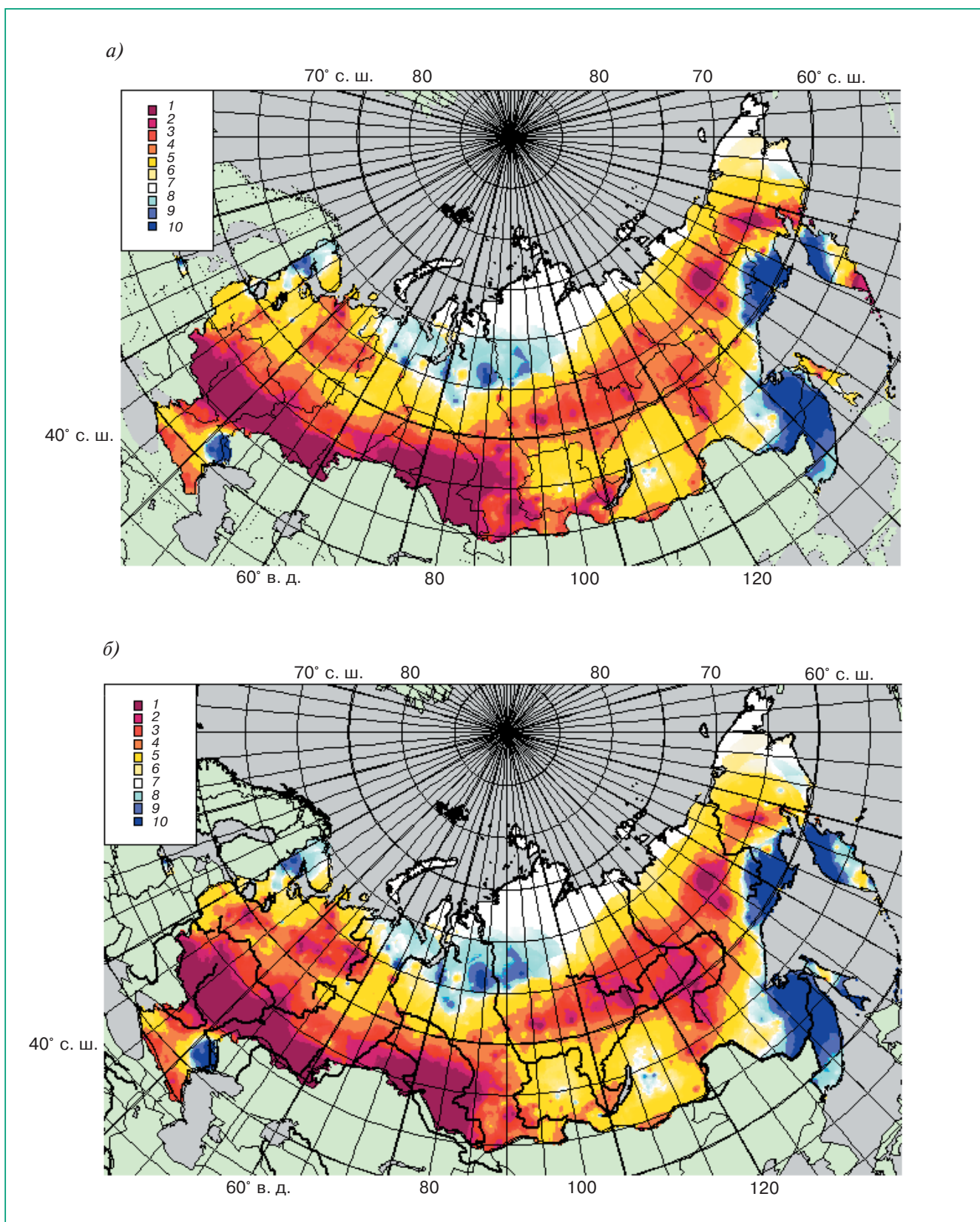
Увеличится вероятность нагонных наводнений в устьях больших рек. В частности, в Санкт-Петербурге увеличится вероятность наводнений с повышением уровня воды более чем на 3 м, что может привести к серьезным негативным последствиям для города.

