
7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Ведущие авторы: В. П. Мелешко, В. М. Катцов

Авторы: В. А. Говоркова, Е. Д. Надежина, Т. В. Павлова, П. В. Спорышев, И. М. Школьник, Б. Е. Шнееров

Рецензент: академик РАН Г. С. Голицын

7.1. Сценарии изменения концентрации парниковых газов и аэрозолей в атмосфере

МГЭИК разработала долгосрочные сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозоля в атмосферу в XXI веке, которые опубликованы в Специальном докладе о сценариях выбросов (СДСВ) (Nakićenović et al., 2000). Эти сценарии основаны на обширном перечне демографических, экономических и технологических факторов, определяющих эмиссии. Общее число сценариев составляет 40, и все они объединены в четыре основные сюжетные группы. Эволюция концентраций разных парниковых газов в атмосфере (CO_2 , CH_4 , N_2O и др.) в течение XXI века определялась с помощью современных фотохимических и углеродных моделей (IPCC, 2001).

Из 40 сценариев выделяются 6 так называемых демонстрационных сценариев: 3 сценария A1 (A1FI, A1T, A1B), а также A2, B1 и B2.

Сюжетная линия и сценарное семейство A1 содержат описание будущего мира, характеризующегося быстрым экономическим ростом и увеличением населения Земли, показатели которого достигают пиковых значений в середине XXI века с последующим уменьшением, а также быстрым внедрением новых и более эффективных технологий. Происходит постепенная интеграция регионов, создание потенциала и активизация культурных и социальных взаимосвязей при значительном уменьшении региональных различий в доходах на душу населения. Сценарное семейство A1 разделяется на три группы, дающие описания альтернативных вариантов технологического изменения в энергетической системе. Три группы A1 отличаются своим центральным технологическим элементом: значительная доля ископаемых видов

топлива (A1FI), альтернативные источники энергии (A1T) и равновесие между всеми источниками (A1B). По сценарию A1B к 2100 г. концентрация основных парниковых газов в атмосфере увеличится по сравнению с 1990 г., принятым за базовый*: CO_2 в 2,03, CH_4 в 1,16 и N_2O в 1,21 раза.

По сценарию A2 развитие мира проходит при сохранении местной самобытности и опоры на собственные природные ресурсы, а также при постоянном росте общей численности населения в мире. Экономическое развитие имеет региональную направленность, а экономический рост в расчете на душу населения и технологические изменения более фрагментарны и происходят медленнее по сравнению с другими основными сюжетными группами. В результате такого развития ожидается значительное увеличение концентрации основных парниковых газов в атмосфере. К 2100 г. концентрации основных парниковых газов в атмосфере увеличатся по сравнению с 1990 г.: CO_2 в 2,42, CH_4 в 2,19 и N_2O в 1,45 раза.

Сюжетная линия и сценарное семейство B1 содержат описание движущегося в одном направлении мира с таким же, как и в сюжетной линии A1, глобальным населением, которое достигает максимальной численности к середине XXI века, а затем уменьшается, однако при быстрых изменениях в экономических структурах в направлении сервисной и информационной экономики с уменьшением материальной интенсивности и внедрением экологически чистых и ресурсосберегающих технологий. Главное внимание уделяется глобальным решениям в интересах экономической, социальной и экологической устойчивости, но без дополнительных инициатив, связанных с климатом. К 2100 г. концентрация CO_2 и N_2O в атмосфере увеличится по сравнению с 1990 г. соответ-

* Согласно (IPCC, 2001), концентрации основных парниковых газов в атмосфере составляли в 1990 г.: CO_2 — 353 млн⁻¹; CH_4 — 1700 млрд⁻¹; N_2O — 308 млрд⁻¹.

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

ственно в 1,53 и 1,22 раза, а концентрация CH_4 уменьшится на 6%.

По сценарию B2 мировое развитие будет сосредоточено на решении локальных проблем экономической, социальной и экологической устойчивости с постоянно увеличивающимся населением Земли при темпах ниже, чем в сценарии A2. Хотя данный сценарий ориентирован на охрану окружающей среды и решение социальных проблем, главное внимание в нем уделяется вопросам регионального развития. Этот сценарий близок к

современному уровню развития, и прогностический рост эмиссии CO_2 в атмосферу примерно соответствует его росту в конце XX века (IPCC, 2001). В 2100 г. концентрация основных парниковых газов увеличится по сравнению с базовым 1990 г.: CO_2 в 1,76 раза, CH_4 в 1,75 раза и N_2O в 1,18 раза.

До середины XXI столетия различия между сценариями невелики, во всяком случае, в средних глобальных оценках изменения климата, а к концу столетия ожидаются значительные различия

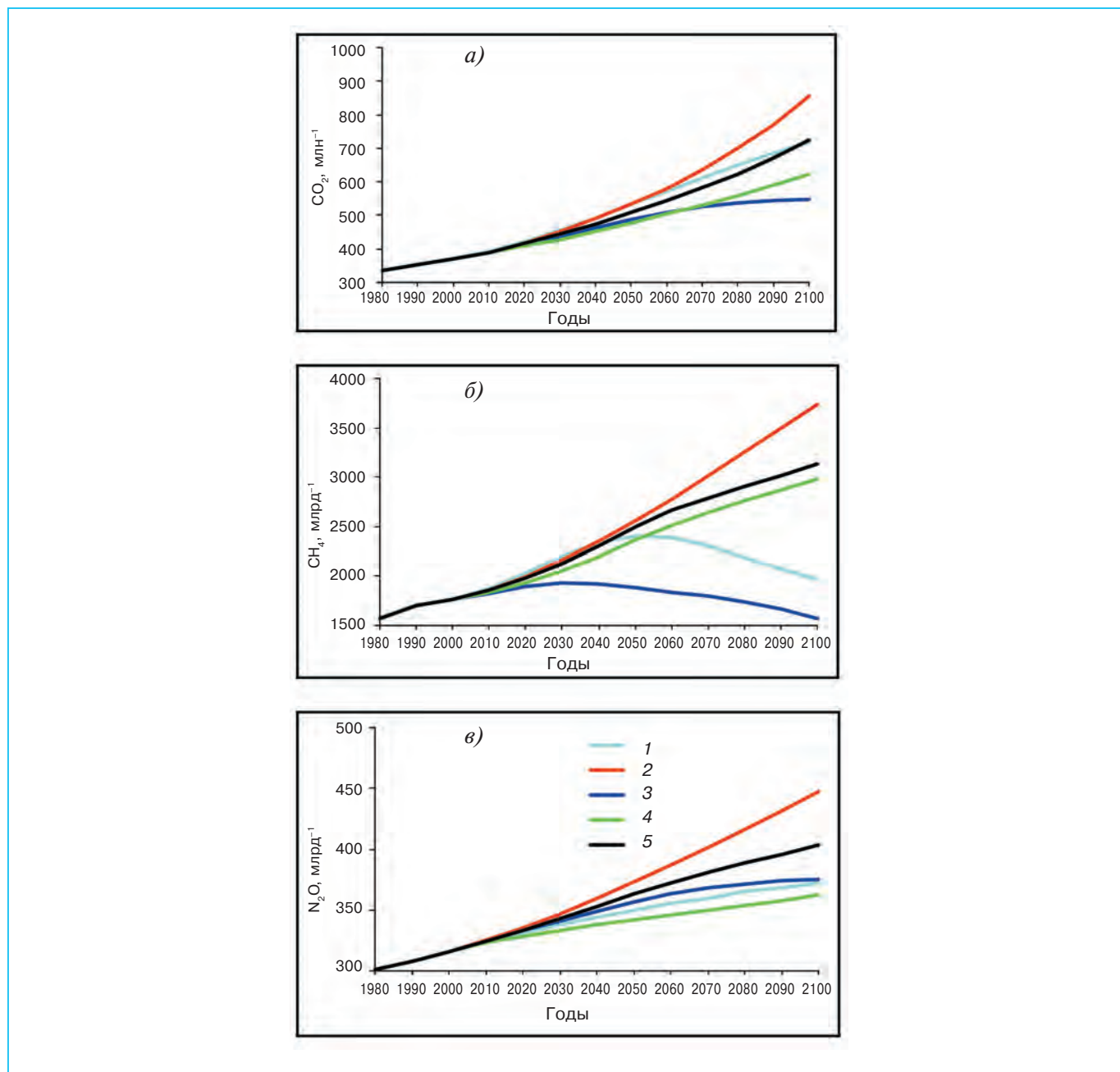


Рис. 7.1. Концентрации парниковых газов в атмосфере в конце XX и XXI вв. а) CO_2 , б) CH_4 , в) N_2O , полученные по четырем демонстрационным сценариям СДСВ, использованным при подготовке ОДЗ и ОД4 МГЭИК. Сценарий IS92a впервые использовался в ОД2 МГЭИК. 1) A1B; 2) A2; 3) B1; 4) B2; 5) IS92a.

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

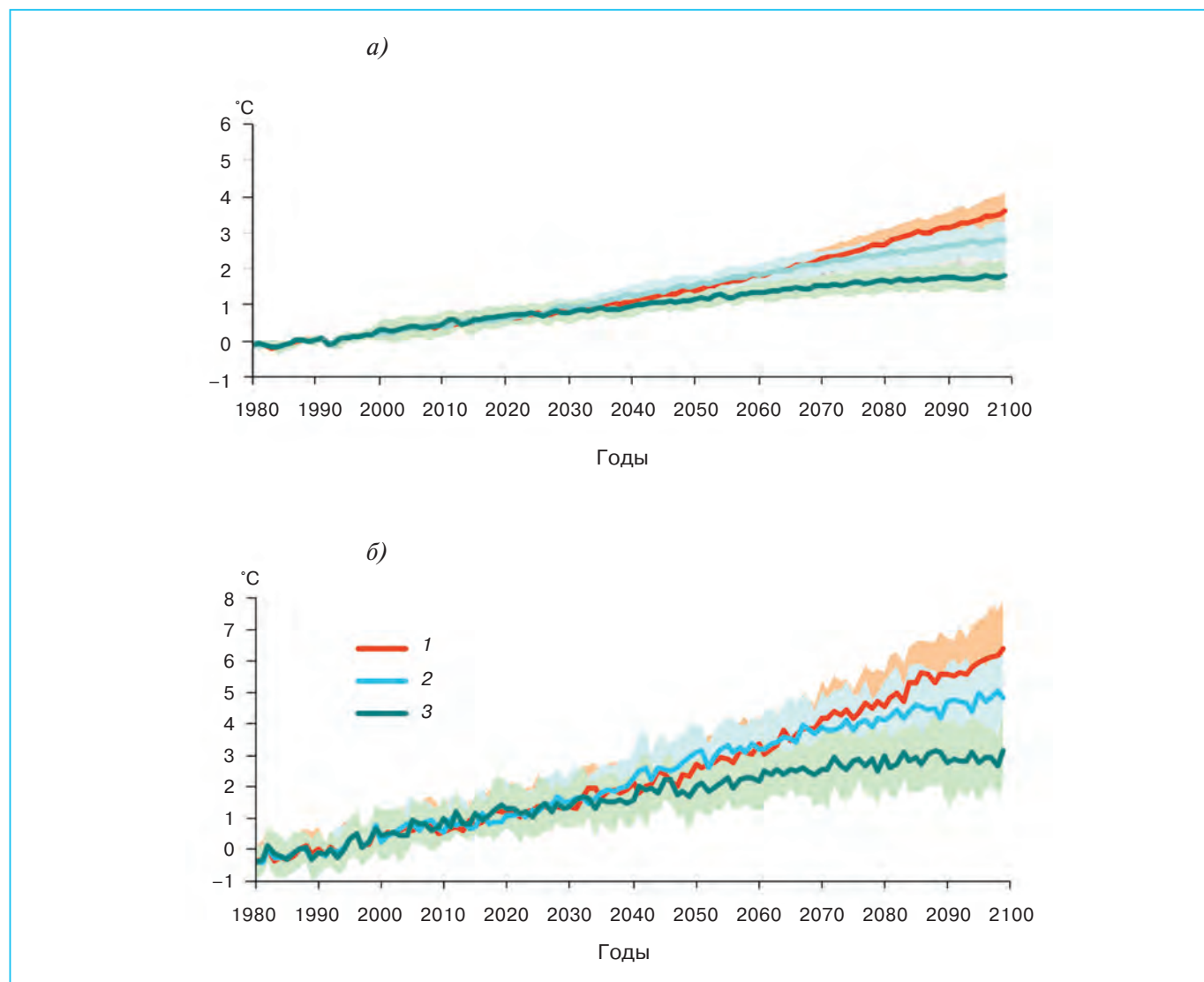


Рис. 7.2. Временной ход средней годовой аномалии температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) по отношению к базовому периоду (1980–1999 гг.) с учетом сценариев А2 (1), А1В (2) и В1 (3) в XXI веке: средние глобальные (а) и осредненные по территории России (б). Жирные линии характеризуют средние распределения по ансамблю из 16 МОЦАО СМIP3. Цветом выделены области стандартных отклонений ($\pm\sigma$), характеризующих межмодельный разброс.

между ними с более сильным потеплением в случае реализации сценария А2 (рис. 7.1).

В ОДЗ МГЭИК использовались сценарии эмиссий парниковых газов и аэрозоля А2 и В2. Оценки изменения климата на территории России, рассчитанные по МОЦАО для этих двух сценариев, приводятся в работах (Мелешко и др., 2004а, 2004б). В докладе (АСIA, 2005) основное внимание уделялось сценарию В2, а сценарий А2 использовался в качестве вспомогательного (Катцов и др., 2003; Kattsov and Källén, 2005). При подготовке ОД4 МГЭИК в качестве основных использовались три сценария: В1, А1В и А2. Чтобы обеспечить преемственность оценок изменения

климата на территории России, выполненных ранее с помощью ансамбля моделей ОДЗ МГЭИК, в настоящем докладе в качестве основного принят сценарий А2. Вместе с тем в отдельных случаях проводится сравнительный анализ оценок, полученных и для сценариев А1В и В1.

Различия среднего глобального потепления между “жестким” (А2) и “мягким” (В1) сценариями к концу XXI века составляют $1,5^{\circ}\text{C}$, при этом стандартное отклонение, характеризующее межмодельный разброс, достигает 68% в каждом сценарии (рис. 7.2а). Соответствующая разность для России составляет $2,9^{\circ}\text{C}$, а с учетом стандартного отклонения — $4,2^{\circ}\text{C}$ (рис. 7.2б).

Блок 7.1. Зависимость оценок изменений климата России от выбора сценария эмиссий парниковых газов и от выбора ансамбля моделей

Вследствие термической инерции климатической системы скорость потепления определяется не столько текущим увеличением содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере, сколько их накоплением за весь предшествующий период. Как видно из данных табл. 7.1, потепление климата на территории России мало зависит от выбранного сценария в первые несколько десятилетий XXI века: различия между сценариями сопоставимы с межмодельным разбросом оценок потепления для одного и того же сценария. То же самое можно сказать и о средних изменениях осадков в первые несколько десятилетий XXI века.

Несомненный интерес представляет вопрос, насколько расчеты будущих изменений регионального климата могут зависеть от качества расчетов современного климата (см. главу 5). Рассмотрим два подансамбля, составленных из 16 МОЦАО. Один подансамбль (СП-8.1) включает 8 моделей, которые характеризуются наиболее высоким качеством воспроизведения современного климата (блок 5.1), второй (СП-8.2) — все остальные модели. В табл. 7.2 приводятся оценки, характеризующие оба подансамбля и полный ансамбль СП-16, включающий все МОЦАО.

Средние квадратические ошибки расчетов температуры и осадков в СП-8.1 заметно меньше, чем в СП-8.2, а межмодельный разброс примерно одинаков в обоих подансамблях. Подансамбль СП-8.1 имеет более высокую равновесную чувствительность к удвоению концентрации CO_2 в атмосфере ($4,7 \pm 0,6^\circ\text{C}$) по сравнению с СП-8.2 ($4,3 \pm 0,7^\circ\text{C}$). Средняя чувствительность по ансамблю СП-16 составляет $4,5 \pm 0,7^\circ\text{C}$. Аналогичные различия чувствительности между подансамблями проявляются и в расчетах потепления климата России к концу XXI века (A2).

Изменения температуры приземного воздуха на территории России в каждом подансамбле близки в течение почти всего XXI века и несколько различаются только в его конце, однако это различие не достигает 5%-ного уровня значимости (рис. 7.3). Наибольший вклад в потепление в СП-8.1 вносят три модели: MIROC3.2 (med) ($5,2^\circ\text{C}$), UKMO-HadGEM1 ($5,4^\circ\text{C}$), ECHAM5/MPI-OM ($5,0^\circ\text{C}$). С другой стороны, в этот же подансамбль входит модель MRI-CGCM2.3.2, показывающая сравнительно слабое потепление ($3,2^\circ\text{C}$). В подансамбле СП-8.2 наибольшее потепление дает модель IPSL-CM4 ($5,2^\circ\text{C}$) и наименьшее — модель PCM ($3,0^\circ\text{C}$).

Таким образом, значимой связи между качеством МОЦАО в расчетах современного климата Северного полушария и их чувствительностью к внешнему воздействию не обнаружено (Мелешко и др., 2007а). Хотя применение ансамбля моделей дает возможность получить более достоверные распределения основных характеристик регионального климата, чем любая отдельно взятая модель, отбор оптимального ансамбля МОЦАО для оценок будущих изменений климата требует дальнейших исследований (см. главу 8).

Таблица 7.1. Средние за год изменения температуры приземного воздуха ($^\circ\text{C}$) и межмодельные стандартные отклонения, рассчитанные по ансамблю МОЦАО для территории России в XXI веке для сценариев A1B, A2 и B1

Сценарий	2011–2030 гг.	2041–2060 гг.	2080–2099 гг.
A1B	$1,2 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,7$	$4,7 \pm 1,2$
A2	$1,1 \pm 0,5$	$2,6 \pm 0,7$	$5,6 \pm 1,2$
B1	$1,2 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,9$

Таблица 7.2. Средние квадратические ошибки (СКО) расчета температуры приземного воздуха ($^\circ\text{C}$) и осадков (мм/сутки) для условий современного климата в Северном полушарии, полученные по ансамблям моделей СП-8.1, СП-8.2 и СП-16

Величина	СП-8.1		СП-8.2		СП-16	
	СКО	Δ	СКО	Δ	СКО	Δ
Температура	$2,7 \pm 0,5$	$4,7 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,6$	$4,3 \pm 0,7$	$3,1 \pm 0,7$	$4,5 \pm 0,7$
Осадки	$1,17 \pm 0,18$	5 ± 2	$1,31 \pm 0,23$	5 ± 2	$1,24 \pm 0,22$	5 ± 2

Примечание. Здесь же приводятся изменения температуры (Δ , $^\circ\text{C}$) и осадков (Δ , %) к концу XXI века (2080–2099 гг.) по отношению к современному климату (1980–1999 гг.) в Северном полушарии, рассчитанные по ансамблям моделей для сценария A2.

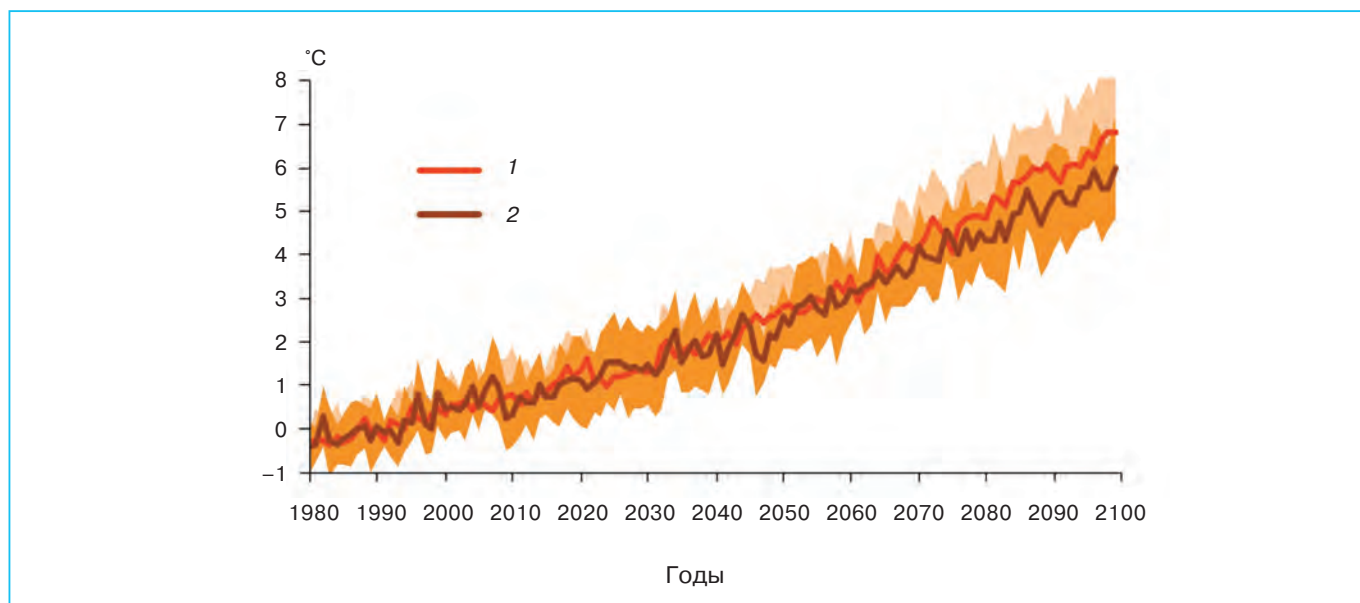


Рис. 7.3. Временной ход средней за год аномалии температуры приземного воздуха на территории России в XXI веке по отношению к базовому периоду (1980–1999 гг.), рассчитанный в подансамблях СП-8.1 (1) и СП-8.2 (2) для сценария А2. СП-8.1 включает 8 МОЦАО, которые наиболее успешно воспроизводят современный климат в Северном полушарии, СП-8.2 — остальные 8 МОЦАО. Жирные линии характеризуют средние по ансамблю значения. Цветом выделены области стандартных отклонений, характеризующих межмодельный разброс.

7.2. Неопределенности оценок будущих изменений климата

Помимо сценариев эмиссий парниковых газов и аэрозоля в атмосфере, в докладах МГЭИК используется понятие климатического сценария. Согласно определению МГЭИК (IPCC, 2001), под климатическим сценарием следует понимать правдоподобную (или вероятную) эволюцию климата в будущем, согласующуюся с предположениями о будущих эмиссиях парниковых газов и других атмосферных примесей, а также с существующими представлениями о воздействии соответствующих изменений их концентраций на климат. Соответственно под сценарием изменения климата подразумевается разность между климатическим сценарием и современным состоянием климата.

Климатические сценарии используются в так называемых импактных оценках, т. е. в оценках влияния климатических изменений на окружающую среду и жизненные ресурсы, здоровье и хозяйственную деятельность человека в разных регионах мира. Выбор того или иного климатического сценария для последующего использования в импактных оценках всегда уязвим для критики. Сценарии часто критикуют за то, что они либо слиш-

ком умеренны, либо, наоборот, экстремальны, не реалистичны, не учитывают важных факторов и т. п. (Smith et al., 1998). В (IPCC-TGCIА, 1999) предложены следующие критерии, которым должны удовлетворять климатические сценарии, чтобы их можно было применять в импактных оценках: 1) согласие с имеющимися оценками глобального потепления за период 1990–2100 гг., варьирующими в пределах 1,4–5,8°C (IPCC, 2001); 2) физическая обоснованность; 3) достаточные для импактных оценок количество климатических переменных и их пространственно-временное разрешение; 4) репрезентативность, отражающая потенциальный разброс оценок региональных климатических изменений в будущем, и 5) доступность (например, через Интернет или на магнитных носителях). В наибольшей степени вышеперечисленным критериям отвечают сценарии, полученные с использованием МОЦАО.