**Сели и лавины.** В условиях продолжающегося потепления в XXI веке на всей территории Большого Кавказа увеличится продолжительность селеопасного периода в среднем на 47–50 суток. Верхняя граница формирования селей сдвинется вверх в среднем на 500–600 м. Произойдет оттаивание значительного объема многолетнемерзлых пород, увеличится площадь интенсивного морозного выветривания и соответственно увеличится объем горных пород, участвующих в формировании селевых потоков. На 20–30% увеличатся объемы селевых потоков.

Систематически будет отмечаться прохождение гляциальных и гляциально-дождевых селей в бассейнах рек Малая и Большая Лаба, Большой Зеленчук, Сулак и Самур. Произойдет увеличение числа и объема селей дождевого происхождения, особенно в районах Пастбищного и Лесистого хребтов. Эта тенденция может быть усилена сведением лесов.

Перспективные оценки деятельности снежных лавин показывают, что к середине XXI века сократятся продолжительность лавиноопасного периода года и площадь лавиноопасной территории на высотах 1500–2000 м. Произойдет увеличение повторяемости крупных катастрофических лавин из-за повышенного накопления снега на высотах более 3000 м.





**Рис. ТР13.5.** Изменение (%) числа суток в году со значениями индекса горимости “высокий и больше” к 2025 г. (а) и к 2050 г. (б) относительно нормы 1961–1990 гг. 1) 50–60; 2) 40–50; 3) 30–40; 4) 20–30; 5) 10–12; 6) 1–10; 7) 0; 8) –1...–10; 9) –10...–20; 10) –20...–30.

Дальнейшее увеличение температуры воздуха и количества осадков в холодный период года приведет к активизации снежных лавин на высотах более 2000 м в районах Главного и Бокового хребтов. Лавинная деятельность существенно сократится на Скалистом, Пастбищном и Лесистом хребтах.

## НЕОБХОДИМЫЕ ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информация о наблюдаемых и будущих изменениях климата, а также о последствиях этих изменений становится все более востребованной в правительственных органах и общественных организациях. Вовлеченность России в международные усилия в области регулирования антропогенного воздействия на глобальный климат, существенная зависимость ее природного комплекса и экономики от климатических факторов требуют научного обоснования ее климатической политики. Для этого необходимы дальнейшее развитие научных исследований в области изменений климата, их последствий и возможностей адаптаций, улучшение систем наблюдений за изменениями климата, повышение качества рядов исторических данных.

Для более глубокого понимания и правильного предсказания поведения сложной климатической системы необходимо дальнейшее развитие и широкое использование *физико-математических моделей* разной степени сложности, описывающих климатически значимые процессы и взаимодействия между ними с достаточной степенью достоверности и детализации.

Полноценные исследования климата невозможны без разработки, развертывания, интегрирования и устойчивого функционирования базирующихся на разных платформах компонентов комплексной *системы наблюдений за климатом*.

В числе главных неопределенностей прогностических оценок изменений климата остаются неопределенности, связанные с *источниками и стоками парниковых газов*, а также пространственно-временными распределениями и климатически значимыми свойствами *аэрозолей*.

Необходимы дальнейшие усилия, направленные на *понимание причин изменений климата* на основе анализа данных наблюдений и результатов физико-математического моделирования.

Проблемы предсказания *быстрых (внезапных) изменений*, в том числе в результате изменений крупномасштабной циркуляции Мирового океана, а также изменения баланса массы и динамики ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды, радикально расширяют временные рамки изучения эволюции климатической системы. Здесь, как и в

исследованиях естественной изменчивости климатической системы, в том числе под влиянием астрономических факторов, важная роль принадлежит *палеоклиматологии*.

*Чувствительность* климатической системы к внешним воздействиям, таким как увеличение содержания парниковых газов в атмосфере, определяется действующими в ней разнообразными обратными связями. Вопрос о том, насколько может быть уменьшена связанная с чувствительностью неопределенность реакции климатической системы на внешние воздействия, остается одним из наиболее важных вопросов, стоящих перед современной наукой о климате. Обратные связи между изменениями климата, загрязнением атмосферы и эволюцией озонового слоя являются также важным направлением исследований.