Кроме физико-математического моделирования глобальной климатической системы, существуют другие способы построения климатических сценариев для использования в импактных оценках. Наиболее распространенными являются так называемые синтетические и аналоговые сценарии (см., например, (Mearns et al., 2001)). Ни те, ни другие не являются физически согласован-

ными, ни с точки зрения изменений состава атмосферы, ни с точки зрения взаимообусловленности изменений разных климатических характеристик (например, приземной температуры и осадков). Тем не менее вследствие своей простоты и доступности они применяются в некоторых импактных исследованиях. Существуют также способы построения климатических сценариев, основанные на экстраполяции наблюдаемых климатических трендов или на статистических связях между региональными и глобальными изменениями климата. В некоторых работах для оценок будущих изменений регионального климата используются упрощенные эмпирические модели, основанные на обобщении данных наблюдений за прошлые годы в конкретных регионах России (Анисимов, Поляков, 1999; Анисимов, Белолуцкая, 2003). По мнению авторов этих работ, указанный метод позволяет достоверно оценивать изменения климата на сроки до 10 лет. Следует отметить, что эмпирические модели могут иметь очень ограниченное применение из-за следующих своих недостатков:

- поскольку метод основан на применении данных наблюдений, в основе прогноза лежит неявный учет как антропогенного воздействия, так и естественных колебаний климата. Однако естественные колебания имеют ограниченную предсказуемость, даже если природа этих колебаний известна (см. раздел 5.1);

- прогноз выполняется только для температуры приземного воздуха в регионах России, для которых удастся построить по данным наблюдений относительно устойчивые регрессионные соотношения. Как правило, для других переменных (например, осадков) устойчивых эмпирических связей обнаружить не удастся.

С учетом отмеченных ограничений эмпирический метод может быть использован для прогноза только температуры приземного воздуха в отдельных регионах России, по-видимому, на несколько лет, и его можно рассматривать как вспомогательный по отношению к прогнозам климата, основанным на применении МОЦАО.

Основными источниками неопределенности полученных с помощью МОЦАО оценок возможных в будущем изменений климата являются:

- принципиальные ограничения прогнозов технологического, демографического и других аспектов развития мирового сообщества на длительный период, порождающие неопределенность в оценках будущих эмиссий парниковых газов и других радиационно-активных примесей в атмосферу, а также невозможность прогнозировать вклад естественных внешних воздействий на климат, таких как изменения солнечной и вулканической активности;

- недостаточное понимание и соответственно неточности или отсутствие описаний в современных МОЦАО климатически значимых процессов и обратных связей, которые определяют чувствительность глобального и регионального климата к внешним воздействиям;

- недостаточное пространственное разрешение современных МОЦАО, ограничивающее явное описание климатически значимых процессов (например, связанных с атмосферной и океанской конвекцией, облаками и т. п.), а также затрудняющее прямое использование результатов модельных расчетов в оценках воздействий изменений климата на региональном и локальном уровнях.

Неопределенности прогнозов развития мирового сообщества и соответственно антропогенного воздействия на климатическую систему обусловили замену климатического прогноза набором климатических сценариев, основанных на использовании сценариев будущих эмиссий парниковых газов и аэрозолей. При этом вероятность того или иного сценария эмиссий не определена, а обусловленность мирового развития будущими климатическими изменениями не учитывается.

Большую неопределенность в оценке будущих изменений климата вносят обратные связи, действующие в атмосфере (см. раздел 5.3). При современном уровне качества климатических моделей проблема, связанная с несовершенством моделей, отчасти решается посредством использования ансамбля МОЦАО (см. раздел 5.5). Поскольку качество воспроизведения наблюдаемого климата с помощью ансамбля независимых моделей, как правило, выше по сравнению с отдельно взятыми моделями, есть основания предполагать, что расчеты будущих изменений климата с помощью мультимодельных ансамблей также более достоверны.

Потепление глубоких слоев океана происходит значительно медленнее по сравнению с атмосферой. Относительно быстрое потепление тропосферы и медленная передача тепла в глубь океана определяют временной масштаб релаксации климата к уже совершившемуся глобальному радиационному воздействию. Современные МОЦАО показывают заметные различия в скорости передачи тепловой энергии в глубь океана. С другой стороны, межмодельный разброс неравновесного отклика климата на одинаковое радиационное воздействие оказывается меньшим по сравнению с межмодельным разбросом равновесной чувствительности климата к удвоению CO_2 . Так, для моделей, показанных на рис. 7.4, изменения равновесного климата при удвоении концентрации CO_2 , полученные по ансамблю из 14 МОЦА/ВПСО/МЛ, составили $3,26 \pm 0,66^\circ\text{C}$. А в расчетах изменения глобального климата к концу XXI века по

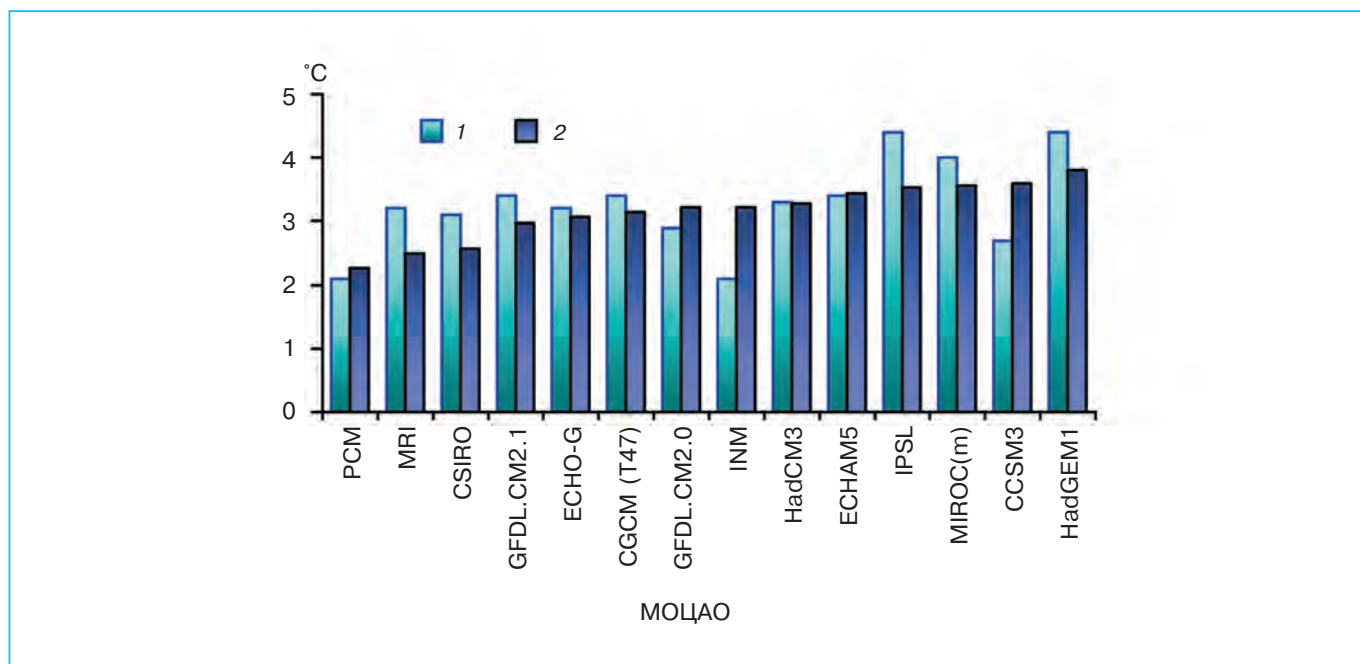


Рис. 7.4. Изменения глобальной температуры приземного воздуха в моделях климата CMIP3 при радиационном воздействии: 1) равновесная реакция МОЦА/ВПСО/МЛ на удвоение концентрации CO_2 ; 2) изменения климата, рассчитанные с помощью МОЦАО для сценария A2 в конце XXI века (2080–2099 гг.), по отношению к базовому климату (1980–1999 гг.). В обоих расчетах использовались одинаковые модели атмосферы. МОЦАО ранжированы в порядке увеличения потепления в расчетах с учетом сценария A2.

соответствующему ансамблю МОЦАО* составили $3,15 \pm 0,33^\circ\text{C}$. Как видно, в расчетах изменения климата по ансамблю МОЦАО циркуляция океана способствует уменьшению межмодельного разброса оценок, обусловленных преимущественно влиянием атмосферных обратных связей, и тем самым несколько сужает диапазон неопределенностей, демонстрируемый оценками равновесной чувствительности.

Повышение достоверности расчетов будущих климатических изменений обусловлено развитием МОЦАО с помощью совершенствования существующих и включения новых компонентов, совершенствования методов тестирования и оценки качества МОЦАО, а также путем повышения пространственного разрешения. Вероятностная интерпретация результатов расчетов, позволяющая оценивать будущие изменения экстремальности климата, а также выделять антропогенный сигнал на фоне естественной изменчивости, связана с использованием больших ансамблей (см. раздел 5.5). Прогресс в использовании ансамблевого подхода в значительной степени определяется развитием вычислительной техники и наличием соответствующих ресурсов.

Что касается недостаточного пространственного разрешения моделей, то наблюдается тенденция к уменьшению соответствующей части неопределенности, прежде всего вследствие ускоряющегося развития вычислительной техники. Этот прогресс, например, позволяет уже сегодня рассматривать “облако-разрешающие” МОЦА как очень амбициозную, но реальную цель моделирования на ближайшее десятилетие. Кроме того, в оценках воздействий климатических изменений широко используются встроенные в МОЦАО региональные модели, разрешение которых уже преодолело 10-километровый рубеж.

7.3. Регионы и базовые периоды, использованные в оценках изменения климата

Территории России присуще большое разнообразие климатических зон — от арктической на севере до субтропической на юге. В настоящей главе при оценке изменений климата рассматриваются *три типа регионов*, которые различаются между собой размерами и особенностями клима-

* Имеется в виду, что каждая пара МОЦА/ВПС/МЛ и МОЦАО различались только океанскими компонентами.

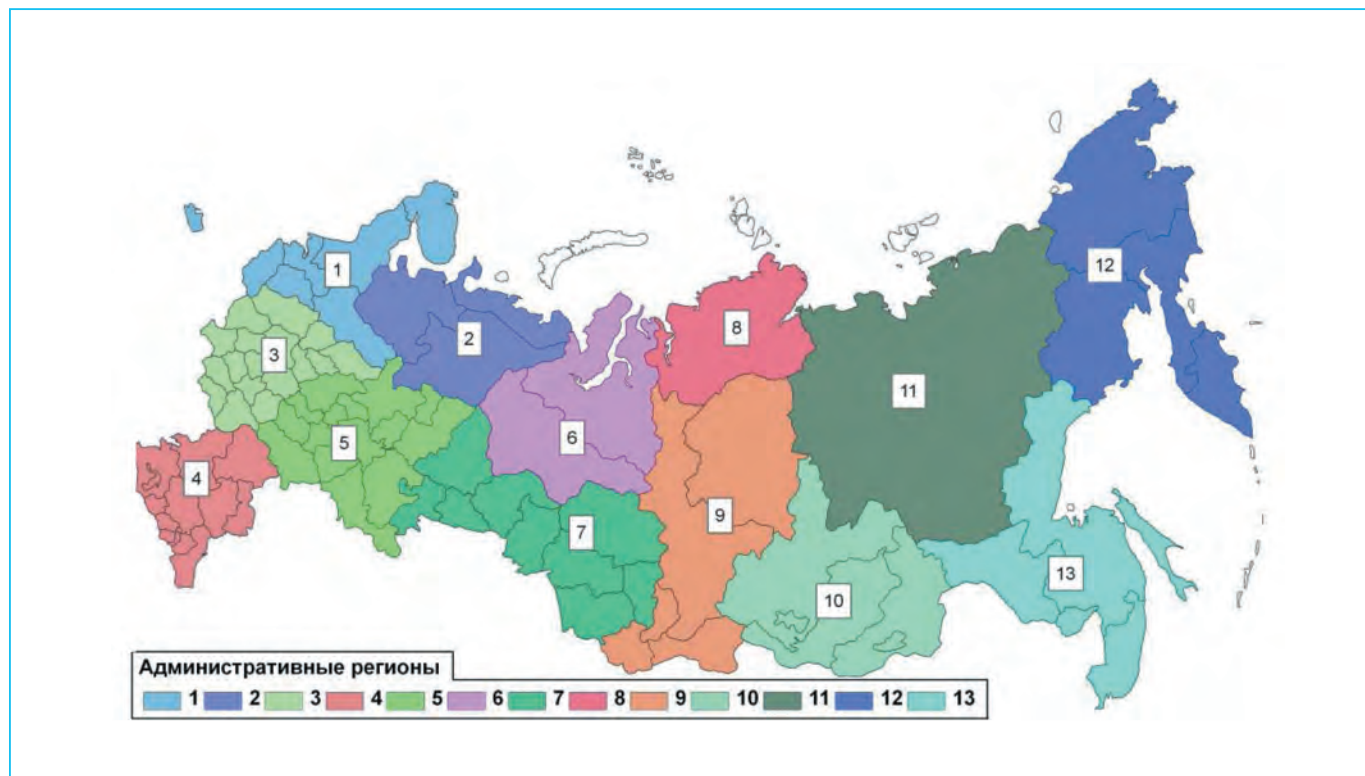


Рис. 7.5. Административные регионы России, для которых в настоящей главе получены оценки изменения климата: 1 — Северо-Западный ФО (запад); 2 — Северо-Западный ФО (восток); 3 — Центральный ФО; 4 — Южный ФО; 5 — Приволжский ФО; 6 — Уральский ФО (север); 7 — Уральский ФО (юг) и Сибирский ФО (юго-запад); 8 — Сибирский ФО (север); 9 — Сибирский ФО (центр и юг); 10 — Сибирский ФО (юго-восток); 11 — Дальневосточный ФО (северо-запад и центр); 12 — Дальневосточный ФО (северо-восток); 13 — Дальневосточный ФО (юго-восток).

тических условий. Так, для анализа крупномасштабных изменений климата вся территория России разделена на три большие части: Европейская территория, Западная и Восточная Сибирь.

Второй тип регионов отвечает административному делению по федеральным округам (ФО) и субъектам РФ (при этом принимается во внимание относительная однородность климатических условий). В анализе рассматривается 13 административных регионов (рис. 7.5), полный список и принятые наименования которых приводятся в Приложении 7.1.

Наконец, для анализа изменений речного стока и его отдельных составляющих (раздел 7.5) выбраны девять крупных водосборов суши, расположенных на территории России и сопредельных стран (рис. 7.6).

В качестве *базового климатического периода* в настоящем докладе используется период 1980–1999 гг., который несколько отличается от базового климатического периода ВМО (1961–1990 гг.). Выбор указанного периода имеет ряд преимуществ: он в большей степени отвечает современному состоянию климатической системы; его про-

должительность совпадает с продолжительностью анализируемых временных интервалов в XXI веке (см. ниже), он целиком покрывается периодом наиболее надежных спутниковых наблюдений за характеристиками климата и, наконец, он близок 20-летнему периоду (1981–2000 гг.), использованному в докладе ACIA (Kattsov and Källén, 2005), и совпадает с соответствующим периодом ОД4 МГЭИК (Meehl et al., 2007).

Учитывая важность планирования мероприятий по адаптации к изменениям климата на ближайшую перспективу, будущие изменения климата рассматриваются в настоящей главе преимущественно для двух периодов: начало (2011–2030 гг.) и середина (2041–2060 гг.) XXI века. Однако в тех случаях, когда изменения некоторых важных характеристик климата оказываются недостаточно выраженными к середине века, их анализ проводится и для конца XXI века (2080–2099 гг.). В оценках, полученных с использованием РКМ, используются 10-летние периоды, что обусловлено значительной ресурсоемкостью региональных моделей.

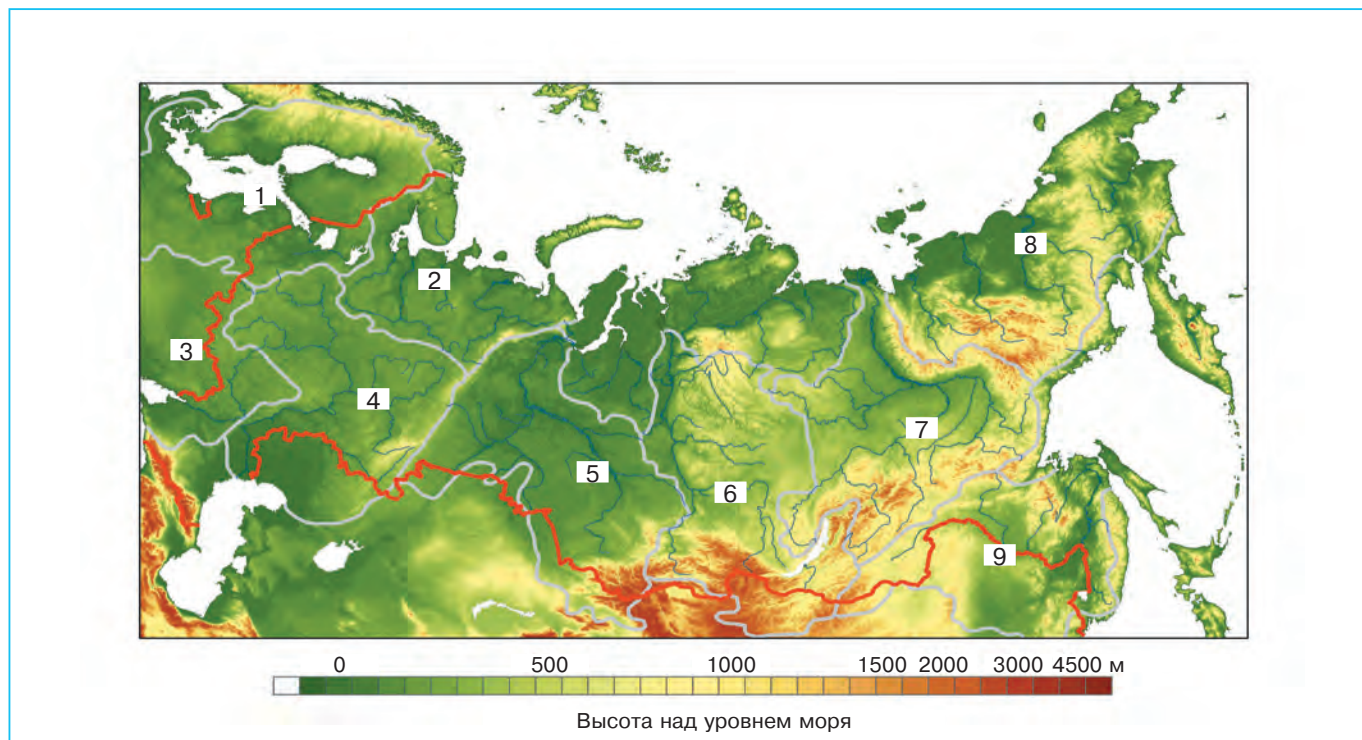


Рис. 7.6. Крупные водосборы на территории России и сопредельных стран. 1 — Балтийский; 2 — северные реки Европейской территории (реки Печора, Северная Двина, Мезень, Онега); 3 — южные реки (Днепр, Днестр, Дон, Кубань); 4 — Волга и Урал; 5 — Обь; 6 — Енисей; 7 — реки Восточной Сибири (Лена, Хатанга, Оленок); 8 — реки Чукотки (Инди́гирка, Яна, Колыма, Анадырь); 9 — Амур.

7.4. Термические и динамические характеристики климата

7.4.1. Средняя температура приземного воздуха

В работе (Мелешко и др., 2004б) представлены расчеты возможного потепления климата России в XXI веке, полученные по мультимодельному ансамблю, состоящему из 7 МОЦАО СМIP2, созданных во второй половине 1990-х годов и использованных в ОДЗ (IPCC, 2001). Расчеты показали, что значительная часть территории России, особенно арктические и субарктические регионы, будет находиться в области заметно большего потепления по сравнению с глобальным. Представляет интерес сравнить эти оценки с расчетами по ансамблю МОЦАО нового поколения — СМIP3 — для такого же сценария A2 (Мелешко и др., 2007б).

Среднее за год изменение температуры приземного воздуха на территории России к середине XXI века, рассчитанное по ансамблю МОЦАО СМIP3, оказывается на 0,8°C меньше по сравнению с СМIP2, а соответствующее стандартное отклонение, характеризующее межмодельный разброс, уменьшилось на 0,3°C (табл. 7.3). В ансамбле

СМIP3 среднее за год изменение температуры уменьшилось примерно на одинаковую величину зимой и летом, а стандартное отклонение уменьшилось преимущественно зимой. К концу XXI века потепление климата России, рассчитанное по ансамблю МОЦАО СМIP3, оказалось меньшим на 1,2°C. Различия среднего за год потепления климата между ансамблями МОЦАО СМIP3 и СМIP2 становятся статистически значимыми на уровне 5% во второй половине XXI века.

Ожидаемое потепление зависит от времени года и региона (рис. 7.7). В течение XXI века все без исключения модели дают потепление климата на всей территории России. Наибольшее потепление ожидается зимой, и оно будет увеличиваться в направлении к северу, достигая максимальных значений в Арктике. Летом, наоборот, потепление в высоких широтах минимально, поскольку температура приземного воздуха удерживается вблизи точки таяния морского льда. Наиболее заметное потепление летом происходит на континентальной части России. Аналогичная картина была получена ранее (Мелешко и др., 2004б), хотя, как отмечалось выше, оценки потепления на территории России были несколько большими.

Таблица 7.3. Средние изменения температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и их стандартные отклонения зимой, летом и за год в середине XXI века (2041–2060 гг.), рассчитанные для территории России по ансамблю МОЦАО двух поколений: СМIP2 (7 моделей) и СМIP3 (16 моделей). Сценарий А2

МОЦАО	Зима	Лето	Год
СМIP2	$4,1 \pm 1,3$	$2,6 \pm 0,9$	$3,4 \pm 1,0$
СМIP3	$3,4 \pm 0,8$	$1,9 \pm 0,7$	$2,6 \pm 0,7$

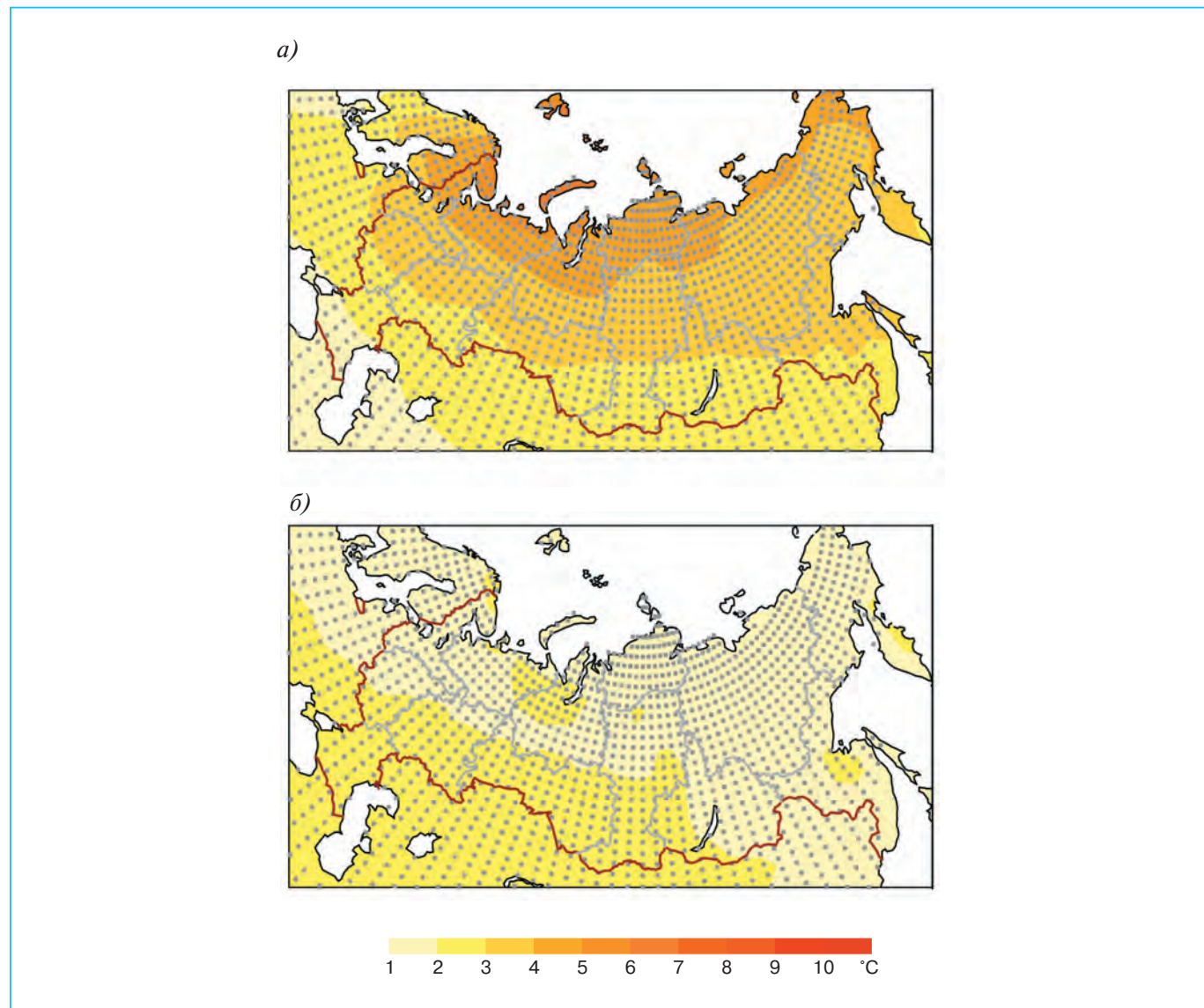


Рис. 7.7. Изменения температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на территории России зимой (а) и летом (б) к середине XXI века (2041–2060 гг.), рассчитанные по ансамблю МОЦАО СМIP3 для сценария А2. Точками обозначены области, в которых отношение среднего изменения температуры к стандартному отклонению, характеризующему межмодельный разброс, больше единицы.

Ранее было показано (см. раздел 6.3), что тренды средней годовой температуры приземного воздуха для всей России за период 1980–2005 гг., полученные по данным наблюдений и модельных расчетов, хорошо согласуются между собой и со-

ставляют примерно $0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет. Такое соответствие трендов позволяет считать достаточно достоверными модельные оценки изменений этой характеристики на ближайшую перспективу.

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Таблица 7.4. Изменения температуры приземного воздуха (°C) и межмодельные стандартные отклонения зимой и летом к 2011–2030 гг. и к 2041–2060 гг., рассчитанные для федеральных округов и крупных регионов России по ансамблю из 16 МОЦАО СМIP3. Сценарий А2. Жирным шрифтом отмечены значения, в которых стандартное отклонение меньше среднего изменения температуры

Федеральный округ, крупный регион	2011–2030 гг.		2041–2060 гг.	
	зима	лето	зима	лето
1 Северо-Западный, запад	1,6 ± 1,1	0,9 ± 0,6	4,1 ± 0,9	1,8 ± 1,0
2 Центральный	1,0 ± 1,0	1,0 ± 0,5	3,1 ± 1,0	2,0 ± 0,8
3 Приволжский	0,9 ± 0,9	0,9 ± 0,5	3,0 ± 0,9	2,1 ± 0,7
4 Южный	0,6 ± 0,7	1,0 ± 0,5	2,0 ± 0,8	2,4 ± 0,6
5 Северо-Западный, восток	1,7 ± 1,2	0,9 ± 0,6	4,3 ± 1,1	2,0 ± 1,0
6 Уральский (юг), Сибирский (юго-запад)	1,1 ± 0,8	0,9 ± 0,5	3,0 ± 1,0	2,1 ± 0,7
7 Сибирский (север)	1,7 ± 1,1	0,7 ± 0,6	4,4 ± 1,4	1,7 ± 0,9
8 Сибирский (юго-восток)	1,3 ± 0,6	0,8 ± 0,5	2,9 ± 0,9	2,0 ± 0,8
9 Уральский (север)	1,6 ± 1,1	0,8 ± 0,5	4,0 ± 1,1	2,0 ± 0,9
10 Сибирский (центр и юг)	1,3 ± 0,7	0,9 ± 0,5	3,2 ± 1,0	2,0 ± 0,8
11 Дальневосточный (северо-запад и центр)	1,5 ± 0,7	0,7 ± 0,4	3,7 ± 1,1	1,7 ± 0,7
12 Дальневосточный (северо-восток)	1,8 ± 0,8	0,7 ± 0,6	3,7 ± 1,0	1,7 ± 0,9
13 Дальневосточный (юго-восток)	1,3 ± 0,5	0,8 ± 0,5	3,1 ± 0,8	1,9 ± 0,8
14 ЕТР	1,2 ± 0,9	0,9 ± 0,4	3,4 ± 0,9	2,1 ± 0,7
15 Западная Сибирь	1,4 ± 0,7	0,8 ± 0,5	3,4 ± 1,0	2,0 ± 0,8
16 Восточная Сибирь	1,5 ± 0,6	0,7 ± 0,4	3,6 ± 0,9	1,7 ± 0,7
17 Россия	1,4 ± 0,7	0,8 ± 0,4	3,4 ± 0,8	1,9 ± 0,7

В начале XXI века в отдельных административных регионах России среднее потепление климата незначительно превышает или оказывается равным межмодельному разбросу по ансамблю МОЦАО зимой и летом. К середине XXI века изменения температуры начинают заметно превышать межмодельный разброс на всей территории России даже в холодное время года, когда собственная изменчивость этой характеристики особенно велика (табл. 7.4).

7.4.2. Экстремальность температурного режима

Будущие изменения экстремальности температурного режима рассчитывались по ансамблю из 9 МОЦАО, для которых ранее оценивалась успешность расчета индексов экстремальности современного климата (см. раздел 5.8.2), а также с использованием РКМ ГГО (Школьник и др., 2006).

К середине XXI века произойдет повышение наиболее низких в году суточных минимумов температуры приземного воздуха (годовых минимумов температуры) на всей территории России. При этом наибольшее их увеличение (4–6°C) ожидается на юге и северо-западе Европейской территории России. В центральных районах ЕТР, на Урале и в

Восточной Сибири увеличение самой низкой в году суточной температуры составит 2–4°C.

Пространственные особенности изменения средней за зиму температуры к середине XXI века качественно отличаются от изменения годовых минимумов температуры — наибольшее увеличение средней температуры зимой ожидается не на ЕТР, как в случае с годовым минимумом, а в Сибири и на Крайнем Севере, где изменения годовых минимумов сравнительно малы.

Исследования изменчивости средней за сутки и минимальной суточной температуры с помощью климатических моделей показали (Hegerl et al., 2004; Школьник и др., 2006; Kharin et al., 2007), что в умеренных и высоких широтах наибольший вклад в повышение температуры зимой вносит смещение вероятностных распределений в сторону больших значений нижних процентилях (близких к годовому минимуму). Оно заметно превосходит смещение средних значений и тем более — верхних процентов. При этом следует ожидать увеличения асимметрии распределения температуры, а также уменьшения межквартильного размаха, изменчивости зимних распределений температуры и экстремальности термического режима зимой (рис. 7.8). Области наиболее значительных изменений удовлетворительно согласуются с районами, где прогно-

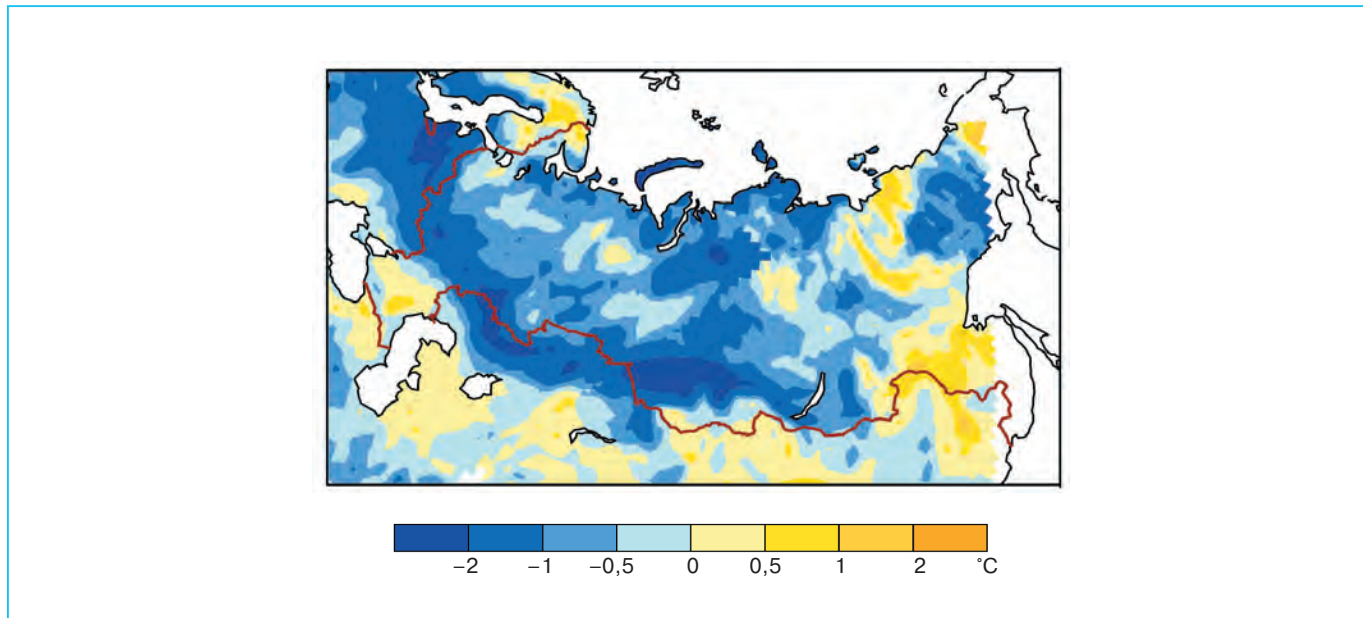


Рис. 7.8. Изменение межквартильного размаха среднесуточной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) зимой к середине XXI века на ЕТР и прилегающих регионах Евразии. Оценки получены с помощью РКМ ГГО (Школьник и др., 2006). Уменьшение межквартильного размаха среднесуточной температуры воздуха зимой свидетельствует об уменьшении числа случаев с экстремально низкой температурой при потеплении климата, обусловленном не только повышением среднесуточной температуры, но и отрицательным трендом ее изменчивости.

зируется существенное сокращение продолжительности залегания снежного покрова (см. раздел 7.6.1).

Увеличение наиболее высоких в году суточных максимумов температуры приземного воздуха к середине XXI века на всей территории России будет меньшим, чем рост ее годовых минимумов. На большей части России изменения годового максимума температуры не превысят 3°C . На Северном Кавказе повышение средней за лето температуры оказывается несколько меньшим по сравнению с увеличением годовых максимумов, что указывает на увеличение изменчивости температуры и соответственно на большую по сравнению с концом XX века экстремальность термического режима.

Изменения годовых минимумов температуры оказываются значимыми на уровне 5% практически на всей территории России. В то же время изменения годовых максимумов на Европейской территории России не достигают этого уровня значимости.

К середине XXI века разность между самой низкой и самой высокой суточной температурой в году (годовая амплитуда экстремальной температуры) уменьшается на всей территории России, особенно на ее европейской части (рис. 7.9).

В середине XXI века ожидается сокращение на 6–8 суток эпизодов с экстремально низкой температурой зимой на северо-западе России и на Крайнем Севере. Заметное уменьшение числа эк-

стремально холодных суток в году также будет происходить на побережье Тихого океана с одновременным уменьшением числа суток с температурой ниже 0°C (рис. 7.10). В Центральной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке число морозных дней уменьшится на 10–15, а на Европейской территории — на 15–30.

На фоне общего потепления климата России будет происходить увеличение числа дней с суточной температурой выше 90-й перцентили по отношению к летнему распределению в базовый период. Увеличится число дней с экстремально высокой суточной температурой на Крайнем Севере (5–10 суток) и в черноземной полосе России (10–20 суток). На Северном Кавказе увеличится продолжительность эпизодов с экстремально высокой температурой (на 20 суток и более). Одновременно будет возрастать длительность непрерывных периодов с максимальной суточной температурой выше 90-й перцентили. На большей части Сибири это увеличение составит 2–4 суток, а на Северо-Западе, в Центрально-Черноземном районе и на Северном Кавказе — 3–5 суток.

Приведенные оценки изменения экстремальности термического режима качественно согласуются с тенденциями его изменения по данным наблюдений во второй половине XX века (Frich et al., 2002; Alexander et al., 2006).

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

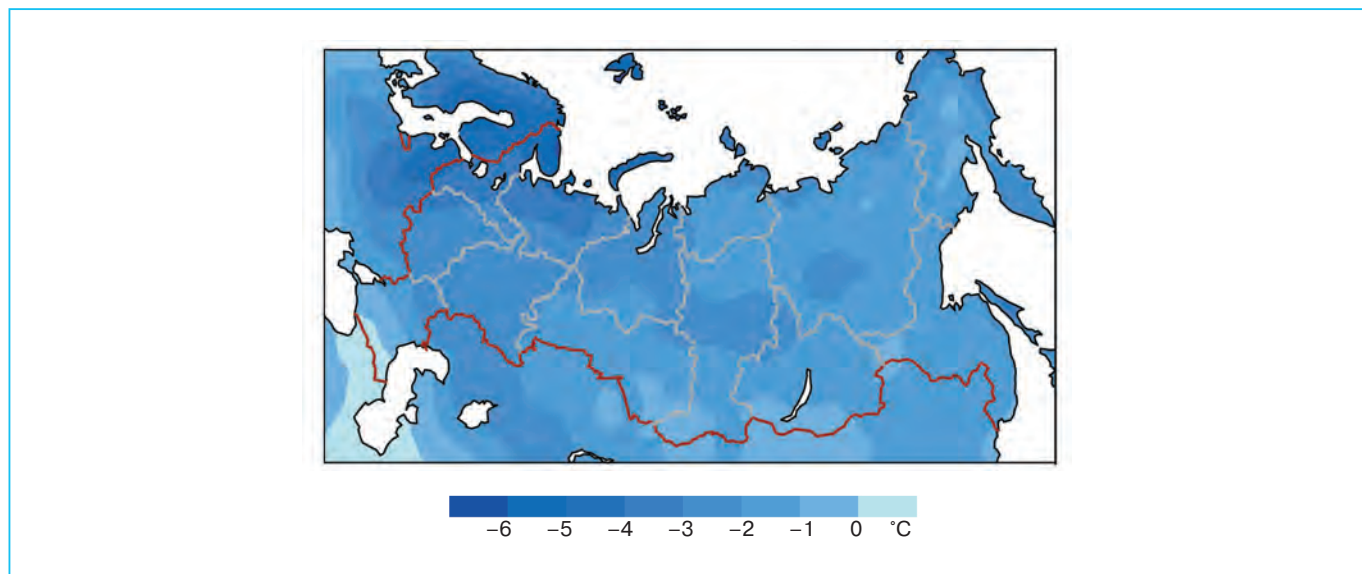


Рис. 7.9. Изменения годовой амплитуды экстремальных значений температуры (разность между суточными максимумом летом и минимумом зимой, °C) к середине XXI века, рассчитанные по ансамблю из 9 МОЦАО для сценария А2.

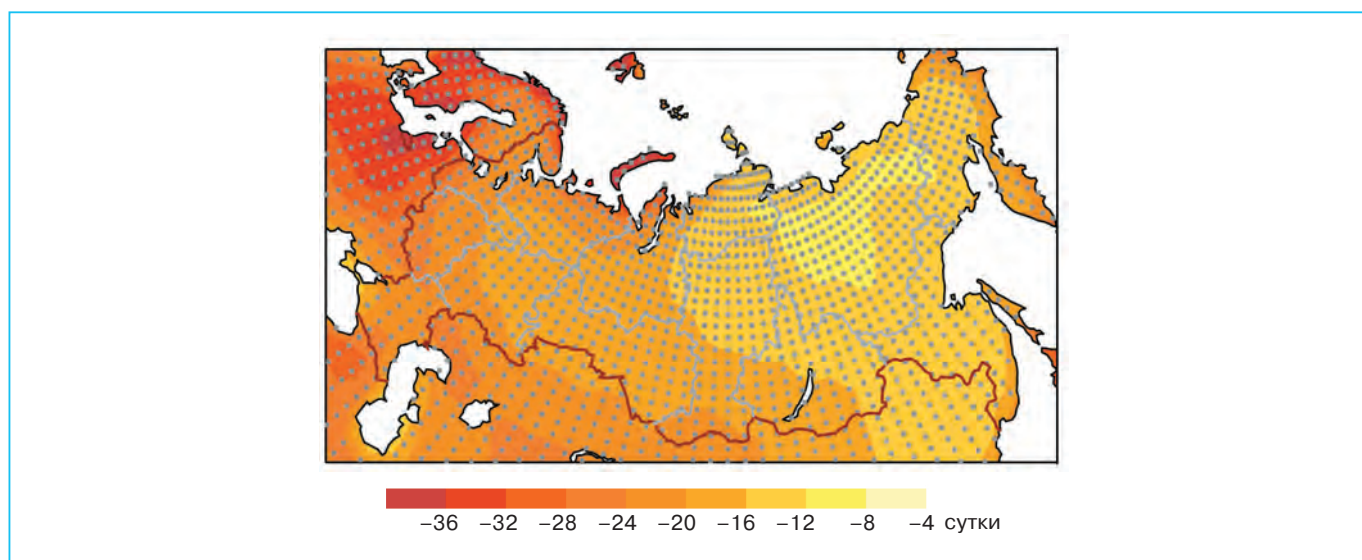


Рис. 7.10. Уменьшение числа суток с морозом в году в середине XXI века, рассчитанное по ансамблю из 9 МОЦАО для сценария А2. Точками обозначены узлы сетки, в которые средние изменения числа суток с морозом по ансамблю больше, чем межмодельный разброс. Определение числа суток с морозом см. в Приложении 1.

7.4.3. Давление на уровне моря и циркуляция атмосферы

Изменения климата России в последние десятилетия проявляются не только в изменениях температуры приземного воздуха, но и в других характеристиках, включая изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции континентального и субконтинентального масштабов. Анализ

изменения межгодовой изменчивости давления на уровне моря, которая определяет долговременные колебания режимов атмосферной циркуляции, показывает (Мелешко и др., 2007б), что в начале и, особенно, в середине XXI века на Южном Урале, в Северном Казахстане и далее на восток устанавливается область более высокой межгодовой изменчивости давления зимой (рис. 7.11). С другой стороны, на севере Центральной

и Восточной Сибири возникает другая обширная область, также вытянутая на восток, в которой изменчивость давления уменьшается. В целом это означает, что при потеплении климата происходит смещение сибирского антициклона к северу. Важно отметить, что большинство из 16 МОЦАО воспроизводят обе указанные области изменения межгодовой изменчивости давления.

Временные вариации среднесуточных полей давления на уровне моря являются важными показателями интенсивности и повторяемости синоптических процессов. В разделе 5.8.3 приведены оценки качества расчета современными МОЦАО изменчивости среднесуточных полей давления на территории России в конце XX века. С использованием того же ансамбля из 9 МОЦАО получены

стандартные отклонения давления на уровне моря зимой и летом в середине XXI века.

Анализ показал, что из-за существенного межмодельного разброса изменчивости давления получить однозначную картину будущих изменений статистики синоптических процессов с помощью данного ансамбля МОЦАО затруднительно. Как зимой, так и летом отношение трендов стандартного отклонения давления (сигнал), полученного по ансамблю МОЦАО, к межмодельному разбросу (шум) оказывается меньше единицы практически на всей территории России. Следует отметить, что тренды изменчивости давления по результатам отдельных моделей и в целом по ансамблю составляют преимущественно меньше 5% величины изменчивости давления. По-видимому, к середине

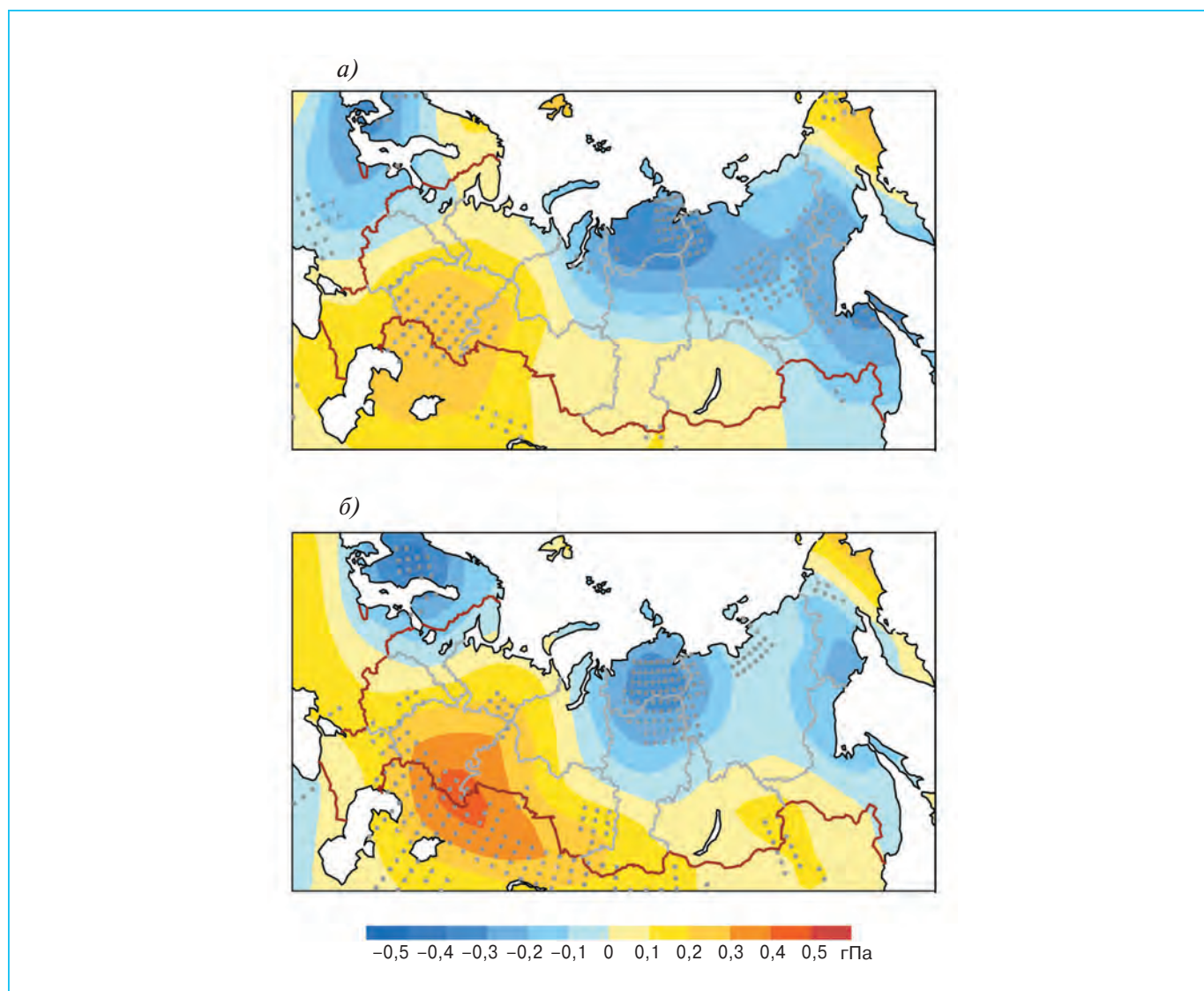


Рис. 7.11. Изменения межгодовой изменчивости атмосферного давления на уровне моря (гПа) зимой к середине (а) и концу (б) XXI века. Точками выделены области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

XXI века заметных изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции на территории России ожидать не следует.