Проблема предсказуемости климата остается чрезвычайно актуальной для оценок будущих климатических изменений *на десятилетия и столетия*. Однако в настоящее время особую остроту приобрела потребность в прогнозах климата с заблаговременностью *от сезона до нескольких лет*. Большое значение при решении этой задачи приобретает совершенствование технологий *инициализации* климатических моделей и *ассимиляции* (усвоения) данных наблюдений.

С практической точки зрения высоким приоритетом обладают проблемы, связанные с прогнозом изменений интенсивности и повторяемости *экстремальных климатических явлений*, имеющих большие социально-экономические и экологические последствия.

В последнее время получило новый импульс так называемое *“геоинженерное” направление* науки о климате, рассматривающее возможности уменьшения глобального потепления, альтернативные сокращению эмиссий парниковых газов, в том числе путем внесения сульфатных аэрозолей в нижнюю стратосферу. Однако это направление требует тщательной научной проработки с целью оценки возможных положительных и негативных последствий.

Важную роль в перечисленных направлениях исследований играет физико-математическое моделирование климатической системы. Оно состоит прежде всего в создании и развитии *физически полных моделей климата*, а также в совершенствовании *вычислительных стратегий*, позволяющих оптимально использовать доступные вычислительные ресурсы.

Климатические модели должны включать более совершенные *интерактивные компоненты*, описывающие химические процессы, в том числе процессы образования, переноса и разрушения озона, биогеохимические циклы и фотохимию стратосферы. Интерактивные компоненты совре-

менных моделей, представляющие процессы взаимодействия аэрозолей с облаками, углеродный цикл в атмосфере и океане, климатозависимые изменения растительности и др., нуждаются в дальнейшем развитии.

Надежды на существенное повышение качества воспроизведения моделями наблюдаемого климата связываются и с улучшением их *пространственного разрешения* — как горизонтального, так и вертикального. Эта ситуация создает определенные перспективы для региональных климатических моделей, имеющих в среднем на порядок более высокое разрешение по сравнению с глобальными моделями.

Решая проблему предсказуемости климата, необходимо исследовать неизбежную неопределенность, связанную с собственной изменчивостью климатической системы. С этой целью необходимо проводить *ансамблевые расчеты* с варьированием начальных состояний, неопределенных модельных параметров в реалистичном диапазоне, либо используя разные модели. Развитие ансамблевого подхода сопряжено, в частности, с необходимостью создания на основе сравнения модельных расчетов с данными наблюдений системы показателей — так называемых *метрик*, которые позволили бы количественно оценивать совокупное качество каждой модели и осуществлять *объективную дискриминацию моделей*.

Нужно обеспечить дальнейшее развитие *статистических методов анализа климата*, ориентированных на сопоставление реального климата прошлого и настоящего с его модельными реконструкциями, что является эффективным средством оценки качества климатических моделей.

Необходима тщательно разработанная стратегия вычислений, обеспечивающая баланс между размером ансамбля, разрешением модели и сложностью модельных описаний физических процессов. К этому добавляется необходимость расчетов с варьированием модельных параметров и внешних воздействий. Все вместе позволяет рассматривать неопределенности, связанные с естественной изменчивостью, с модельной чувствительностью и с внешними воздействиями.

В области *оценки последствий наблюдаемых и ожидаемых в будущем изменений климата для природных и хозяйственных систем и для здоровья населения* необходимо дальнейшее развитие исследований по ряду научных направлений.

Для оценки последствий изменения климата требуются *имитационные модели климатозависимых процессов*, протекающих в природной и социально-экономической системах. Такие модели должны быть ориентированы прежде всего на прикладные задачи. Исходной информацией для этих моделей являются региональные оценки наблюда-

емых или же ожидаемых изменений параметров климата, а их выходной информацией — оценки изменений показателей состояния природных и хозяйственных систем, здоровья населения. Работа по развитию и совершенствованию таких моделей необходима в отношении здоровья населения, технических систем, водного баланса внутренних водоемов (например, Каспийского моря), первичной продуктивности морских и наземных экосистем (включая агроэкосистемы), биоразнообразия, границ растительных зон на континентах, состояния приповерхностного слоя морей (температура, соленость и т. д.), состояния континентальной многолетней мерзлоты и ледниковых систем, проявлений экстремальности климата (засухи, лесные пожары, наводнения, сели, лавины и т. д.).