С другой стороны, согласно расчетам по отдельным моделям, при потеплении климата в Северном полушарии уменьшается повторяемость циклонов, но возрастает их интенсивность (Carnell and Senior, 1998; Geng and Sugi, 2003) и происходит смещение их путей движения к северу (Yin, 2005).

7.4.4. Облачность и солнечная радиация

В оценках изменения количества общей облачности на территории России использовались расчеты с помощью 12 МОЦАО. Анализ расчетов показывает (Мелешко и др., 2008б), что к середине XXI века ожидается некоторое увеличение об-

щей облачности зимой и ее уменьшение летом на всей территории России (рис. 7.12). Модели показывают значительный межмодельный разброс этих изменений, который сопоставим по абсолютной величине со средними по ансамблю МОЦАО изменениями. Поэтому интерпретация и использование этих данных в импактных исследованиях требуют осторожности.

Для оценки изменения гелиоэнергетического потенциала интересно оценить, насколько изменится приходящий на подстилающую поверхность Земли поток солнечной радиации. Эти изменения могут быть связаны с изменениями облачности и прозрачности атмосферы в результате изменения влагосодержания атмосферы, а также концентрации аэрозоля, в соответствии с принятым сценарием. Особый интерес представляют

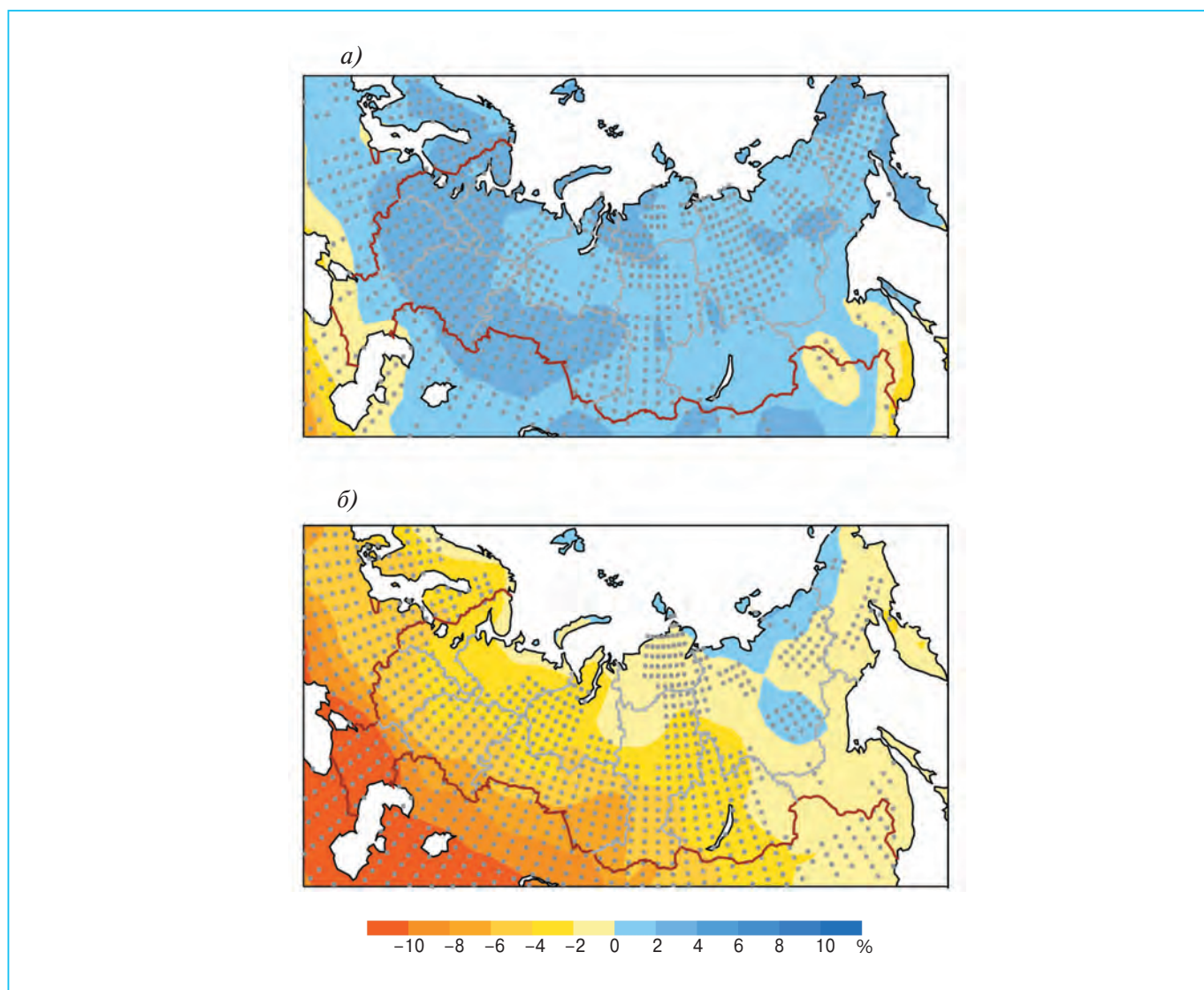


Рис. 7.12. Изменения количества общей облачности (%) на территории России зимой (а) и летом (б) к середине XXI века, рассчитанные по ансамблю МОЦАО для сценария А2. Точками выделены области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.

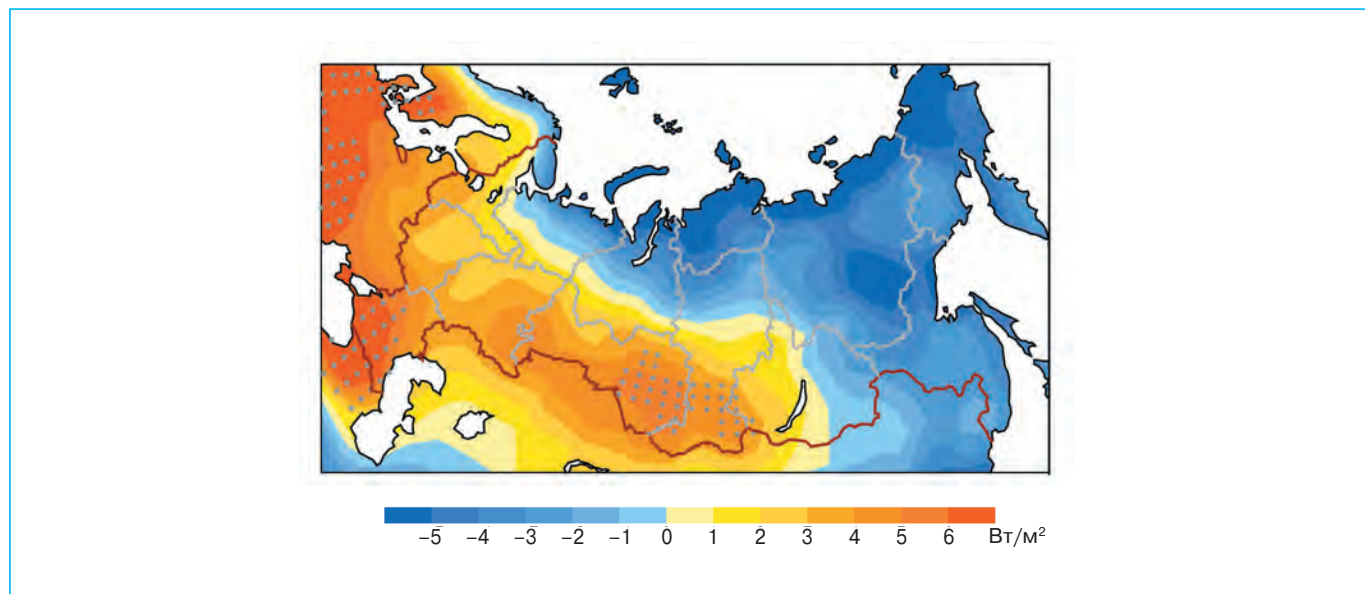


Рис. 7.13. Изменения потока солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$), приходящей на поверхность земли летом, к середине XXI века, рассчитанные по ансамблю из 15 МОЦАО. Точками выделены области, в которых отношение среднего по ансамблю МОЦАО изменения к межмодельному стандартному отклонению больше единицы.

летние условия, поскольку зимой на территории России приток солнечной радиации к подстилающей поверхности невелик. На рис. 7.13 показаны изменения солнечной радиации к середине XXI века. Поток солнечной радиации увеличится на $4\text{--}5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в южных регионах вплоть до Байкала. Однако лишь на юге Сибири среднее изменение потока оказывается большим, чем межмодельное стандартное отклонение.

7.5. Влагообмен между атмосферой и подстилающей поверхностью

7.5.1. Средние атмосферные осадки

В XXI веке осадки на территории России в целом будут возрастать, причем наиболее значительный их рост придется на зиму (табл. 7.5) (Мелешко и др., 2008б). Это вызвано ростом влагоемкости атмосферы зимой и интенсификацией

гидрологического цикла летом. По сравнению с МОЦАО СМIP2 (Мелешко и др., 2004б) средний рост осадков и их межмодельный разброс во все сезоны в ансамбле СМIP3 получились несколько меньше.

Географические распределения будущих изменений осадков зимой и летом сильно различаются между собой (рис. 7.14). Зимой увеличение количества осадков ожидается на всей территории России. Если в начале XXI века оно мало, то к середине века оказывается существенным, с максимальными значениями в восточных и северных регионах России. Летом увеличение количества осадков заметно меньше зимнего. К середине XXI века выделяются области уменьшения осадков на юге ЕТР и в южных районах Сибири. Увеличение летом осадков ожидается только на севере и востоке России. С запада на восток вдоль южных границ России протянулась зона, отделяющая области значительного увеличения осадков на севере от области их уменьшения на юге. В этой промежу-

Таблица 7.5. Средние изменения осадков (%) и межмодельные стандартные отклонения зимой, летом и за год на территории России к середине XXI века, рассчитанные по ансамблю СМIP2 (7 МОЦАО) и СМIP3 (16 МОЦАО). Сценарий A2

МОЦАО	Зима	Лето	Год
СМIP2	16 ± 7	6 ± 4	10 ± 3
СМIP3	14 ± 5	4 ± 3	8 ± 2

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

точной зоне оценки изменения осадков малы по абсолютной величине и имеют разные знаки (число моделей, дающих изменения одного знака, не достигает двух третей от их общего числа). С другой стороны, выделяются обширные области, в которых более двух третей МОЦАО показывают изменения осадков одного знака.

В большинстве административных регионов России средние изменения количества осадков зимой и летом сравнимы по величине с их межмодельным разбросом (стандартными отклонениями) в начале XXI века (табл. 7.6). И только к середине века изменения осадков зимой начинают заметно

превышать межмодельный разброс, особенно на востоке России. Летом стандартные отклонения осадков остаются достаточно высокими и, как правило, превышают средние изменения в большинстве регионов даже в середине XXI века.

Летом на фоне увеличения суммарных осадков во многих регионах будут увеличиваться конвективные и уменьшаться осадки из облаков слоистых форм. Области наибольшей интенсификации конвекции становятся достаточно хорошо выраженными лишь к середине XXI века (рис. 7.15). Более двух третей моделей показывают тенденцию увеличения конвективных осадков, кото-

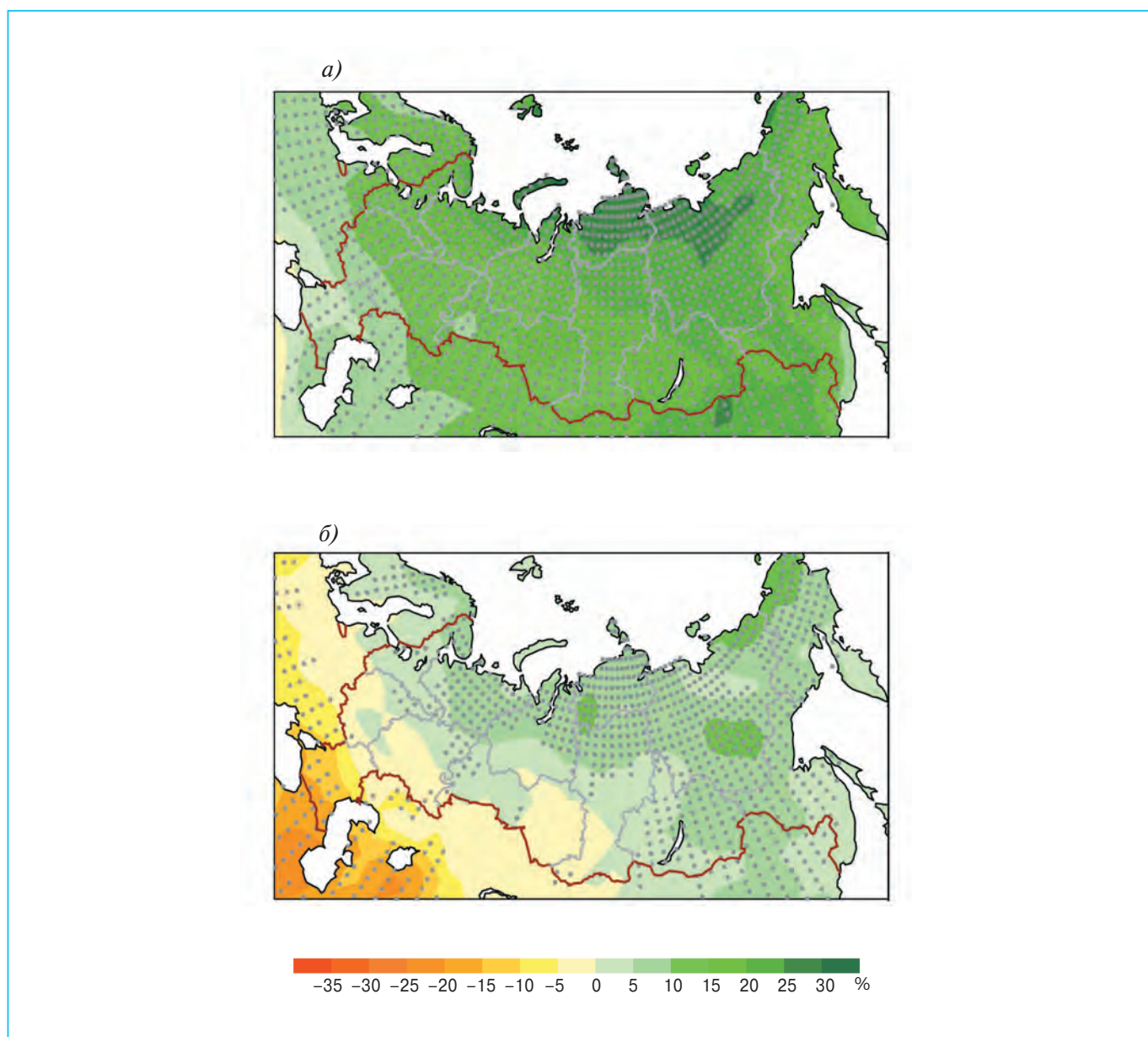


Рис. 7.14. Изменения суммарных (жидких и твердых) осадков (%) зимой (а) и летом (б) к середине XXI века, рассчитанные по ансамблю из 16 МОЦАО для сценария А2. Серыми точками обозначены области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.

Таблица 7.6. Изменения (%) осадков и межмодельные стандартные отклонения зимой и летом к 2011–2030 гг. и к 2041–2060 гг., рассчитанные для федеральных округов и крупных регионов России по ансамблю из 16 МОЦАО СМIP3. Сценарий А2

Федеральный округ, крупный регион	2011–2030 гг.		2041–2060 гг.	
	зима	лето	зима	лето
Северо-Западный (запад)	6 ± 4	2 ± 6	14 ± 6	4 ± 7
Центральный	4 ± 5	–5 ± 8	11 ± 7	–8 ± 9
Приволжский	3 ± 4	1 ± 6	11 ± 8	–0 ± 8
Южный	3 ± 4	–3 ± 7	5 ± 7	–11 ± 12
Северо-Западный (восток)	6 ± 5	4 ± 4	17 ± 8	6 ± 6
Уральский (юг), Сибирский (юго-запад)	6 ± 4	0 ± 5	13 ± 8	–0 ± 6
Сибирский (север)	10 ± 9	4 ± 5	25 ± 10	7 ± 5
Сибирский (юго-восток)	9 ± 6	1 ± 3	19 ± 9	5 ± 4
Уральский (север)	5 ± 5	3 ± 5	15 ± 8	5 ± 8
Сибирский (центр и юг)	8 ± 5	1 ± 2	17 ± 9	3 ± 4
Дальневосточный (северо-запад и центр)	10 ± 5	4 ± 5	24 ± 8	7 ± 5
Дальневосточный (северо-восток)	9 ± 7	2 ± 5	17 ± 8	7 ± 7
Дальневосточный (юго-восток)	10 ± 10	1 ± 3	16 ± 9	5 ± 4
ЕТР	4 ± 3	1 ± 4	11 ± 5	1 ± 5
Западная Сибирь	7 ± 4	1 ± 1	16 ± 8	4 ± 3
Восточная Сибирь	10 ± 3	3 ± 3	19 ± 7	6 ± 4
Россия	6 ± 3	2 ± 1	14 ± 5	4 ± 3

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, в которых стандартное отклонение меньше среднего изменения.

Таблица 7.7. Изменения (%) суммарных (СМО) и конвективных (КВО) осадков на Европейской территории России, в Западной и Восточной Сибири, рассчитанные для лета 2041–2060 гг. и 2080–2099 гг.

Период, годы	ЕТР		Западная Сибирь		Восточная Сибирь	
	СМО	КВО	СМО	КВО	СМО	КВО
2041–2060	1 ± 5	4 ± 6	4 ± 3	6 ± 5	6 ± 4	4 ± 5
2080–2099	0 ± 8	4 ± 9	7 ± 6	12 ± 8	14 ± 7	11 ± 9

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, в которых стандартное отклонение меньше среднего изменения.

рое в среднем по ансамблю составляет 5–10% на значительной территории России. Это означает, что следует ожидать увеличения повторяемости таких опасных явлений погоды, как грозы, 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 (табл. 7.7), указывая тем самым на неопределенность оценок. Сравнение рис. 7.14 и рис. 7.15 дает основание полагать, что увеличение летом суммарных осадков на севере Европейской России, в Западной и Восточной Сибири будет обусловлено преимущественным увеличением конвективных осадков.

7.5.2. Экстремальные осадки

Помимо расчета ожидаемых в будущем изменений среднего количества осадков разных типов, чрезвычайно важно получить оценки изменения осадков большой интенсивности (т. е. > 90-й процентиля вероятностных функций распределения суточных сумм осадков).

Летом в середине XXI века практически на всей территории России следует ожидать увеличения осадков большой интенсивности — на 2–6% по отношению к их интенсивности в конце XX века. Увеличение экстремальных осадков в южных регионах России будет происходить одновременно с уменьшением числа случаев с такими

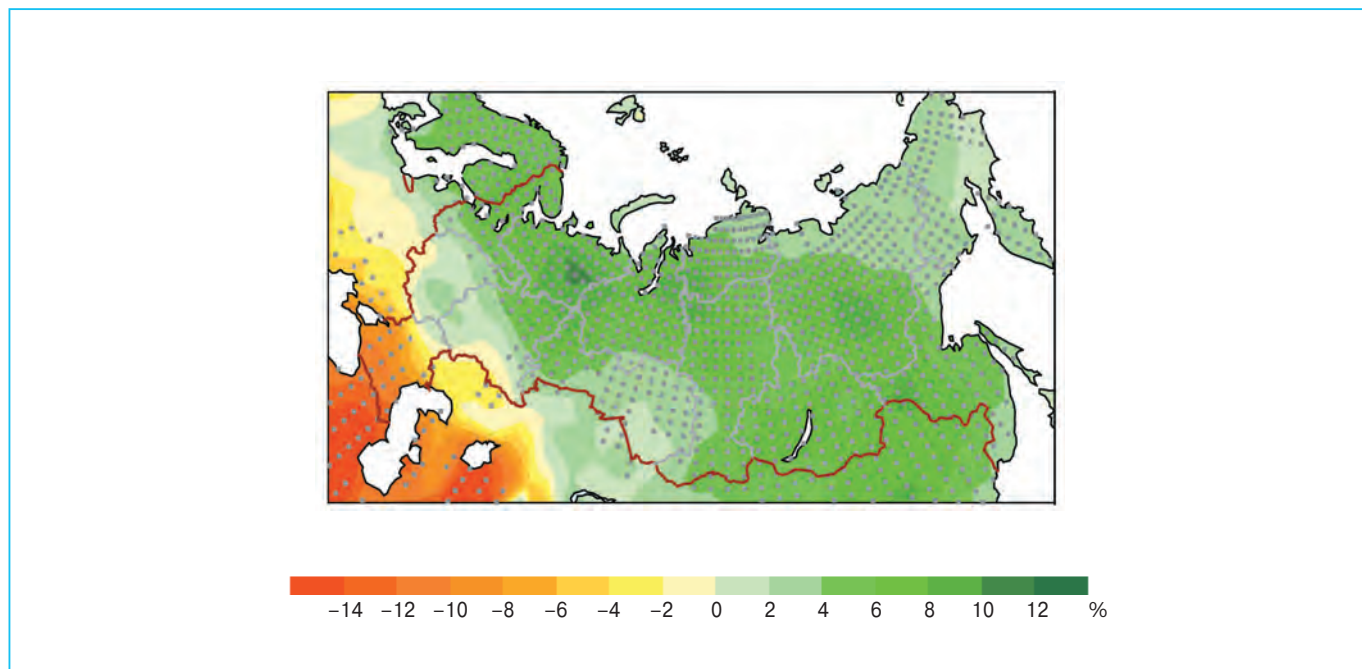


Рис. 7.15. Изменения конвективных осадков (%) на территории России летом к середине XXI века, рассчитанные по ансамблю МОЦАО для сценария А2. Точками выделены области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.

осадками на фоне усиления там засушливых условий. Однако из-за большого модельного разброса достоверность изменений интенсивных осадков оказывается низкой.

Увеличение зимой осадков средней интенсивности обусловлено увеличением преимущественно их умеренной интенсивности, особенно на территории Сибири. Таким образом, на фоне общего увеличения количества осадков к середине XXI века зимой интенсивность осадков окажется менее экстремальной по сравнению с концом XX века. Согласованность между моделями в оценке изменений осадков разной интенсивности зимой оказывается заметно большей, чем летом. Эти оценки согласуются с полученными ранее для предыдущего поколения МОЦАО (см., например, (Мохов и др., 2003)).

7.5.3. Годовой сток

С начала 1990-х годов выполнено большое число исследований, в которых в связи с наблюдаемым потеплением климата оценивались изменения стока рек в разных регионах земного шара, включая территорию России (Винников и др., 1990; Шикломанов, 1994; Шикломанов, Георгиевский, 1995, 2002; Георгиевский и др., 1996; Мохов, Хон, 2002; Мохов и др., 2003; Манабе и Везеролд, 2003; Мелешко и др., 2004а, 2004б; Борзен-

кова, Лемешко, 2005; Walsh et al., 2002; Elguindi and Giorgi, 2007; Kattsov et al., 2007; Мелешко и др., 2007б). В этих исследованиях использовались разные по степени сложности и физической полноте методы расчета гидрологического режима отдельных речных бассейнов и регионов: сравнительно простые эмпирические модели, воднобалансовые модели и МОЦАО разного пространственного разрешения, включающие также встроенные в них региональные модели высокого разрешения. Большинство расчетов для территории России показывает, что при потеплении глобального климата ожидается дальнейшее увеличение водных ресурсов в тех регионах, где существует достаточное или избыточное увлажнение. Уменьшение водных ресурсов будет происходить в регионах, где водообеспеченность в настоящее время оказывается предельной или недостаточной. При этом во всех крупных реках бассейна Северного Ледовитого океана при всех сценариях ожидается увеличение годового стока. Вместе с тем количественные оценки этих изменений на территории России различаются между собой в зависимости как от принятых сценариев потепления климата, так и от качества используемых моделей.

В разделе 7.1 отмечалось, что вплоть до середины XXI века изменения основных климатических характеристик на территории России, вклю-

чая составляющие гидрологического режима, мало зависят от сценариев эмиссий. С другой стороны, установлено, что расчетные изменения будущего стока для отдельных бассейнов могут существенно зависеть от выбора исходных параметров конкретной МОЦАО (температуры и влажности воздуха, осадков). Поэтому при регионализации (даунскейлинге) расчетов составляющих водного баланса, по-видимому, целесообразно в качестве исходных параметров использовать ансамблевые оценки с учетом их межмодельного разброса.

В последние годы широкое распространение получили непосредственные расчеты изменений гидрологического режима, вызванных потеплением климата, на крупных водосборах рек разных регионов земного шара непосредственно с помощью сложных физико-математических моделей (Арпе и др., 2002; Мохов, Хон, 2002; Манабе, Везерольд, 2003; Arnell, 2003; Мелешко и др., 2004а, 2004б; Walsh et al., 2002; Kattsov et al., 2007).

В настоящее время стали широко применяться глобальные и региональные модели климата высокого пространственного разрешения, в которых детально учитываются воднофизические характеристики почвогрунтов и в явном виде описывается горизонтальный перенос воды с учетом склоновой и русловой трансформации стока, что позволяет более реалистично оценивать изменения внутригодового стока и проводить его валидацию на выбранных створах (Hagemann and Dümenil, 1998).

Вследствие неточностей описания основных климатообразующих обратных связей, а также различий модельных описаний радиационных, тепло- и воднофизических характеристик почвы, свойств растительного покрова и др. расчеты изменений климата по разным моделям могут заметно различаться между собой. Для переменных гидрологического цикла, таких как осадки, сток, влажность почвы и др., эти различия могут быть весьма значительными. Заметный вклад в них вносит также межгодовая естественная изменчивость климата, которая присутствует в осредненных за 20 лет единичных расчетах (см. главу 6). Это обнаруживается в ансамблевых расчетах по одной МОЦАО от разных начальных условий. Чтобы минимизировать неопределенности такого рода, расчеты и анализ изменения климата целесообразно проводить по мультимодельному ансамблю (см. раздел 5.5).

В работе (Мелешко и др., 2004б) выполнен расчет среднего по ансамблю из 5 МОЦАО изменения годового стока на семи водосборах России и сопредельных территориях. Сток оценивался по разности между средними за год осадками и испа-

рением — сначала для каждой МОЦАО в отдельности, а затем в среднем по ансамблю. Показано, что на большинстве рассмотренных водосборов к середине XXI века следует ожидать увеличение стока. Так, на водосборе северных рек (Печора, Северная Двина, Мезень) годовой сток увеличится на 4%; на реках Обь, Енисей, Лена его увеличение составит соответственно 1, 5 и 11%. С другой стороны, в бассейнах рек Днепра и Дона годовой сток уменьшится на 3%. На всех водосборах получен большой межмодельный разброс оценок. В результате только на трех из них (бассейн северных рек, Енисей и Лена) увеличение годового стока к середине XXI века статистически значимо на уровне 5%.

В архиве модельных данных ОД4 МГЭИК (см. раздел 5.6), помимо месячных полей осадков разных форм и испарения, по которым ранее рассчитывался средний за год сток, содержатся также месячные поля локального стока поверхностных и грунтовых вод (дренаж) и скорости таяния снежного покрова. Эти данные позволяют определить внутригодовые изменения некоторых важных характеристик гидрологического режима.

На большей части территории России и особенно в Сибири заметное увеличение стока ожидается уже в начале XXI века (рис. 7.16). В южных регионах Европейской территории России и сопредельных стран наблюдается тенденция к уменьшению стока, особенно выраженная на Украине и Северном Кавказе. В южном бассейне, включающем водосборы Днепра, Дона и Днестра, следует ожидать уменьшения годового стока вследствие уменьшения годовых сумм осадков и увеличения испарения весной и летом.

Используемый ансамбль МОЦАО демонстрирует большой разброс оценок стока. Чтобы получить более полное представление об основных тенденциях изменения стоков при наличии большого межмодельного разброса, в табл. 7.8 приводятся изменения годового стока для конца XXI века.

В начале XXI века стандартные отклонения изменений стока на многих водосборах сравнимы со средними по ансамблю изменениями. Однако к середине века на некоторых водосборах, в первую очередь Лены, Енисея, северных и чукотских рек, изменения годового стока превышают значения межмодельного разброса. На большинстве водосборов изменения стока статистически значимы на уровне 5%. Лишь для водосбора Волги и Урала изменения стока оказались незначимыми, поскольку через этот водосбор проходит граница, разделяющая области увеличения и уменьшения годового стока.

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Таблица 7.8. Среднее за год изменение стока в начале (2011–2030 гг.), середине (2041–2060 гг.) и конце (2080–2099 гг.) XXI века, рассчитанное по ансамблю из 13 МОЦАО

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

Примечание. Изменения стока и межмодельные стандартные отклонения от среднего по ансамблю МОЦАО даны в процентах по отношению к базовому периоду (1980–1999 гг.). Сценарий А2. Жирным шрифтом помечены значения, при которых средние изменения больше стандартного отклонения ($\pm\sigma$), полученного по ансамблю.

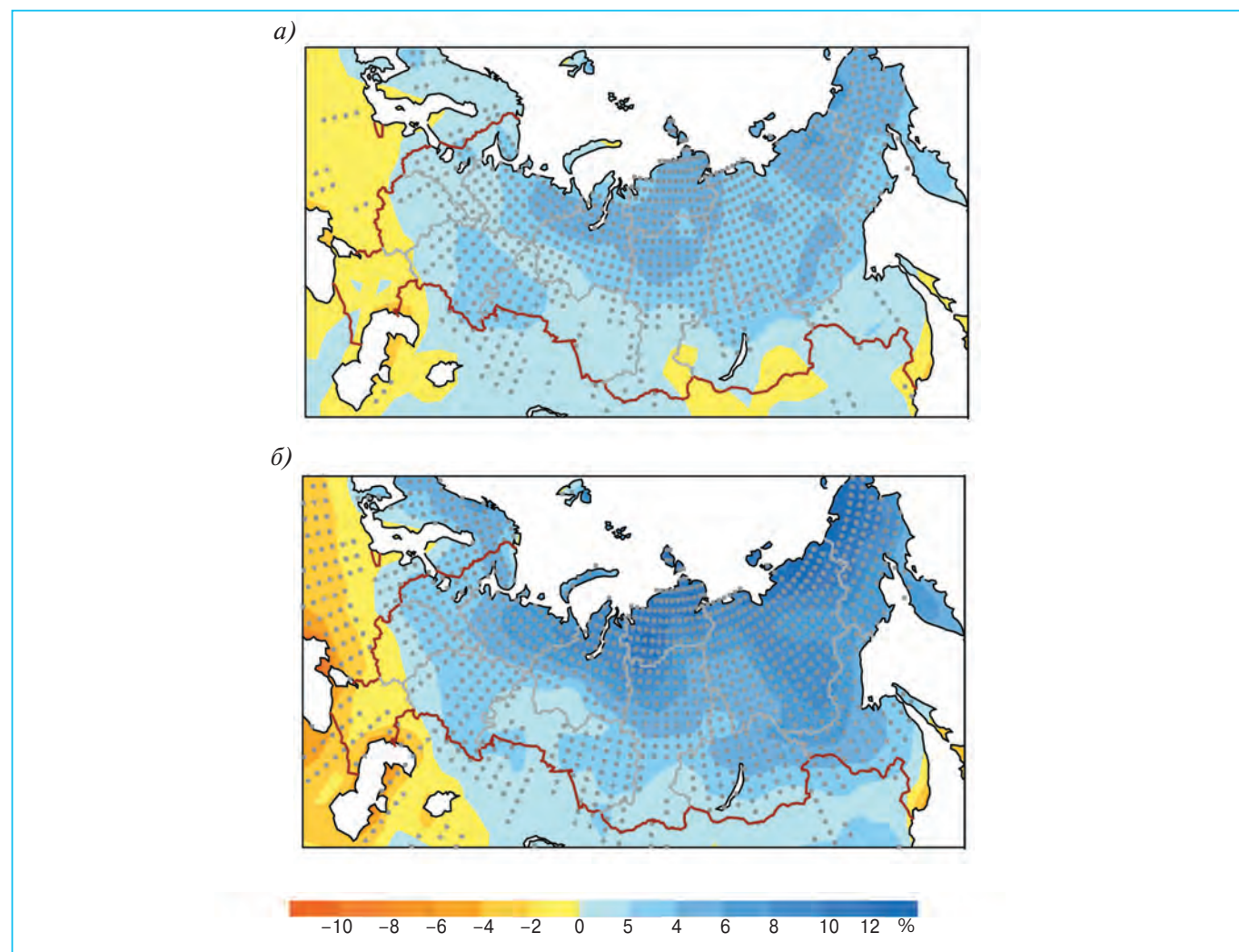


Рис. 7.16. Изменения среднего за год стока (%) в 2011–2030 гг. (а) и 2041–2060 гг. (б) с учетом сценария А2. Точками выделены области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.

Блок 7.2. Изменения уровня Каспийского моря под влиянием глобального потепления климата

Каспийское море является уникальным по своим природным ресурсам бессточным водоемом. На протяжении прошлого столетия уровень моря был подвержен значительным колебаниям, что приводило к серьезным экономическим и экологическим последствиям в прибрежной зоне и на акватории прикаспийских государств. Изменения уровня Каспийского моря отражают климатические изменения на большой территории его водосбора, занимающего площадь около 3,5 млн. км². Существует обширная литература, посвященная объяснению причин колебаний уровня моря. Обстоятельный анализ изменения основных составляющих водного баланса на протяжении XX века приводится в ряде недавних исследований (Шикломанов и др., 2003б; Георгиевский и др., 2003а, 2003б и др.). Показано, что межгодовые естественные колебания уровня моря определяются двумя разнонаправленными факторами — притоком речных вод в море, из которых на долю Волги приходится 84% общего притока, и видимым испарением с поверхности моря, т. е. разностью между фактическим испарением и осадками на его зеркале. В предположении замыкания водного баланса моря за последние примерно 100 лет из данных наблюдений и эмпирических оценок следует, что амплитуда межгодовых колебаний притока речных вод заметно превосходит амплитуду колебаний видимого испарения.

Попытки оценить возможности расчета с помощью глобальных моделей атмосферы основных составляющих теплового и водного баланса на водосборе Каспийского бассейна и понять климатически значимые естественные механизмы, вызывающие колебания отдельных составляющих водного баланса Каспийского моря, предпринимались в некоторых недавних исследованиях (Арпе и др., 1999, 2002; Мелешко и др., 1998; Павлова и др., 2001; Спорышев и др., 2003а; Elguindi and Giorgi, 2006). Показано, что ряд моделей достаточно успешно воспроизводят среднегодовые значения отдельных составляющих водного баланса на водосборах рек Волга и Урал, а также на акватории моря. Обнаружена воспроизводимая глобальной моделью атмосферы ЕСНАМ4 статистически значимая связь между изменениями уровня Каспийского моря и аномалиями температуры в тропической зоне Тихого океана, которые, в свою очередь, связаны с явлением Эль-Ниньо — южное колебание (Arpe et al., 2000).

Существуют статистические методы долгосрочного прогноза изменений уровня Каспийского моря (на сроки до 18 лет), обусловленных естественными колебаниями в системе атмосфера — океан — криосфера — поверхность континентов (Малинин, 1994; Абузьяров, 2003; Мещерская, Голод, 2003). В основе этих методов, по существу, лежит экстраполяция различных статистических зависимостей, установленных за предшествующие годы. Однако вследствие ограниченной предсказуемости естественных колебаний климатической системы успешность таких прогнозов на сроки в несколько лет остается очень низкой, особенно, когда происходит смена режимов крупномасштабной циркуляции атмосферы над рассматриваемым регионом.

Большой научный и практический интерес представляет вопрос о возможном антропогенном изменении уровня Каспийского моря. Существует два типа антропогенного воздействия: непосредственное увеличение водопотребления в результате хозяйственной деятельности и глобальное потепление климата в результате увеличения содержания парниковых газов в атмосфере. Согласно некоторым оценкам (Шикломанов, Георгиевский, 1995), во второй половине XX века произошли существенные изменения водного режима рек южного склона России и сопредельных территорий, вызванные интенсивным развитием орошения, промышленно-коммунального и сельскохозяйственного водопотребления, а также сооружением водохранилищ и их каскадов. В результате годовой сток таких рек, как Дон, Днепр, Урал, уменьшился на 30%, а Волги — на 10% по отношению к естественной норме.

На основе сценариев антропогенного изменения климата и потерь стока рек в результате безвозвратного водопотребления выполнена оценка возможных изменений уровня Каспийского моря до 2020 г. с помощью эмпирической модели (Шикломанов и др., 2003а). Показано, что наиболее вероятное понижение уровня моря может составить 0,5–0,9 м к 2020 г., хотя в отдельные годы уровень может существенно отклоняться от этого среднего понижения вследствие естественной изменчивости климата.

Ниже приводятся результаты расчетов влияния глобального потепления климата, вызванного увеличением содержания парниковых газов в атмосфере, на изменения уровня Каспийского моря в XXI веке, основанные на прямом моделировании составляющих водного баланса с помощью МОЦАО СМIP3. До сих пор сложность такой оценки состояла в том, что во многих моделях акватория Каспийского моря вообще не была представлена. Однако в настоящее время несколько МОЦАО

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

в явном виде включают акваторию Каспийского моря и реалистично воспроизводят процессы тепло- и влагообмена на его поверхности. Водосбор Каспийского моря отличается большим разнообразием ландшафтов. В частности, он захватывает часть кавказской горной системы и значительные районы пустынь и полупустынь вблизи акватории моря. Точное моделирование речного стока на такой территории требует использования региональных моделей с очень высоким пространственным разрешением. МОЦАО, используемые в настоящее время для моделирования глобальных климатических изменений, имеют гораздо меньшее пространственное разрешение. В работах (Арпе и др., 2002; Спорышев и др., 2003а) был проведен статистический анализ значимости вклада отдельных составляющих водного баланса Каспийского моря в изменение уровня моря. Анализ показал, что при моделировании можно ограничиться двумя основными факторами, влияющими на водный баланс Каспия, — стоком Волги и видимым испарением с поверхности моря. Оба этих фактора существенно коррелированы с изменениями уровня, но слабо связаны между собой. При этом, поскольку гидрологические режимы водосбора Волги и акватории моря достаточно хорошо воспроизводятся рядом современных МОЦАО, оба фактора могут быть получены из модельных расчетов. Оценка межгодовых изменений уровня

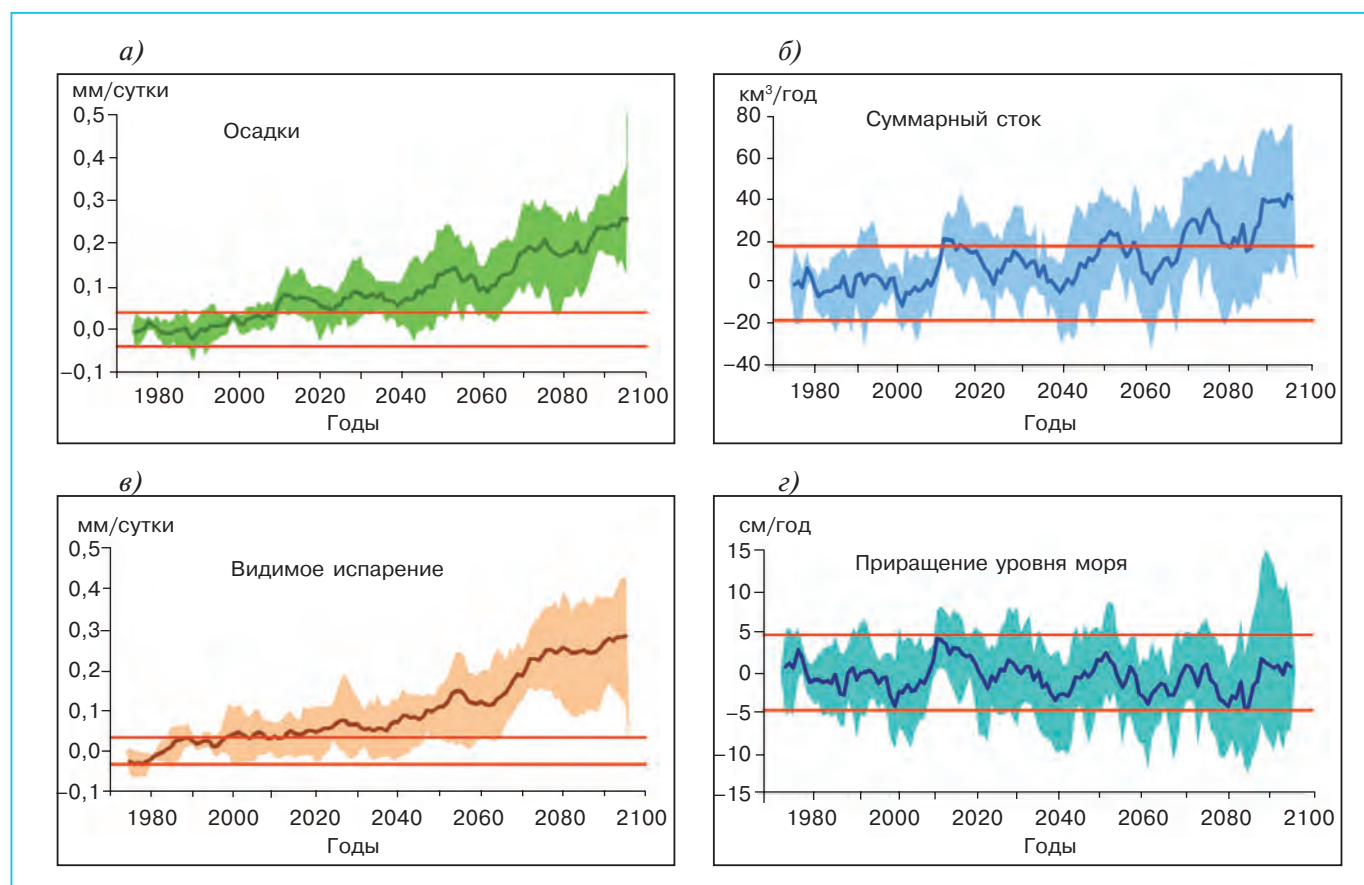


Рис. 7.17. Изменения во времени средних за год аномалий составляющих водного баланса на водосборе Волги (а, б) и акватории Каспийского моря (в, г) в XXI веке, рассчитанные по ансамблю из 7 МОЦАО с 10-летним скользящим осреднением для сценария А2. Аномалии рассчитывались по отношению к периоду 1980–1999 гг.: а) осадки, б) суммарный сток; в) видимое испарение; г) приращение уровня моря. Разброс модельных оценок характеризуют выделенные соответствующим цветом области, в которые попадают средние модельные значения. Две горизонтальные прямые обозначают границы интервала естественной изменчивости, в который должны попадать 95% десятилетних модельных средних при сохранении статистической структуры изменчивости базового климата. Если кривая выходит за границы этого интервала, то рассматриваемые изменения статистически значимы на уровне 5%. В расчетах использованы следующие МОЦАО (в скобках указано число узлов сетки на акватории моря): CSIRO-Mk3.0 (15), ECHAM5/MPI-OM (11), MIROC3.2 (medres) (8), CNRM-CM3 (6), UKMO-HadCM3 (4), CGCM3.1(T47) (3), INM-CM3.0 (2).

моря при таком подходе производится с помощью двухфакторной регрессионной модели, основанной на данных наблюдений (Арпе и др., 2002). Среднеквадратическая ошибка модели при использовании данных наблюдений составляет примерно 4 см/год. Такой подход уже использовался для оценки будущих изменений уровня Каспийского моря в работе (Спорышев и др., 2003б).

На рис. 7.17 показаны изменения во времени средних за год составляющих водного баланса на водосборе Волги и акватории Каспийского моря в XXI веке, рассчитанные по ансамблю из 7 МОЦАО, в которых Каспийское море представлено в явном виде. Согласно расчетам, среднее за год увеличение осадков на водосборе Волги может быть значимо в первой половине XXI века и к середине века их увеличение составит $6 \pm 4\%$ по отношению к базовому периоду. Одновременно с увеличением осадков будет увеличиваться и испарение. В результате сток Волги постепенно увеличится, но изменения становятся статистически значимыми только к концу столетия даже при “жестком” сценарии А2. С другой стороны, на акватории моря не ожидается заметного увеличения количества осадков в связи с развитием засушливых условий в южных регионах России, но при этом ожидается значительное увеличение испарения с поверхности моря, которое к середине XXI века составит $12 \pm 4\%$ по отношению к базовому периоду. В результате водный баланс и соответственно уровень Каспийского моря в XXI веке будут подвержены многолетним колебаниям естественного происхождения, а статистически значимых изменений уровня моря, обусловленных потеплением климата, не ожидается.

Аналогичный анализ результатов расчетов по сценариям А1В и А2 с МОЦАО СМIP3 и региональной климатической моделью был выполнен в работах (Elguindi and Giorgi, 2006, 2007). Анализ также показал устойчивое увеличение среднегодового количества осадков на водосборе Волги и испарения на акватории моря. Однако авторы пришли к другим выводам относительно предполагаемых тенденций изменения уровня Каспийского моря в XXI веке. Например, при расчетах по сценарию А2 при большом межмодельном разбросе в оценках изменений уровня моря к концу XXI века (от повышения на 5 м до понижения на 20 м) среднее по ансамблю МОЦАО понижение уровня составило 9 м. Такое расхождение в выводах при использовании близких модельных данных, по-видимому, объясняется двумя причинами. Во-первых, в указанных работах рассматривался полный водосбор Каспийского моря без учета того, что составляющие водного баланса для южной части водосбора воспроизводятся моделями со значительными ошибками. Во-вторых, при расчете приращений уровня моря количество осадков на суше было искусственно занижено с помощью поправочных коэффициентов, введенных для того, чтобы получить изменения уровня в XX веке, близкие к наблюдаемым. Обе указанные причины усиливают тенденцию увеличения испарения на водосборе в XXI веке и ослабляют тенденцию увеличения количества осадков, что и дает различие в результатах.

В итоге можно заключить, что все исследования сходятся в том, что в XXI веке ожидается устойчивое увеличение среднегодового количества осадков на водосборе Волги и испарения на акватории моря, однако оценки предполагаемых изменений уровня моря для разных моделей значительно различаются и, кроме того, существенно зависят от используемых методов коррекции модельных ошибок. Таким образом, вопрос о том, насколько глобальное потепление климата может отразиться на значительных в прошлом естественных колебаниях уровня Каспийского моря, остается открытым и требует дальнейших исследований.

7.5.4. Сезонный локальный сток

Вследствие неодинакового времени формирования основных фаз гидрологического режима в отдельных речных бассейнах, обусловленного разным временем добега стока по руслам основных рек, в настоящее время не представляется возможным определить внутригодовой речной сток для больших водосборов или территорий России с помощью современных МОЦАО. Однако можно оценить локальные изменения внутригодового стока в результате дренирования воды в деятельном слое почвы и на его поверхности. Если осадки и снеготаяние превышают испарение и влажность деятельного слоя почвы превышает ее

максимальную влагоемкость, то образуется избыток воды, который обычно интерпретируется в МОЦАО как локальный сток. Этот сток определяет величину реально наблюдаемого стока, который образуется в результате склоновой и русловой трансформации, а также формирования подземных вод.