Учитывая разные характерные времена реакции разных природных систем на изменения климата, весьма важным представляется развитие не только *моделей равновесия* (характеризуют равновесное состояние изучаемой системы при заданном климате), но и *моделей неравновесных состояний* (характеризующих переходные процессы).

В настоящее время для оценки последствий изменения климата в большей степени, чем модели, применяются *прикладные климатические индексы*, описывающие климатообусловленные изменчивость и изменения показателей состояния природных и хозяйственных систем, здоровья населения. Значения этих индексов, вычисляемых непосредственно по данным гидрометеорологических наблюдений, следует систематически сопоставлять с данными наблюдений упомянутых показателей состояния (заболеваемости населения, продуктивности и биоразнообразия природных экосистем, урожайности сельскохозяйственных растений, надежности конструкций зданий и технических сооружений и т. д.). Это будет способствовать отбору наиболее информативных прикладных климатических индексов, повышать точность оценок последствий изменения климата. Для такого систематического сопоставления необходимы параллельные измерения значений гидрометеорологических величин и показателей состояния систем, т. е. *осуществление комплексного мониторинга*.

Расширение таких комплексных наблюдений будет также способствовать совершенствованию методов оценки последствий изменения климата — переходу от прикладных климатических индексов к имитационным моделям климатозависимых процессов. Существенно, чтобы эти модели учитывали помимо климатических входных параметров и важнейшие параметры иной, неклиматической природы. Это позволит более надежно проводить *установление причин наблюдаемых изменений природных и хозяйственных систем, состояния здоро-*



вья населения, а также *более реалистично оценивать возникающие при этом неопределенности*.

Пространственное разрешение данных о состоянии природных систем, получаемых путем наземных инструментальных измерений, ограниченно имеющимися ресурсами — этот вид мониторинга требует значительных затрат времени и средств. В отношении некоторых показателей состояния систем *дистанционный мониторинг* более эффективен, например при наблюдении за движением границ морских льдов и растительных зон, изменениями проективного покрытия наземных растений, первичной продуктивности в приповерхностном слое океана, уровня моря, температуры поверхности моря и суши. Методы дистанционного мониторинга необходимо систематически калибровать по результатам наземных измерений с целью оптимизации методик и технических средств, а также для повышения эффективности методов анализа данных.

Для оценки опасности наблюдаемых и будущих изменений климата необходимы критерии, опирающиеся на концепцию критических границ (предельно допустимых значений) изменений параметров климата, выход за которые приводит к недопустимым последствиям для определенных ключевых уязвимых элементов природной или социально-экономической систем или для здоровья населения. Такие критические границы могут относиться к параметрам климата разного пространственного масштаба — глобального, регионального и даже локального. *Установление и научное обоснование критических границ* для изменения климата на территории России позволит оценивать опасность наблюдаемых и ожидаемых изменений климата.

Информация о критических границах изменения климата в совокупности с данными мониторинга и моделирования климата позволит ответить на следующие вопросы:

— как далеко современное состояние климата от критических границ, и

— с какой скоростью состояние климата приближается к этим критическим границам (для корректной оценки скорости исключительно важно учитывать *характер естественной изменчивости климата в разных временных масштабах*)?

Изменения климата, которые вызывают изменения состояния хозяйственных систем, не выходящие за критические границы, следует оценивать в экономических единицах. Это позволит сопоставлять разные изменения по уровню ущерба для хозяйства страны, отдельных регионов или же более мелких территориальных единиц, а также сравнивать уровень воздействия меняющегося клима-

та на различные секторы экономики. Развитие соответствующих методов *комплексной экономической оценки* последствий изменения климата и получение самих комплексных оценок в экономических единицах требуют приоритетного внимания. Такие оценки предоставляют агрегированную информацию высокого уровня, необходимую для выработки климатической политики страны.

Применение *ансамблевого подхода* в оценках последствий изменений климата является очевидным условием повышения эффективности соответствующих исследований. Многообещающие перспективы связаны с использованием вероятностных функций распределения климатических характеристик и их будущих изменений в качестве входной информации имитационных моделей и соответственно с представлением результатов оценки последствий климатических изменений *в вероятностной форме*. Получение такой входной информации обеспечивается ансамблевыми расчетами со сложными климатическими моделями. До недавнего времени реализация такого подхода была невозможна из-за недостатка компьютерных ресурсов. В настоящее время в результате развития компьютерной техники эта задача становится выполнимой.

Потребность в информации *высокого пространственного* (менее 10 км по горизонтали) и *временного разрешения* (сутки и более тонкое) является существенной особенностью разнообразных видов исследований последствий климатических изменений. Такое разрешение обеспечивается региональными климатическими моделями, “телескопированными” в глобальные модели (downscaling). Пространственная детализация ансамблевых расчетов будущих изменений климата с помощью региональных моделей высокого разрешения в настоящее время возможна, по-видимому, лишь в результате объединения усилий (и компьютерных ресурсов) нескольких крупных исследовательских центров в рамках международных проектов. Такие проекты уже инициированы для некоторых регионов мира.

Исследования изменений климата и их последствий для территории России могут быть лучше гармонизированы при условии облегчения доступа всего научного сообщества к данным наблюдений и результатам расчетов будущих изменений климата с помощью современных моделей — как глобальных, так и региональных. Создание и развитие соответствующей базы данных на общенациональном уровне, подразумевающие в числе прочего надлежащее консультационное сопровождение, входят в число приоритетных задач российской науки о климате.



**ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ**

- ААНИИ — Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета  
 АТР — Азиатская территории России  
 БС — Балтийская система высот  
 ВМО — Всемирная метеорологическая организация  
 ВНИИГМИ-МЦД — Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных  
 ГГИ — Государственный гидрологический институт  
 ГГО — Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
 ГСА — Глобальная служба атмосферы  
 ГСНК — Глобальная система наблюдений за климатом  
 ЕВ — естественные внешние воздействия  
 ЕТР — Европейская территория России  
 ИГКЭ — Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН  
 МГЭИК — Межправительственная группа экспертов по изменению климата  
 МОК — Международная океанографическая комиссия  
 МОЦАО — объединенная модель общей циркуляции атмосферы и океана  
 ОД3 — Третий оценочный доклад МГЭИК  
 ОД4 — Четвертый оценочный доклад МГЭИК  
 ООН — Организация Объединенных Наций  
 ПГ — парниковые газы  
 РАН — Российская академия наук  
 РКИК — Рамочная конвенция ООН об изменении климата  
 РКМ — региональная климатическая модель  
 Росгидромет — Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
 РФ — Российская Федерация  
 САК — североатлантическое колебание  
 СДСВ — Специальный доклад о сценариях выбросов МГЭИК  
 ТК — тихоокеанское колебание  
 ТПМ — температура поверхности моря  
 ФО — федеральный округ  
 ХФУ — хлорфторуглероды  
 ЮНЕП — Программа ООН по окружающей среде  
 ЮНЕСКО — Организация ООН по вопросам образования, науки и культуры  
 CMIP — Coupled Model Intercomparison Project (Проект сравнения объединенных моделей — МОЦАО)  
 CMIP2 — вторая фаза проекта CMIP  
 CMIP3 — третья фаза проекта CMIP  
 CRU — Climate Research Unit, University of East Anglia, UK (группа анализа данных наблюдений за климатом Университета Восточной Англии, Великобритания)

## СЦЕНАРИИ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КЛИМАТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ЗЕМЛИ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ МГЭИК В СПЕЦИАЛЬНОМ ДОКЛАДЕ ПО СЦЕНАРИЯМ ВЫБРОСОВ

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) разработала долгосрочные сценарии эмиссии парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.) и аэрозолей в атмосферу в XXI веке, основанные на обширном перечне демографических, экономических и технологических факторов, определяющих эмиссии.

В 2000 г. был выпущен Специальный доклад по сценариям выбросов — СДСВ (Special Report on Emission Scenarios — SRES). Общее число сценариев составляет 40, и все они объединены в четыре “основные сюжетные линии” (storylines) — A1, A2, B1 и B2. Эволюция концентрации парниковых газов в атмосфере в течение XXI века для каждого из сценариев определялась с помощью современных биогеохимических моделей.