При потеплении климата на северо-западе России (водосборы бассейна Балтийского моря) будет происходить некоторое выравнивание зимнего и весеннего локального стока. Зимний сток будет увеличиваться, а весенние пиковые значения будут уменьшаться на фоне незначительного увеличения среднегодового стока на 4% к середи-

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

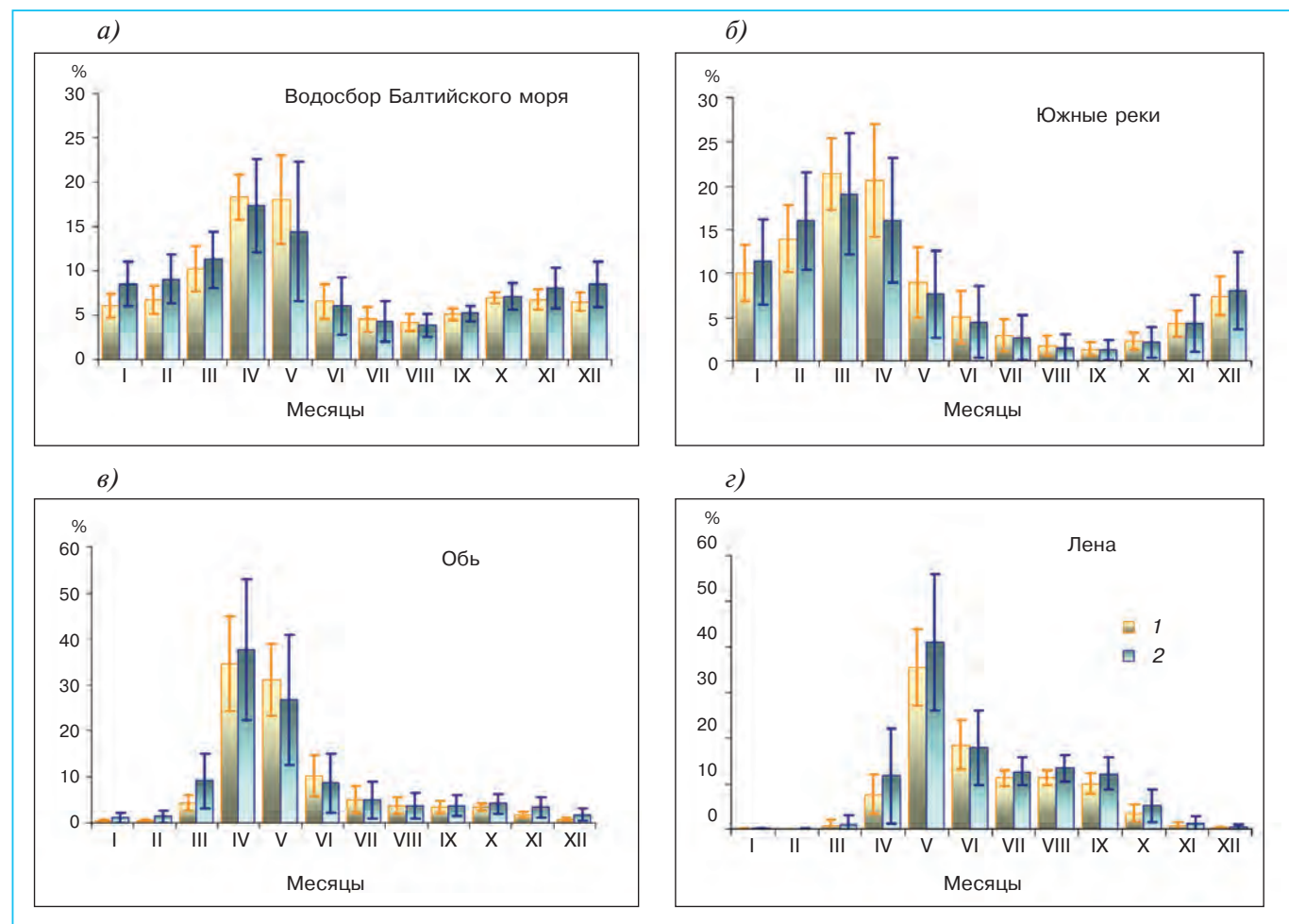


Рис. 7.18. Внутригодовое распределение месячных значений локального стока (%) в базовый период (1) и в середине XXI века (2) на водосборах Балтийского моря (а), в бассейнах южных рек (б), Оби (в) и Лены (г) по отношению к среднему за год стоку в базовый период (1980–1999 гг.). Вертикальные линии в каждом столбце показывают межмодельные стандартные отклонения от среднего по ансамблю из 13 МОЦАО. Сценарий А2.

не XXI века (рис. 7.18а). Летом локальный сток не будет меняться, по крайней мере до середины века. На юго-западе России во внутригодовом перераспределении локального стока будет наблюдаться аналогичная картина, однако при этом к середине XXI века будет происходить уменьшение на 5% среднегодового стока (рис. 7.18б). На водосборе Оби на фоне увеличения среднегодового стока на 7% к середине века наибольшие изменения локального стока ожидаются весной при значительном его увеличении ранней весной и незначительном изменении зимой и летом (рис. 7.18в). На водосборе Лены межгодовые различия локального стока будут увеличиваться преимущественно вследствие его увеличения при весеннем снеготаянии (см. раздел 7.6.1) в результате дополнительно накопленного снега зимой (рис. 7.18г). Летний сток будет также увеличиваться вследствие увеличения осадков, но незначительно, а зимний останется без изменения до конца XXI века. Указан-

ные внутригодовые изменения будут происходить на фоне увеличения годового стока на 17% к середине XXI века. Аналогичные изменения локального стока ожидаются на водосборах рек Чукотки.

Во всех регионах России наибольшие внутригодовые изменения локального стока будут происходить преимущественно весной, и только в западных регионах значительные изменения также ожидаются зимой. Расчеты внутригодового стока по ансамблю МОЦАО показывают достаточно большой разброс оценок, особенно в период зимнего и весеннего снеготаяния, когда криосферные процессы играют чрезвычайно важную роль в формировании гидрологического режима (см. раздел 7.6.1). Полученные оценки изменения месячного локального стока по ансамблю МОЦАО оказываются статистически незначимы. Поэтому, независимо от сценария эмиссий, эти оценки следует рассматривать лишь как качественные, характеризующие возможные тенденции.

7.5.5. Влагосодержание верхнего слоя почвы

Влагосодержание почвы является важным климатическим параметром, характеризующим гидрологические условия на подстилающей поверхности. Это очень изменчивая в пространстве характеристика, определение которой зависит не только от методов параметризации физических процессов в атмосфере и деятельном слое почвы, но также от задаваемых крупномасштабных тепло- и воднофизических свойств деятельного слоя почвы, которые не унифицированы в современных МОЦАО.

Сведения о возможных изменениях увлажнения деятельного слоя почвы чрезвычайно важны для оценки уязвимости и потенциала сельскохозяйственного производства в отдельных регионах.

В архиве модельных данных ОД4 МГЭИК (см. раздел 5.6) содержатся результаты расчетов только

двух характеристик влажности почвы, а именно влажности верхнего слоя глубиной 0,1 м и полного влагосодержания слоя почвы, глубина которого может быть разной в разных МОЦАО. Это создает определенные трудности при анализе изменения влажности по ансамблю МОЦАО. По этой причине при анализе влажности почвы рассматривался только ее верхний слой. Последний не может в полной мере характеризовать влажность всего деятельного слоя почвы. Тем не менее он может служить индикатором степени его увлажнения.

При потеплении климата засушливые условия на значительной части территории России начинают формироваться уже весной и усиливаются летом (рис. 7.19). Если в северных, относительно увлажненных регионах некоторое уменьшение влажности почвы, по-видимому, не будет иметь

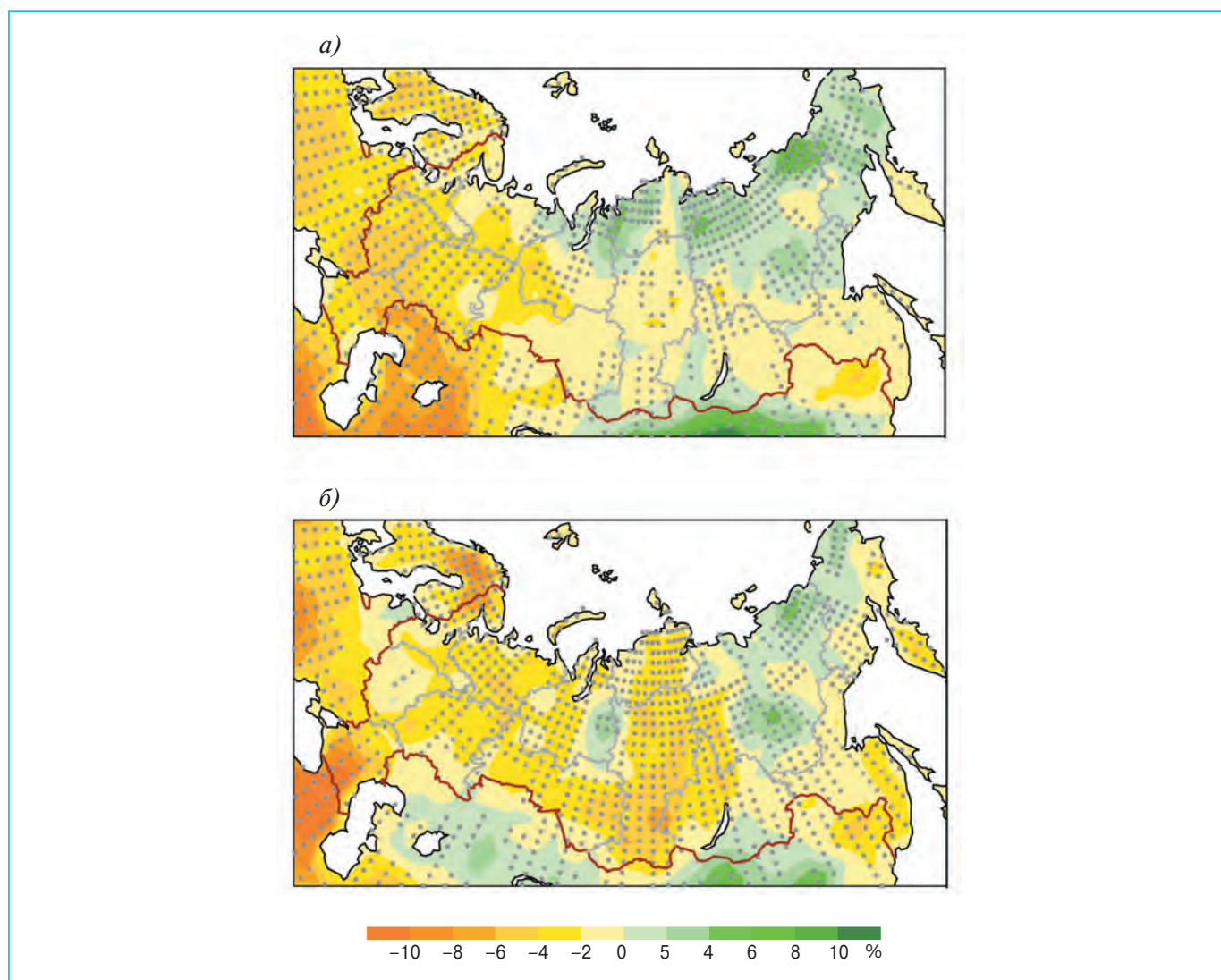


Рис. 7.19. Изменения влагосодержания верхнего слоя почвы (%) на территории России весной (а) и летом (б) к середине XXI века для сценария А2. Расчеты выполнены по ансамблю из 6 МОЦАО. В анализе использованы данные о влажности верхнего слоя почвы (10 см). Точками выделены области, в которых более двух третей моделей показывают изменения одного знака.

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Таблица 7.9. Изменения (%) влагосодержания верхнего почвы по отношению к базовому периоду весной и летом к 2011–2030 гг. и 2041–2060 гг., рассчитанные по ансамблю из 6 МОЦАО

Период, годы	Федеральный округ					
	Южный		Центральный		Приволжский	
	весна	лето	весна	лето	весна	лето
2011–2030	-2 ± 3	-4 ± 5	-2 ± 2	-0 ± 6	-1 ± 3	-3 ± 6
2041–2060	-4 ± 6	-8 ± 7	-2 ± 6	-2 ± 7	-3 ± 4	-2 ± 4

Таблица 7.10. Доля (%) твердых осадков по отношению к суммарным зимой за базовый период (1980–1999 гг.) и изменения (%) суммарных и твердых осадков, рассчитанные для зимы 2011–2030 гг. 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

серьезных негативных последствий, то в южных регионах, которые периодически подвержены влиянию засух в настоящее время, дальнейшее уменьшение влагосодержания почвы весной и летом будет усугублять засушливость.

Особого внимания заслуживают три российских региона: Южный, Центральный и Приволжский федеральные округа. Межмодельный разброс изменений влажности почвы в ансамбле достаточно велик по сравнению со средними изменениями, полученными по ансамблю МОЦАО, особенно в Центральном и Приволжском федеральных округах (табл. 7.9). Одной из причин большого межмодельного разброса оценок может быть отсутствие унифицированных базовых характеристик подстилающей поверхности и почвы (тепло- и воднофизические характеристики почвы, альbedo разных типов поверхности и др.), используемых в современных МОЦАО. Определенную роль здесь играют и большие различия методов параметризации процессов в деятельном слое почвы и на ее поверхности в моделях и сложности их валидации.

Минимальное влагосодержание верхнего слоя почвы в Южном федеральном округе устанавливается в июле и составляет 55% среднего за год. Наибольшее среднее месячное уменьшение влажности почвы по отношению к их значениям в базовый период достигается в июле и августе и со-

ставляет 4% в начале XXI века и 8% к его середине. И только с середины XXI века расчетные изменения влажности почвы начинают превышать межмодельные стандартные отклонения (в мае, июне и июле).

7.6. Криосферные характеристики климата

7.6.1. Снежный покров суши

Расчеты будущих изменений снежного покрова на континенте говорят об ускоряющемся сокращении его площади и уменьшении массы на протяжении XXI века. Наибольшие изменения происходят при реализации сценариев А1В и А2.

Если общее количество осадков, выпадающих в среднем за год на территории России, принять за 100%, то, согласно расчетам по ансамблю моделей, 41% из них выпадает в твердой фазе (снег) в холодное время*. Это дает возможность судить о том, насколько важную роль играет накопленная масса снега зимой в гидрологическом цикле и, особенно, в формировании стока зимой и во время интенсивного таяния снега весной при потеплении климата. Из-за больших размеров территории России указанное деление на жидкие и твердые осадки может сильно различаться в отдельных регионах (табл. 7.10).

* Вследствие того, что температура воздуха на территории оказывается в моделях несколько заниженной, количество осадков, выпадающих в твердой фазе, примерно на 10–15% больше, чем показывают результаты диагностических оценок (Кобышева, 2001).

На Европейской территории России доля снега в суммарных осадках примерно на 20% меньше по сравнению с их долей в Сибири. Увеличение суммарных осадков на Европейской территории происходит преимущественно вследствие увеличения жидких осадков в зимний период, в то время как в Западной и Восточной Сибири основную их долю составляет снег. Это означает, что на Европейской территории следует ожидать незначительного накопления массы снега и заметного увеличения зимнего стока к середине века, а в Западной и Восточной Сибири, наоборот, будет происходить заметное накопление массы снега зимой и его интенсивное таяние весной.

Как отмечалось в разделе 7.5.3, на водосборах в средних широтах максимальный сток наблюдается весной в период интенсивного таяния снега. Поскольку в начале весны деятельный слой почвы, как правило, оказывается насыщенным влагой, основная масса растаявшего снега расходуется на сток. Рассчитав средние месячные изменения массы снега в марте и мае в XXI веке по отношению к базовому климату, можно оценить изменения сезонного распределения стока, обусловленные таянием снежного покрова. На величину стока оказывают влияние два фактора: увеличение скорости таяния снега в результате потепления климата и изменение накопленной за зиму массы снега. Результаты расчетов показывают, что на водосборе Оби на протяжении XXI века уменьшения массы снега к началу весны (март) оказываются большими по сравнению с уменьшением массы снега к концу весны (в мае). Совершенно другая ситуация складывается на водосборах Енисея и Лены, где в XXI веке происходит заметное увеличение накопленной за зиму массы снега (март) и уменьшение массы снега в мае. Иными словами, большее коли-

чество снега тает за более короткое время. Таким образом, вероятность крупных весенних паводков на этих водосборах на протяжении XXI века существенно увеличивается (Мелешко и др., 2004б).

По оценкам, полученным с помощью РКМ ГГО (Школьник и др., 2006, 2007), на территории России сокращение периода с устойчивым снежным покровом к середине XXI века может достигать одного месяца (рис. 7.20). В большей степени эти изменения затрагивают юг ЕТР и Сибири, а также Дальний Восток, в меньшей — центральные и северные районы ЕТР, Центральную и Восточную Сибирь.

В табл. 7.11 приводятся изменения средней за год массы тающего снега в начале, середине и конце XXI века по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг., рассчитанные для крупных речных бассейнов отдельных регионов России субконтинентального масштаба. На ЕТР масса тающего снега будет постепенно убывать в течение XXI века вследствие меньшего его накопления зимой, а в Сибири, наоборот, будет увеличиваться, особенно на востоке.

На рис. 7.21 показаны внутригодовые изменения снеготаяния для четырех речных бассейнов, в которых ожидаются наибольшее уменьшение или увеличение годового снеготаяния в XXI веке. При потеплении климата в течение всей зимы и, особенно, весной существенно увеличивается таяние снега на водосборах Балтийского моря и, южных рек (рис. 7.21а, б). При этом весеннее снеготаяние будет более интенсивным в начале века по сравнению с серединой века, поскольку масса накопленного за холодное время года будет меньшей и, следовательно, повторяемость и интенсивность весенних пиков снеготаяния, с которыми связаны крупные половодья, будут также уменьшаться.

Таблица 7.11. Средние за год значения массы тающего снега и межмодельные стандартные отклонения в начале, середине и конце XXI века (%) по отношению к базовому периоду (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	101 ± 2	101 ± 3	99 ± 6

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

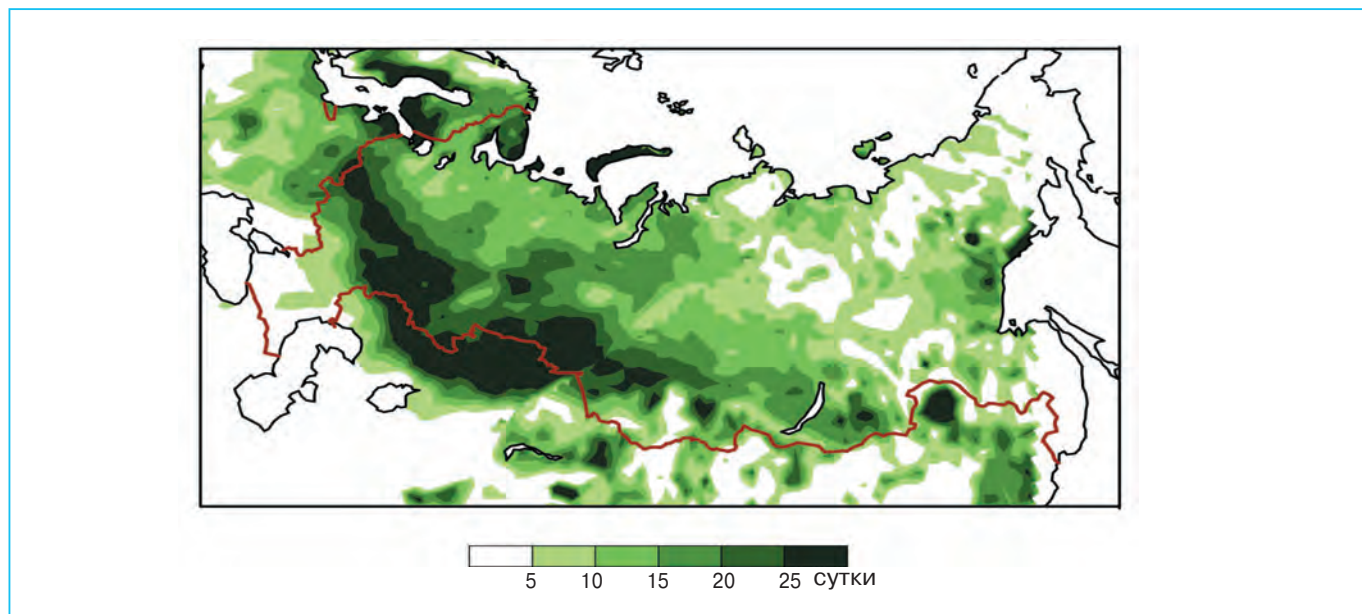


Рис. 7.20. Уменьшение числа суток в году с устойчивым снежным покровом к середине XXI века, полученное с помощью РКМ ГГО (Школьник и др., 2007).

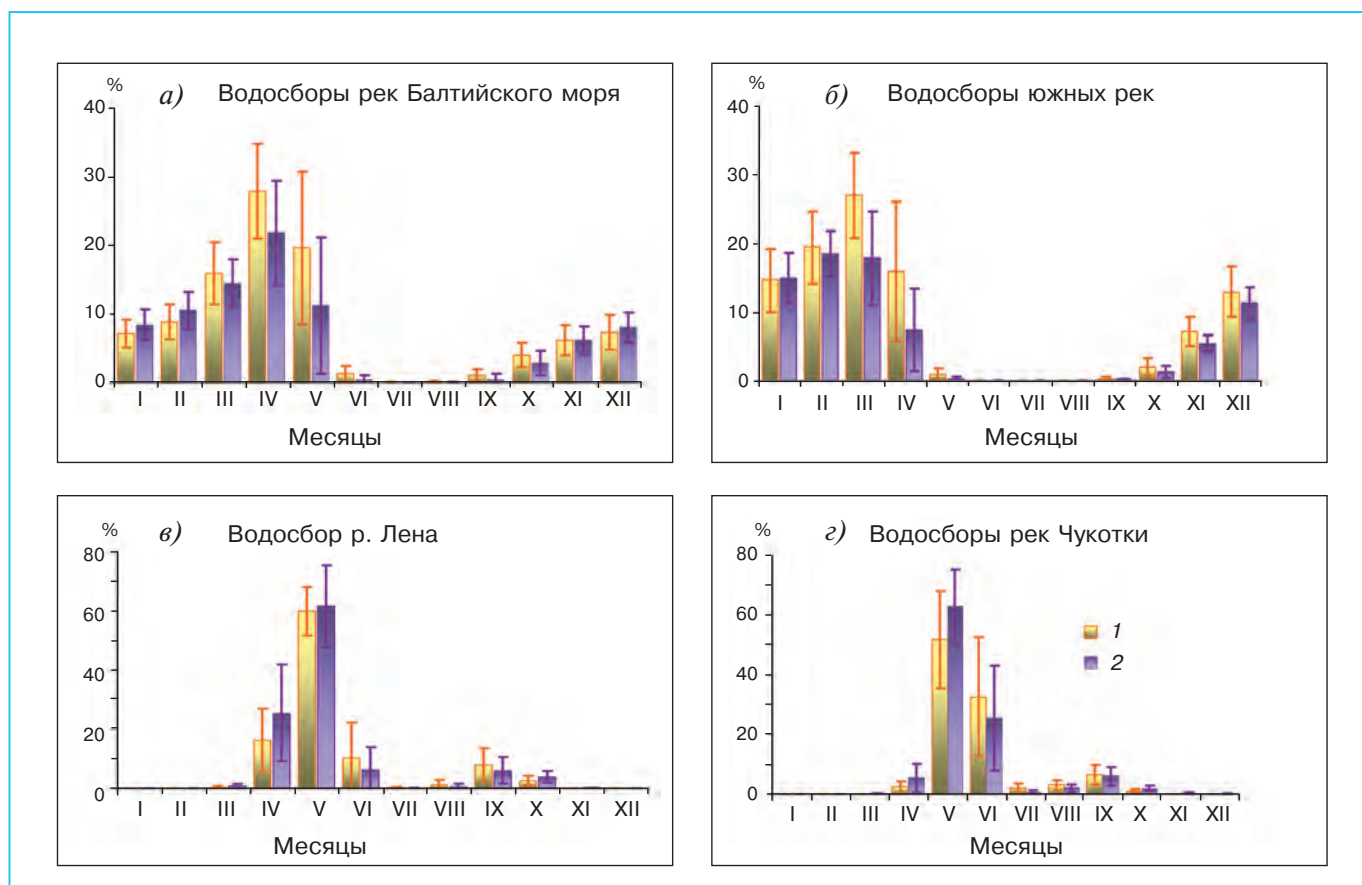


Рис. 7.21. Внутригодовое распределение месячных значений снеготаяния (%) в базовый период (1) и в середине XXI века (2) на водосборах Балтийского моря (а), в бассейнах южных рек (б), Лены (в) и водосборах рек Чукотки (г) по отношению к среднему снеготаянию за год в базовый период (1980–1999 гг.), рассчитанное по ансамблю из 10 МОЦАО для сценария А2. Вертикальные линии в каждом столбце показывают межмодельные стандартные отклонения от среднего по ансамблю.