**A1.** Основная линия и сценарное семейство предполагают быстрый экономический рост и внедрение новых эффективных технологий, а также рост народонаселения до середины XXI столетия и последующее его уменьшение. Основными чертами развития будут существенное уменьшение региональных различий в доходах на душу населения и усиление культурных и социальных взаимосвязей. Сценарии этого семейства делятся на три группы, различающиеся по энергетическому акценту: A1FI — интенсивное использование ископаемого топлива, A1T — интенсивное использование иных видов топлива, A1B — сбалансированное использование всех видов топлива. По сценарию A1B концентрация основных парниковых газов в атмосфере увеличится к 2100 г. по сравнению с 1990 г.\*, принятым за базовый:  $\text{CO}_2$  в 2,03,  $\text{CH}_4$  в 1,16 и  $\text{N}_2\text{O}$  в 1,21 раза.

**A2.** Основная линия и сценарии этого семейства описывают весьма неоднородный мир. Регионы (и страны) ориентируются на собственные природные ресурсы при сохранении местных особенностей. Темпы рождаемости в разных регионах сближаются очень медленно, что приведет к дальнейшему росту населения планеты. Экономическое развитие будет в основном регионально ориентированным, а рост подушного дохода и тех-

нологические изменения будут более фрагментированными, чем для других семейств сценариев. К 2100 г. концентрация основных парниковых газов в атмосфере увеличится по сравнению с 1990 г.:  $\text{CO}_2$  в 2,42,  $\text{CH}_4$  в 2,19 и  $\text{N}_2\text{O}$  в 1,45 раза.

**B1.** Основная линия и сценарии этого семейства описывают такой же мир с динамикой народонаселения, как и основная линия семейства A1. Однако при этом предполагаются быстрые изменения в экономической структуре в пользу обслуживающего и информационного компонентов при сокращении материалоемкости и внедрении чистых и ресурсосберегающих технологий. Главное внимание будет уделяться глобальным решениям экономических и социальных проблем и поддержанию окружающей среды в устойчивом состоянии, включая меры по улучшению положения в области равноправия (регионов, стран). При этом новых инициатив в области регулирования климата не предполагается. К 2100 г. концентрация  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в атмосфере увеличится по сравнению с 1990 г. соответственно в 1,53 и 1,22 раза, а концентрация  $\text{CH}_4$  уменьшится на 6%.

**B2.** Основная линия и сценарии этого семейства описывают мир, в котором упор делается на локальные решения в области поддержания устойчивости экономики, социальной сферы и окружающей среды. Глобальное народонаселение будет неуклонно возрастать с темпом меньшим, чем в сценарии A2. Темп развития экономики будет средним. Изменения в технологиях будут более медленными и более разнообразными, чем для основных линий семейств B1 и A1. Хотя сценарии этого семейства также предполагают защиту окружающей среды и социальную справедливость, в них главное внимание уделяется вопросам регионального развития. Сценарий B2 близок к современному уровню развития, и прогностическое увеличение эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу примерно соответствует его увеличению за последние 10 лет XX века. В 2100 г. концентрация основных парниковых газов увеличится по сравнению базовым 1990 г.:  $\text{CO}_2$  в 1,76,  $\text{CH}_4$  в 1,75 и  $\text{N}_2\text{O}$  в 1,18 раза.

\* Согласно ОДЗ МГЭИК, концентрации основных парниковых газов в атмосфере в 1990 г. составляли:  $\text{CO}_2$  — 353 млн<sup>-1</sup>,  $\text{CH}_4$  — 1700 млрд<sup>-1</sup>,  $\text{N}_2\text{O}$  — 308 млрд<sup>-1</sup>.

**ОЦЕНОЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА  
И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ  
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Техническое резюме**

Редактор *Т.В.Лешкевич*  
Корректор *В.В.Борисова*  
Компьютерная верстка *И.В.Ломакиной*

Подписано в печать 18.11.08. Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 9,45. Усл. кр.-отт. 9,70. Уч. изд. л. 10,46.  
Тираж 600 экз. Индекс ММ-13. Заказ №29.

Набрано в ГУ «НИЦ «Планета»  
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 7  
Отпечатанов ГУ «ВНИИГМИ-МЦД»  
249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д.6

ISBN 978-5-904206-03-1