С другой стороны, на водосборах Лены и в бассейнах рек Чукотки снеготаяние не будет увеличиваться зимой (рис. 7.22*в, г*), но будет наступать раньше и увеличиваться в течение всего XXI века весной вследствие большего накопления снега зимой при потеплении климата. Следует обратить внимание, что межмодельный разброс (стандартные отклонения) оценок снеготаяния превышают средние по ансамблю внутригодовые изменения на всех без исключения водосборах. Хотя полученные оценки физически хорошо согласуются с изменениями других характеристик климата, их количественная интерпретация в настоящее время затруднительна.

7.6.2. Многолетняя мерзлота и сезонное промерзание грунта

Наиболее важными характеристиками многолетней мерзлоты являются положение ее границы, глубины сезонного протаивания и промерзания, а также температура многолетнемерзлых слоев на разных глубинах. Перечисленные характеристики с разной степенью надежности можно получить из данных наблюдений, но далеко не все из них можно сравнить с расчетными. Особую трудность представляют сравнения границ вечной мерзлоты, рассчитанных по моделям климата и полученных

из наблюдений, в частности положение границы между регионами, которые характеризуются режимами сезонного протаивания и промерзания. Так, пространственная неоднородность наблюдений весьма велика, при этом наличие или отсутствие многолетнемерзлых слоев зависят от ландшафта и состава грунтов. Вместе с тем анализ расчетных распределений температуры по глубинам позволяет установить общие закономерности, характеризующие профили температуры в разных зонах многолетней мерзлоты, и сформулировать условия для определения положения ее границ. В частности, расчетное положение среднегодовой нулевой изотермы на глубине 3 м для суглинков, осредненное за некоторый период, достаточно реалистично определяет наблюдаемую границу многолетней мерзлоты, включая зоны прерывистой и островной мерзлоты (Павлова и др., 2007). Анализ расчетов также показывает, что на протяжении XX века положение этой границы изменилось незначительно. Расчетная площадь континентальной зоны многолетней мерзлоты при современном климате 21,8 млн. км², тогда как площадь этой зоны по современным геокриологическим данным составляет 22,8 млн. км² (Zhang et al., 1999). На рис. 7.22 показано положение границы многолетней мерзлоты в конце XX века, определяемой по среднегодовой нулевой изотерме на глубине 3 м. Это поло-

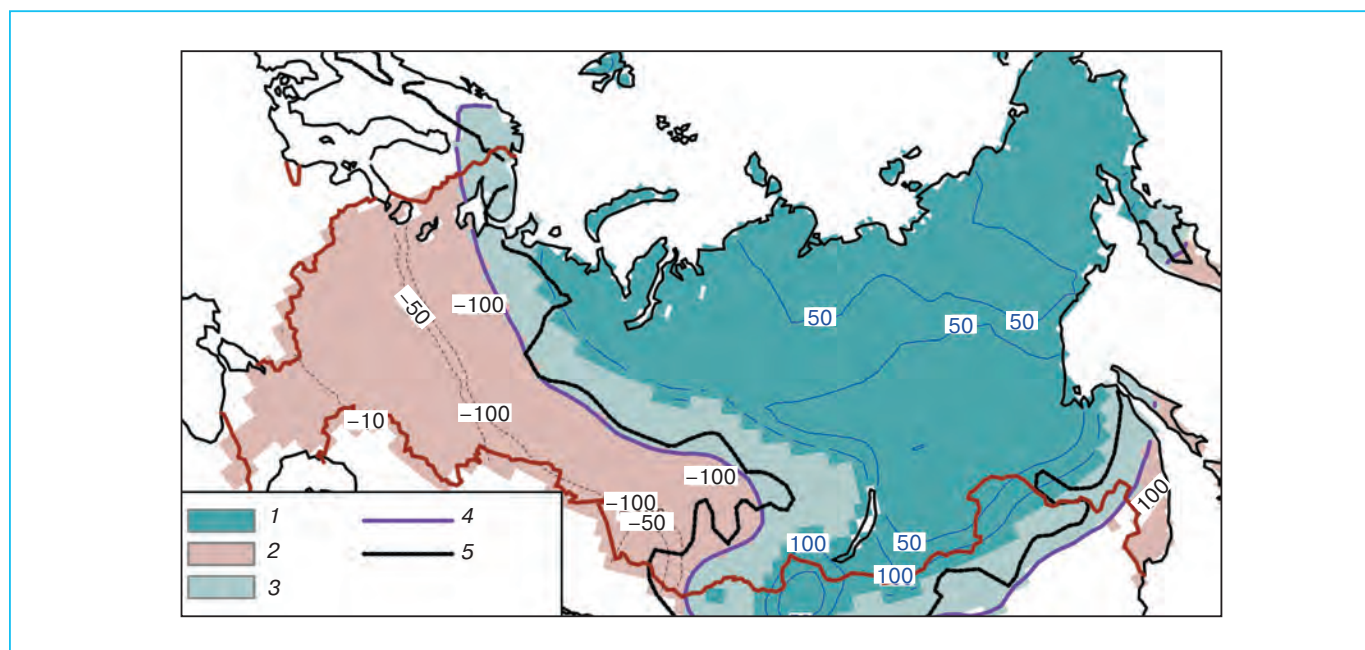


Рис. 7.22. Зоны сезонного протаивания (1) и сезонного промерзания (2) в середине XXI века. Изолиниями показано уменьшение глубины промерзания и увеличение глубины протаивания (см) по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг.; 3 — зона перехода от режима сезонного протаивания к режиму сезонного промерзания в верхнем 3-метровом слое грунта; 4 — положение границы зоны вечной мерзлоты по модельным расчетам, определяемое как положение нулевой изотермы на глубине 3 м; 5 — современная наблюдаемая граница зоны вечной мерзлоты.

жение рассчитано с помощью физической модели многолетней мерзлоты ГГО (Malevsky-Malevich et al., 2001) и граничных условий на поверхности, полученных по ансамблю МОЦАО СМIP3. На этом же рисунке показана граница многолетней мерзлоты, определенная по данным наблюдений. Расчетное положение границы практически совпадает с наблюдаемым за исключением области на северо-западе России, где расчетная площадь оказывается больше наблюдаемой, что связано с занижением средней за год температуры приземного воздуха ансамблем МОЦАО СМIP3 по сравнению с данными наблюдений в этом регионе.

Расчеты будущих изменений глубины протаивания неоднократно проводились методами экстраполяции изменений, наблюдающихся в настоящее время, а также методами, в основе которых лежат корреляционные соотношения между глубиной протаивания и климатическими параметрами (Анисимов, Нельсон, 1993; Анисимов, 1994; Анисимов, Белолуцкая, 2003, 2004; Анисимов и др., 1999, 2002; Величко, Нечаев, 1992; Гарагуля, Ершов, 2000; Гречищев, 1997; Израэль и др., 1999; Дучков и др., 2000; Павлов, 2001; Nelson and Anisimov, 1993).

В ряде исследований выполнялись расчеты эволюции теплопередачи в грунтах с помощью физических моделей при заданной температуре на поверхности растительного и снежного покровов и заданной толщине последнего (Малеvский-Малеvич и др., 2000, 2005, 2007; Малеvский-Малеvич, Надежина, 2002; Молькентин и др., 2003; Anisimov et al., 2002; Malevsky-Malevich et al., 2001; Sazonova and Romanovsky, 2003; Zhuang et al., 2001). В оценках характеристик многолетней мерзлоты в XX и XXI веках в качестве граничных условий использовались сезонное распределение температуры на поверхности и сведения о снежном покрове, полученные как по отдельным МОЦАО, так и их ансамблям. В архиве Мирового центра данных по гляциологии приведены карты пространственных распределений глубины протаивания в России, полученные на основе ансамбля МОЦАО (Nadyozhina, 2003). В настоящее время информационная база данных о характеристиках многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых слоев существенно расширена в результате привлечения расчетных данных о климате с помощью МОЦАО СМIP3 (Павлова и др., 2007). В ряде исследований развитие климатических моделей идет по пути включения в них блока теплопередачи в грунтах, построенного с учетом процессов таяния и замерзания воды (Демченко и др., 2002; Мелешко и др., 2004б; Володин, Лыкосов, 1998; Stendel and Christensen, 2002; Nicolsky et al., 2007).

Деградация многолетней мерзлоты под влиянием потепления климата будет проявляться прежде всего в увеличении мощности сезонно-талого

слоя и повышении температуры многолетнемерзлых грунтов. В некоторых районах может произойти отрыв замерзающей части сезонно-талого слоя от глубинных толщ многолетней мерзлоты.

Тундровые ландшафты отличаются высокой уязвимостью по отношению к внешним воздействиям, и протаивание многолетнемерзлых грунтов будет сопровождаться просадками грунтов, 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.

Разброс расчетных значений глубины протаивания, обусловленный межмодельным разбросом граничных условий на период 2000–2050 гг., не превышает разброса значений глубины, обусловленного физическими свойствами грунтов.

Наиболее значимым и разрушительным по своим возможным последствиям по отношению к сооружениям является полный отрыв верхней кромки многолетнемерзлых грунтов от толщ реликтовой мерзлоты, расположенных на больших глубинах. В этом случае появляется слой талых грунтов, не промерзающих зимой, и свойства многолетнемерзлых грунтов не отличаются от климатических условий умеренной климатической зоны, характерной, например, для Европейской территории России. При таком развитии процессов в некоторых регионах многолетняя мерзлота может сохраняться лишь на глубинах вне пределов инженерно-строительной деятельности. Подобные явления могут проявиться в южных районах в первые десятилетия XXI века. Сейчас эти районы характеризуются как районы островной мерзлоты. В случае реализации сценария А2 во второй половине XXI века продвижение границы многолетней мерзлоты к северу будет происходить примерно в два раза быстрее, чем в случае реализации сценария В1.

На рис. 7.22 отчетливо видна переходная область между регионами, относящимися к зонам сезонного протаивания и сезонного промерзания соответственно, а также предполагаемые изменения глубины протаивания и промерзания к середине XXI века.

Большая часть сельскохозяйственных районов интенсивного земледелия России находится в зоне сезонного промерзания, и изменения глубины промерзания, несомненно, будут оказывать влияние на сельскохозяйственное производство. Изменения глубины сезонного промерзания под влиянием потепления климата можно оценить с помощью тех же моделей, описывающих теплопередачу в грунтах, которые применяются для оценки глубины протаивания вечномерзлых грунтов (Павло-

ва и др., 2007). На рис. 7.22 показано уменьшение глубины промерзания и расширение области, в которой промерзание отсутствует. 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.

7.6.3. Морской лед в Арктике

Расчеты будущих изменений ледяного покрова Северного Ледовитого океана говорят об ускоряющемся сокращении его площади и массы. К концу XXI века наибольшие изменения будут про-

исходить в случае реализации сценария А2. Сокращение площади ледяного покрова особенно хорошо обнаруживается при анализе сезонных минимумов и максимумов. Как известно, в сентябре площадь морского льда в Северном полушарии достигает минимальных значений. В это время в океане присутствует только многолетний лед. К марту площадь льда, в том числе сезонного, достигает максимальных значений. Расчеты по ансамблю МОЦАО показывают, что в течение XXI века максимальная площадь морского льда (март) будет сокращаться на 2% за десятилетие, а минимальная площадь льда (сентябрь) — на 7% за десятилетие по отношению к площади льда в конце

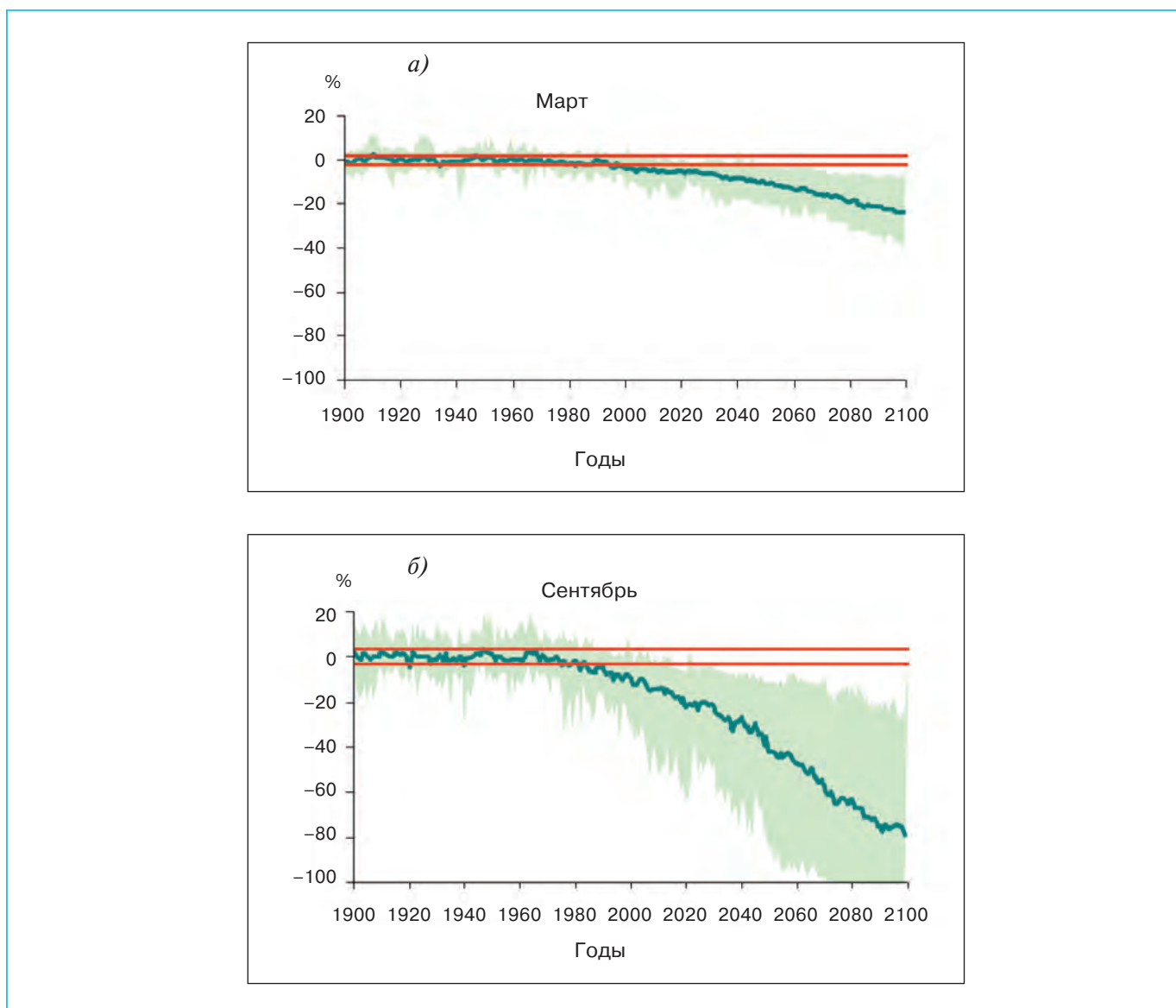


Рис. 7.23. Изменение площади морского льда в Северном полушарии в марте (а) и сентябре (б) в XX и XXI веках, рассчитанная по ансамблю из 12 МОЦАО для сценария А2. Кривыми представлены средние по ансамблю изменения площади морского льда по отношению к периоду 1910–1959 гг., интервалы изменчивости для которых обозначены двумя красными линиями, соответствующими 5%-ному уровню значимости. Выделенная цветом область показывает разброс модельных оценок.

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

XX века (рис. 7.23*а, б*) (Arzel et al., 2006; Zhang and Walsh, 2006; Катцов и др., 2007). Таким образом, сокращение площади многолетнего льда в Северном Ледовитом океане опережает сокращение общей площади морского льда. Примечательно, что наблюдаемый тренд сокращения площади многолетнего льда в сентябре за последние 30 лет оказался заметно бóльшим по сравнению с расчетным средним трендом, полученным по ансамблю МОЦАО СМIP3 за тот же период.

В модельных расчетах тенденция к непрерывному уменьшению общей площади морского льда в Северном полушарии отчетливо прослеживается в период 1980–2000 гг. (рис. 7.23). По сравнению с началом уменьшения годового максимума (март)

уменьшение минимальной (в сентябре) площади льда началось раньше. Впоследствии разрыв между сентябрем и мартом в средней по ансамблю МОЦАО скорости уменьшения площади морского льда увеличивается вплоть до конца XXI века. Это происходит на фоне увеличивающегося — более интенсивно в сентябре, чем в марте, — разброса между моделями. В конце XXI века разброс между значениями площади льда в сентябре в Северном полушарии начинает сокращаться вследствие того, что в ряде МОЦАО Северный Ледовитый океан полностью освобождается от ледяного покрова.

На рис. 7.24 показаны распределения морского льда в марте в расчетах с помощью 12 МОЦАО для сценария A2. Различия между распределениями

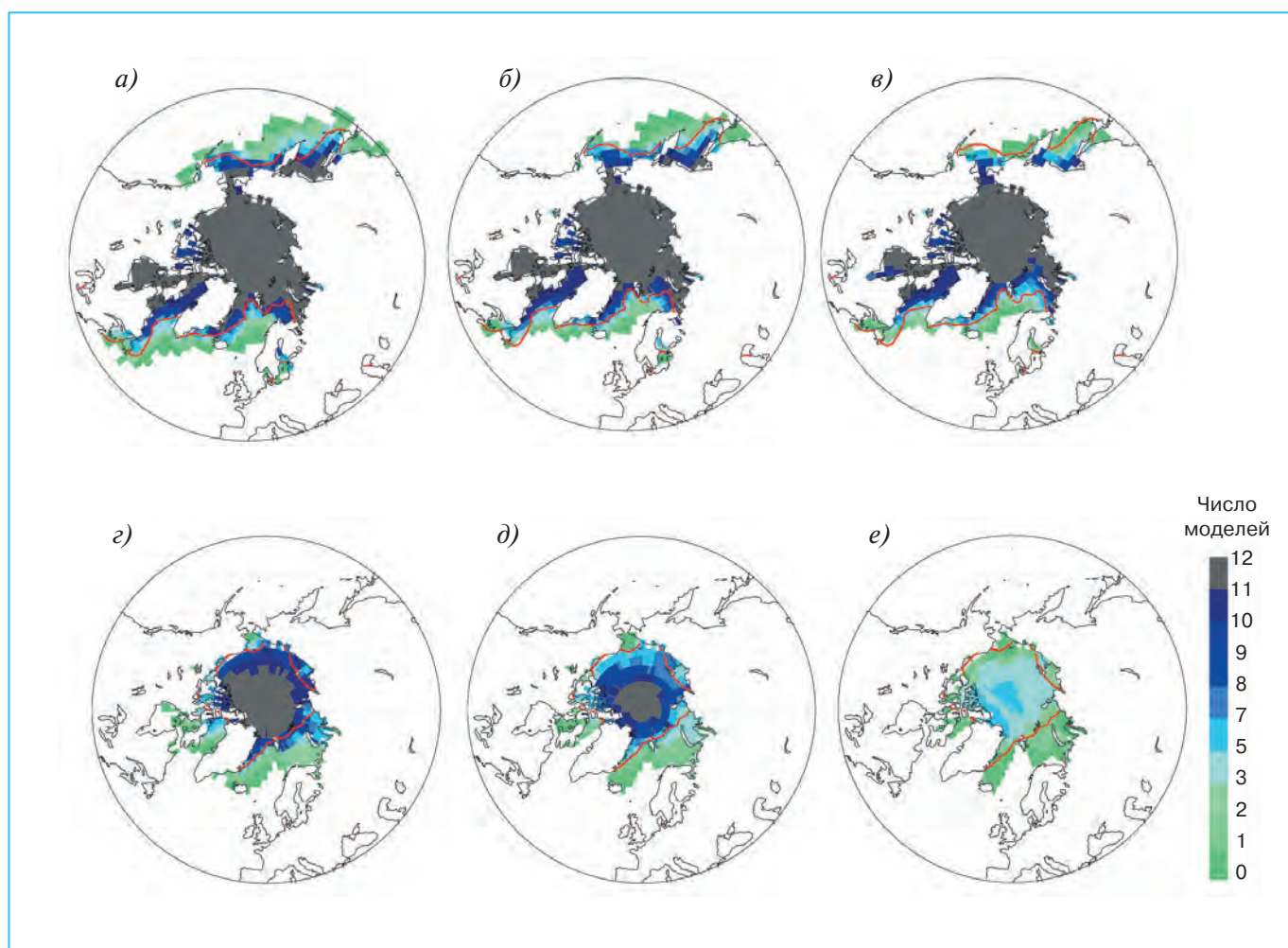


Рис. 7.24. Распределение морского льда в Северном полушарии по расчетам 12 МОЦАО для марта (*а–в*) и сентября (*г–е*). Показано распределение морского льда за периоды 1980–1999 гг. (*а, г*), 2041–2060 гг. (*б, д*) и 2080–2099 гг. (*в, е*) для сценария A2. В каждой ячейке сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ разными цветами показано число моделей, в которых для этой ячейки получен лед сплоченностью не менее 15%. Серым цветом отмечены ячейки, в которых во всех 12 МОЦАО сплоченность морского льда составляет не менее 15%. Наблюдаемые границы ледяного покрова сплоченностью не менее 15% (красная линия) за период 1980–1999 гг. получены по данным HadISST (Катцов и др., 2007).

морского льда в марте к середине (2041–2060 гг.) и концу (2080–2099 гг.) XXI века оказываются незначительными, равно как и отличия каждого из них от соответствующего распределения в период 1980–1999 гг. По-иному выглядит соответствующая картина для сентября. К концу XXI века Северный Ледовитый океан стал свободным от

морского льда в нескольких МОЦАО: не сохранилось областей, в которых сплоченность льда была бы не меньше 15%, одновременно во всех 12 рассматриваемых моделях. Заметно также сильное сокращение области в Центральной Арктике, в которой морской лед сохранился более чем в половине МОЦАО.

Блок 7.3. Изменения уровня Мирового океана

Береговые измерения показывают, что средний уровень Мирового океана увеличивался в течение всего XX века. С начала 1990-х годов непрерывные измерения за уровнем океана стали проводиться со спутников. Сравнения с традиционными береговыми наблюдениями показали, что обе группы оценок хорошо согласуются. Изменения уровня далеко не одинаковы на акватории Мирового океана и зависят от температуры воды, солености, ветра и океанской циркуляции. На уровень океана также оказывают влияние низкочастотные изменения атмосферной циркуляции, такие как Эль-Ниньо и североатлантическое колебание, вызывающие региональные межгодовые колебания уровня, которые могут быть большими по величине, чем его глобальный тренд.

Наиболее достоверные оценки глобального повышения уровня океана к концу XXI века по сравнению с базовым периодом (1980–1999 гг.) для трех сценариев составляют (вместе с межмодельным разбросом) соответственно: B1 — 0,28 м (0,19–0,37); A1B — 0,35 м (0,23–0,47); A2 — 0,37 м (0,25–0,50) (Meehl et al., 2007). Средняя скорость повышения уровня океана в XXI веке, как ожидается, превысит наблюдавшуюся скорость за период 1961–2003 гг. ($1,8 \pm 0,5$ см/10 лет).

Термическое расширение воды в результате увеличения 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.

Средний глобальный уровень океана может повышаться или понижаться в результате перемещения массы воды с континентов в океан и наоборот. Самые большие запасы воды сосредоточены в ледниковых щитах. Известны периоды в прошлом, когда уровень океана был более чем на 100 м ниже потому, что ледниковые щиты покрывали большую часть континентов Северного полушария. В другие (теплые) периоды уровень океана достигал значений намного выше современных.

Гренландский и Антарктический ледниковые щиты содержат огромную массу льда и могут оказывать влияние на климат в течение многих столетий. В последние годы Гренландский ледниковый щит был подвержен интенсивному таянию. Как показывают расчеты с помощью МОЦАО, в более теплом климате ледниковые щиты могут аккумулировать большее количество выпадающего на них снега, сдерживая тем самым повышение уровня океана. Однако в последние годы в Гренландии преобладал сток массы льда в океан.

Согласно модельным расчетам, Гренландский ледниковый щит и более мелкие ледники будут и дальше терять массу вследствие преобладания таяния льда над аккумуляцией снега. С другой стороны, современные модели показывают, что Антарктический ледниковый щит останется слишком холодным и сможет накапливать массу льда в будущем в результате увеличения массы выпадающего снега, способствуя тем самым сдерживанию повышения уровня океана. Вместе с тем пока еще недостаточно изученные динамические процессы в ледниковых щитах могут увеличить вклад Гренландии и Антарктики в повышение уровня океана в XXI веке. Новые наблюдения за динамикой Гренландского ледникового щита дают основание считать, что эти процессы интенсифицируются. В некоторых частях Западной Антарктики произошло ускорение движения ледовых масс. Хотя эти изменения обычно не связывают с антропогенным изменением климата, тем не менее есть основания ожидать, что будущее потепление может вызвать более быструю потерю массы ледниками и еще большее повышение уровня океана. В настоящее время эти изменения невозможно оценить количественно с достаточной точностью. Если наблюдаемый рост скорости расхода льда Гренландии и Антарктики будет увеличиваться линейно с повышением глобальной температуры, это дополнительно приведет к повышению уровня океана на 10–25% по сравнению с оценками, приведенными выше для трех сценариев.

7.7. Выводы

Расчеты с помощью ансамбля сложных физико-математических моделей позволили получить физически обоснованную и количественно согласованную картину изменений климата России в XXI веке. Эти изменения зачастую продолжают тенденции, наблюдавшиеся в последнюю четверть века, а по своим масштабам и интенсивности превосходят их.

В течение XXI века средняя температура приземного воздуха в целом по России будет продолжаться повышаться. Наибольшего потепления следует ожидать в Сибири и в северных регионах России, а также в Арктике. В Сибири и на Дальнем Востоке число суток с морозом может сократиться от 2 недель до месяца.

Зимой на территории России повсеместно ожидается увеличение количества осадков. Летом осадки будут увеличиваться только в средней полосе и на севере. В южных регионах России следует ожидать развития засушливых условий.

В тех регионах, где уже существует достаточное или избыточное увлажнение, будет происходить увеличение водных ресурсов. Напротив, в регионах, где водообеспеченность в настоящее время недостаточна, ожидается ее дальнейшее уменьшение. Наибольшее увеличение стока ожидается на водосборах северных и сибирских рек, а в бассейнах южных рек сток будет уменьшаться вследствие уменьшения годовых сумм осадков и увеличения испарения в теплый сезон.

На Европейской территории России ожидается преимущественное сокращение площади снежного покрова, а в Сибири, где преобладают твердые осадки, масса снега будет увеличиваться. В результате на Европейской территории следует ожидать увеличения зимнего стока, а в северной и восточной частях Азиатской территории увеличения накопленной за зиму массы снега в сочетании с ускорением ее таяния весной, что увеличивает риск наводнений.

Деграляция многолетней мерзлоты под влиянием потепления климата будет проявляться прежде всего в увеличении мощности сезонно-талого слоя. Граница, разделяющая области сезонного протаивания и сезонного промерзания, будет смещаться к северу.

Сокращение ледяного покрова Северного Ледовитого океана будет происходить в течение всего XXI века, причем преимущественно в результате сокращения площади многолетних льдов. В некоторых расчетах к концу XXI века в Северном Ледовитом океане остается только сезонный лед, так что летом Арктика полностью освобождается от морского льда.

Несмотря на неопределенности, связанные с различиями сценариев будущего антропогенного

воздействия на климат, с собственной изменчивостью климатической системы, а также ее изменчивостью в результате естественных внешних воздействий и, наконец, с несовершенством климатических моделей, достоверность полученных оценок (по крайней мере, для изменений средних характеристик) высока. Однако достоверность этих оценок для разных климатических характеристик неодинакова.

Оценки будущих изменений климата на территории России будут уточняться по мере развития моделей климатической системы Земли, в том числе в результате совершенствования их существующих и включения новых компонентов. Надежды на уточнение оценок будущих изменений экстремальности климата на территории России, которые представляют большой практический интерес, следует не в последнюю очередь связывать с прогрессом вычислительных технологий, обеспечивающим возможность проводить массовые ансамблевые расчеты с глобальными и региональными климатическими моделями высокого разрешения. Это позволит более достоверно оценивать изменения вероятностных функций распределения климатических характеристик и, в частности, изменения повторяемости и интенсивности опасных явлений.

7.8. Литература

- Абузьяров З. К., 2003.** Технология прогноза тенденций изменения уровня Каспийского моря на перспективу 6 и 18 лет, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеиздат, с. 351–363.
- Анисимов О. А., 1994.** Оценка макроклимата криолитозоны Евразии и распространение вечной мерзлоты в условиях глобального потепления, Метеорология и гидрология, № 9, с. 12–19.
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э., 1993.** Зональность криолитозоны России в условиях антропогенного изменения климата, Метеорология и гидрология, № 10, с. 87–93.
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э., Павлов А. В., 1999.** Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке, Криосфера Земли, № 4, с. 15–25.
- Анисимов О. А., Поляков В. Ю., 1999.** К прогнозу изменения температуры воздуха для первой четверти XXI столетия, Метеорология и гидрология, № 2, с. 25–31.
- Анисимов О. А., Величко А. А., Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Мохов И. И., Нечаев В. П., 2002.** Влияние изменений климата на вечную мерзлоту в прошлом, настоящем и будущем, Изве-

- стия РАН. Физика атмосферы и океана, № 1, с. 25–39.
- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., Лобанов В. А., 2003.** Современные изменения климата в области высоких широт Северного полушария, Метеорология и гидрология, № 1, с. 18–30.
- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., 2003а.** Современное потепление как аналог климата будущего, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, № 2, с. 211–221.
- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., 2003б.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности, в кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, Израэль Ю. А. (ред.), СПб, Гидрометеоиздат, с. 21–38.
- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., 2004.** Моделирование воздействия антропогенного потепления на вечную мерзлоту: учет влияния растительности, Метеорология и гидрология, № 11, с. 73–81.
- Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г. С., Мохов И. И., Семенов В. А., Спорышев П. В., 1999.** Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря, Доклады РАН, т. 366, с. 248–252.
- Арпе К., Спорышев П. В., Семенов В. А., Бенгтссон Л., Голицын Г. С., Елисеев А. В., Мелешко В. П., Мещерская А. В., Мохов И. И., 2002.** Исследование причин колебаний уровня Каспийского моря с помощью моделей общей циркуляции атмосферы, в сб.: Изменения климата и их последствия, СПб, Наука, с. 165–179.
- Борзенкова И. И., Лемешко Н. А., 2005.** Водный баланс бассейна Волги в начале XXI века (на основе палеоклиматических сценариев), Метеорология и гидрология, № 7, с. 52–60.
- Величко А. А., Нечаев В. П., 1992.** К оценке динамики вечной мерзлоты Северной Евразии в условиях глобального изменения климата, Доклады АН СССР, т. 324, № 3, с. 667–671.
- Винников К. Я., Лемешко Н. А., Сперанская Н. А., 1990.** Влагосодержание почвы и сток внетропической части Северного полушария при глобальном потеплении, Метеорология и гидрология, № 3, с. 5–10.
- Володин Е. М., Лыкосов В. Н., 1998.** Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность — почва для моделирования общей циркуляции атмосферы, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 34, № 4, с. 453–465.
- Гарагуля Л. С., Ершов Э. Д. (ред.), 2000.** Геоэкологические опасности, в кн.: Природные опасности России, т. 1, М., Крук, 315 с.
- Георгиевский В. Ю., Голубев В. С., 2003.** Испарение с поверхности Каспийского моря и его многолетняя изменчивость, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеоиздат, с. 230–238.
- Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин А. Л., Шикломанов И. А., Шикломанов А. И., 1996.** Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР, Метеорология и гидрология, № 11, с. 89–99.
- Георгиевский В. Ю., Цыценко К. В., Шалыгин А. Л., 2003.** Оценка притока поверхностных вод в Каспийское море, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеоиздат, с. 217–229.
- Говоркова В. А., Катцов В. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В., Школьник И. М., 2008.** Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России, Метеорология и гидрология, № 8, с. 5–19.
- Гречищев С. Е., 1997.** Прогноз оттаивания и распределения вечной мерзлоты и изменения криогенного растрескивания грунтов на территории России при потеплении климата, Криосфера Земли, № 1, с. 59–65.
- Демченко П. Ф., Величко А. А., Елисеев А. В., Мохов И. И., Нечаев В. П., 2002.** Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеореконокструкций, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 38, № 26, с. 165–174.
- Дучков А. В., Соколова Л. С., Павлов А. В., 2000.** Оценка современных изменений температуры воздуха и грунтов в Западной Сибири, Криосфера Земли, № 1, с. 51–58.
- Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А., 1999.** Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России, Метеорология и гидрология, № 1, с. 18–26.
- Катцов В. М., Алексеев Г. В., Павлова Т. В., Спорышев П. В., Бекряев Р. В., Говоркова В. А., 2007.** Моделирование эволюции ледяного покрова Мирового океана в XX и XXI веках, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 43, № 2, с. 165–181.
- Катцов В. М., Вавулин С. В., Говоркова В. А., Павлова Т. В., 2003.** Сценарии изменения климата Арктики в XXI веке, Метеорология и гидрология, № 10, с. 5–19.
- Кобышева Н. В. (ред.), 2001.** Климат России, СПб, Гидрометеоиздат, 655 с.
- Малевский-Малевич С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., 2000.** Модельные оценки эволюции вечной мерзлоты и распределения слоя се-

- зонного протаивания в зависимости от климатических условий в северных регионах Западной Сибири, Криосфера Земли, № 4, с. 49–57.
- Малевский-Малевиц С. П., Надежина Е. Д., 2002.** Оценки влияния изменений климата на вечную мерзлоту в России, основанные на модельных сценариях изменений климата, в кн.: Изменения климата и их последствия, Менжулин Г. В. (ред.), Наука, СПб, с. 231–239.
- Малевский-Малевиц С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Шкляревич О. Б., 2005.** Оценки эволюции теплового состояния многолетнемерзлых грунтов на основе данных о климате, полученных с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана, Криосфера Земли, № 3, с. 36–44.
- Малевский-Малевиц С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Павлова Т. В., Семиошина А. А., 2007.** Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов, Криосфера Земли, т. 11, № 1, с. 29–36.
- Малинин В. Н., 1994.** Проблема прогноза уровня Каспийского моря, СПб, Изд-во РГГМИ, 160 с.
- Манабе С., Везеролд Р., 2003.** Изменения водных запасов в масштабах столетия вследствие глобального потепления, Тезисы докладов Всемирной конференции по изменению климата, М., ИГКЭ, с. 14–15.
- Мелешко В. П., Голицын Г. С., Володин Е. М., Галин В. Я., Говоркова В. А., Мещерская А. В., Мохов И. И., Павлова Т. В., Спорышев П. В., 1998.** Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью моделей общей циркуляции атмосферы, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 34, № 4, с. 5–11.
- Мелешко В. П., Голицын Г. С., Говоркова В. А., Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Катцов В. М., Малевский-Малевиц С. П., Мохов И. И., Надежина Е. Д., Семенов В. А., Спорышев П. В., Чон В. Х., 2004а.** Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей, Метеорология и гидрология, № 4, с. 38–49.
- Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Малевский-Малевиц С. П., Надежина Е. Д., Спорышев П. В., 2004б.** Антропогенные изменения климата в XXI веке в Северной Евразии, Метеорология и гидрология, № 7, с. 5–26.
- Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В., 2008а.** Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета, Метеорология и гидрология, № 6, с. 5–19.
- Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В., 2008б.** Климат России в XXI веке. Часть 3: Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3, Метеорология и гидрология, № 9, с. 5–19.
- Мещерская А. В., Голод М. П., 2003.** О статистических сверхдолгосрочных прогнозах уровня Каспийского моря с использованием крупномасштабных климатических параметров, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеоиздат, с. 278–294.
- Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Шкляревич О. Б., 2003.** Модельные оценки влияния растительного покрова на деградацию вечной мерзлоты при потеплении климата, Метеорология и гидрология, № 3, с. 87–95.
- Мохов И. И., Хон В. Ч., 2002.** Гидрологический режим в бассейнах сибирских рек: модельные оценки изменений в XXI веке, Метеорология и гидрология, № 8, с. 77–90.
- Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч., 2003.** Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 39, № 2, с. 150–165.
- Павлов А. В., 2001.** Реакция криолитозоны на современные и ожидаемые в XXI веке климатические изменения, Разведка и охрана недр, № 5, с. 8–14.
- Павлова Т. В., Мелешко В. П., Говоркова В. А., 2001.** Характеристики теплового и водного баланса на водосборах крупных рек в модели атмосферы ГГО, рассчитанные в рамках Международного проекта сравнения моделей атмосферы AMIP-I и AMIP-II, Труды ГГО, вып. 550, с. 85–109.
- Павлова Т. В., Катцов В. М., Надежина Е. Д., Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2007.** Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения, Криосфера Земли, т. 11, № 2, с. 3–13.
- Спорышев П. В., Павлова Т. В., Мелешко В. П., Говоркова В. А., Матюгин В. А., 2003а.** Влагооборот бассейна Каспийского моря, наблюдаемый и рассчитанный по моделям общей циркуляции атмосферы, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеоиздат, с. 6–23.
- Спорышев П. В., Мещерская А. В., Мелешко В. П., Гетман И. Ф., Говоркова В. А., Голод М. П., 2003б.** Динамика климата водосбора Каспийского моря в XX веке и его возможные измене-

- ния в XXI веке по данным наблюдений и результатам моделирования с ансамблем климатических моделей, Тезисы докладов Всемирной конференции по изменению климата, М., ИГКЭ, с. 521.
- Шикломанов А. И., 1994.** Влияние антропогенных изменений глобального климата на сток р. Енисей, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 84–93.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 1995.** Влияние антропогенных факторов на сток рек бывшего СССР, в кн.: *Географические направления в гидрологии*, М., Изд-во РАН, с. 96–107.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2002.** Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы, в кн.: *Изменения климата и их последствия*, СПб, Наука, с. 52–164.
- Шикломанов И. А., Георгиевский А. В., Ежов А. В., 2003а.** Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря, в кн.: *Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна*, СПб, Гидрометеоиздат, с. 327–341.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., Шальгин А. Л., 2003б.** Причины повышения уровня Каспийского моря, в кн.: *Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна*, СПб, Гидрометеоиздат, с. 254–266.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Катцов В. М., 2006.** Возможные изменения климата на европейской части России к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 5–16.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Катцов В. М., 2007.** Региональная климатическая модель ГГО для территории Сибири, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5–18.
- ACIA: Arctic Climate Impact Assessment, 2005.** Cambridge, Cambridge University Press, 1042 p.
- Alexander L. V., Zhang X., Peterson T. C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A. M. G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D. B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., and Vazquez-Aguirre J. L., 2006.** Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys. Res.*, vol. 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Anisimov O. A., Shiklomanov N. I., and Nelson F. E., 2002.** Variability of seasonal thaw depth in permafrost regions: A stochastic modeling approach, *Ecological Modelling*, No. 3, pp. 217–227.
- Arnell N. W., 2003.** Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: A global perspective, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 7, pp. 619–641.
- Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G. S., Mokhov I. I., Semenov V. A., and Sporyshev P. V., 2000.** Connection between Caspian Sea level variability and ENSO, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 27, pp. 2693–2696.
- Arzel O., Fichet T., and Goose H., 2006.** Sea ice evolution over the 20th and 21st centuries as simulated by current AOGCMs, *Ocean Modeling*, vol. 12, pp. 401–415.
- Carnell R. and Senior C., 1998.** Changes in mid-latitude variability due to increasing greenhouse gases and sulphate aerosols, *Climate Dynamics*, vol. 14, pp. 369–383.
- Elguindi N. and Giorgi F., 2006.** Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, L08706, doi:10.1029/2006GL025943.
- Elguindi N. and Giorgi F., 2007.** Simulating future Caspian Sea level changes using regional climate model outputs, *Climate Dynamics*, vol. 28, pp. 365–379.
- Frich P., Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A. M. G., and Peterson T., 2002.** Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century, *Climate Res.*, vol. 19, pp. 193–212.
- Geng Q. Z. and Sugi M., 2003.** Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols — study with a high resolution AGCM, *J. Climate*, vol. 16, pp. 2262–2274.
- Hagemann S. and Dümenil L., 1998.** A parameterization of the lateral waterflow for the global scale, *Climate Dynamics*, vol. 14, pp. 17–31.
- Hegerl G., Zwiers F. W., Stott P. A., and Kharin V. V., 2004.** Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes, *J. Climate*, vol. 17, pp. 3683–3700.
- IPCC-TGCI: Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1, 1999.** Prepared by Carter T. R., Hulme M., and Lal M., Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 69 p.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001.** The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., and Johnson C. A. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 881 p.
- Kattsov V. and Källén E., 2005.** Future climate change: Modeling and scenarios for the Arctic, in: *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA)*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, pp. 99–150.

- Kattsov V. M., Walsh J. E., Chapman W. L., Govorkova V. A., Pavlova T. V., and Zhang X., 2007.** Simulation and projection of Arctic freshwater budget components by the IPCC AR4 global climate models, *J. Hydrometeorology*, vol. 8, pp. 571–589.
- Kharin V. V., Zwiers F. W., Zhang X., and Hegerl G., 2007.** Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations, *J. Climate*, doi:10.1175/JCL14066.1.
- Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., and Shklyarevich O. B., 2001.** Numerical simulation of permafrost parameters distribution, *Cold. Reg. Science and Tech.*, vol. 32, pp. 1–11.
- Mearns L. O., Hulme M., Carter T. R., Leemans R., Lal M., and Whetton P. H., 2001.** Climate scenario development, Chapter 13, in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton J. (ed.), IPCC, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 739–768.
- Meehl G. A., Stocker T. F., et al., 2007.** Global Climate Projections, in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., and Miller H. L. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Nadyozhina E. D., 2003.** Modeled Active Layer Depth in Russia, Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center, World Data Center for Glaciology, Digital Media, <http://nsidc.org/data/ggd606.html>.
- Nakićenović N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T. Y., Kram T., La Rovere E. L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., and Dadi Z., 2000.** IPCC Special Report on Emission Scenarios, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Nelson F. E. and Anisimov O. A., 1993.** Permafrost zonation in Russia under anthropogenic climatic change, *Permafrost and Periglacial Processes*, No. 2, pp. 137–148.
- Nicolosky D. J., Romanovsky V. E., Alexeev V. A., and Lawrence D. M., 2007.** Improved modeling of permafrost dynamics in GCM land-surface scheme, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L08501, doi:10.1029/2007GL029525.
- Sazonova T. S. and Romanovsky V. E., 2003.** A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures, *Permafrost and Periglacial Processes*, No. 2, pp. 125–140.
- Smith J. B., Hulme M., Jaagus J., Keevallik S., Mekonnen A., and Hailemariam K., 1998.** Climate change scenarios, in: *Handbook on Methods from Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies. Version 2.0*, Feenstra J. F., Burton I., Smith J., and Tol R. S. J. (eds.), UNEP and Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam, pp. 3-1–3-40.
- Stendel M. and Christensen J. H., 2002.** Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 13, pp. 10-1–10-4.
- Walsh J. E., Kattsov V., Chapman W., Govorkova V., and Pavlova T., 2002.** Comparison of Arctic climate simulations by uncoupled and coupled global models, *J. Climate*, vol. 15, pp. 1429–1446.
- Yin J. H., 2005.** A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of the 21st century climate, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, L18701, doi: 10.1029/2005GL023684.
- Zhang T., Barry R. G., Knowles K., Heggibottom J. A., and Brown J., 1999.** Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere, *Polar Geography*, vol. 23, No. 2, pp. 132–154.
- Zhang X. D. and Walsh J. E., 2006.** Toward a seasonally ice-covered Arctic Ocean: Scenarios from the APCC AR4 model simulations, *J. Climate*, vol. 19, pp. 1730–1747.
- Zhuang Q., Romanovsky V. E., and McGuire A. D., 2001.** Incorporation of a permafrost model into a large-scale ecosystem model: Evaluation of temporal and spatial scaling issues in simulating soil thermal dynamics, *J. Geophys Res.*, vol. 106, No. D24, pp. 33649–33670.

**СПИСОК АДМИНИСТРАТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ (РЕГИОНОВ),
ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ПРИ ОЦЕНКАХ
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ**

- 1. Северо-Западный ФО, запад** (Республика Карелия; области: Мурманская, Ленинградская, Новгородская, Псковская, Вологодская).
- 2. Северо-Западный ФО, восток** (Архангельская область; Ненецкий автономный округ (АО); Республика Коми).
- 3. Центральный ФО** (области: Белгородская, Брянская, Владимирская, Воронежская, Ивановская, Калужская, Костромская, Курская, Липецкая, Московская, Орловская, Рязанская, Смоленская, Тамбовская, Тверская, Тульская, Ярославская).
- 4. Южный ФО** (Краснодарский край; области: Астраханская, Волгоградская; республики: Адыгея, Дагестан, Ингушетия, Кабардино-Балкарская, Калмыкия, Карачаево-Черкесская, Чеченская, Северная Осетия – Алания).
- 5. Приволжский ФО** (республики: Башкортостан, Марий Эл, Мордовия, Татарстан, Удмуртская, Чувашская; Пермский край; области: Кировская, Нижегородская, Оренбургская, Пензенская, Самарская, Саратовская, Ульяновская).
- 6. Уральский ФО, север** (Ханты-Мансийский АО, Ямало-Ненецкий АО).
- 7. Уральский ФО, юг и Сибирский ФО, юго-запад** (области: Свердловская, Курганская, Челябинская, Тюменская, Новосибирская, Омская, Томская, Кемеровская; Алтайский край).
- 8. Сибирский ФО, север** (Таймырский АО).
- 9. Сибирский ФО, центр и юг** (республики: Алтай, Тыва, Хакасия; Красноярский край; Эвенкийский АО).
- 10. Сибирский ФО, юго-восток** (Агинский Бурятский АО, Республика Бурятия, Усть-Ордынский Бурятский АО; области: Иркутская, Читинская).
- 11. Дальневосточный ФО, северо-запад и центр** (Республика Саха).
- 12. Дальневосточный ФО, северо-восток** (области: Камчатская, Магаданская; Корякский АО, Чукотский АО).
- 13. Дальневосточный ФО, юго-восток** (области: Амурская, Сахалинская; Еврейская автономная область; Приморский край, Хабаровский край).