

РАЗДЕЛ 3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Глава 3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Т. В. Павлова

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

3.1.1. Введение

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

соких широтах, этот разброс бывает весьма значительным.

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

В то же время, анализ модельных данных, призванный оценить качество моделей климата на основе сопоставления результатов моделирования с доступными данными наблюдений, требует понимания фундаментальных свойств климатической системы, таких, например, как ее предсказуемость. Оценка качества климатических моделей предшествует оценке неопределенностей климатических прогнозов. В последнее время оценка качества климатических моделей привлекла большое количество исследователей в связи с потребностью в дискриминации климатических моделей в составе мультимодельных ансамблей, ис-

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

пользуемых в оценках будущих изменений климата. Перечисленным проблемам моделирования климатической системы посвящена обширная научная литература. На русском языке их краткое изложение можно найти в Первом оценочном докладе Росгидромета (Катцов и др., 2008).

В рамках подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013) был организован очередной проект по анализу расчетов климата с помощью глобальных климатических моделей. Основу этого проекта, получившего название CMIP5 и являющегося пятой фазой проекта CMIP (Taylor et al., 2012), составили расчеты климата XX века при заданных в соответствии с наблюдениями концентрациях парниковых газов и аэрозолей, а также сценарные расчеты климата XXI века для новой группы сценариев антропогенных выбросов – так называемых RCP, в соответствии с номенклатурой МГЭИК (см. гл. 3.2). Всего в проекте по состоянию на конец 2013 г. приняло участие более пяти десятков моделей, разработанных в разных исследовательских центрах мира.

Целью настоящей главы является оценка качества глобальных климатических моделей CMIP5. При этом не ставится задача полномасштабной и всесторонней оценки качества моделей CMIP5, подобно тому, как это делается в гл. 9 Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013). Основное внимание здесь уделено расчетам климата на территории Российской Федерации. Сравнительный анализ моделей CMIP5 проводится не только с имеющимися данными наблюдений и реанализов, но и с данными предшествующей фазы проекта CMIP – CMIP3, создавшего основу для Четвертого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2007) и первого “Оценочного доклада...” Росгидромета (ОД_РФ-1, 2008).

3.1.2. Климатические модели CMIP5

С целью научного обеспечения подготовки Пятого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению Климата (МГЭИК) (IPCC, 2013) Всемирная программа исследований климата (ВПИК) инициировала

5-ю фазу Международного проекта сравнения объединенных моделей CMIP5 (Taylor et al., 2012). В результате реализации экспериментальной части CMIP5 моделями был суммарно сгенерирован беспрецедентный совокупный объем данных – порядка петабайта (против десятков терабайт предыдущего этапа этого проекта – CMIP3 (Meehl et al., 2007)). Это увеличение явилось следствием расширения списка экспериментов, а также роста количества участвующих в проекте моделей, улучшения их пространственного разрешения и временной дискретизации архивируемых данных (суточного и более высокого разрешения). Модельные данные архивируются в Ливерморской лаборатории США и предоставляются для исследований участникам диагностической части CMIP5. Диагностическая часть CMIP5 состоит из большого числа проектов, направленных на анализ модельных данных в широком тематическом диапазоне, в том числе – в исследованиях региональных аспектов эволюции климатической системы.

По сравнению с CMIP3 (IPCC, 2007), в CMIP5 произошло определенное улучшение качества моделей как класса во многих, хотя и не во всех, аспектах. Это улучшение, очевидно, обусловлено не только увеличением разрешения многих из них, а также совершенствованием используемых вычислительных методов и параметризаций, но и включением рядом моделей описаний дополнительных климатически значимых процессов (IPCC, 2013). В частности, по оценке МГЭИК, которой присвоен *очень высокий уровень достоверности*, модели на континентальных масштабах воспроизводят наблюдаемые в течение многих десятилетий тренды и структуру изменений приземной температуры, в том числе более быстрое потепление, отмечаемое с середины XX века, и похолодания, немедленно следующие за крупными извержениями вулканов. Долгосрочные расчеты по климатическим моделям показывают тренд средней глобальной приземной температуры в 1951–2012 гг., совпадающий с данными наблюдений (*очень высокий уровень достоверности*). Однако на коротких интервалах (10–15 лет) отмечаются различия между модельными и наблюдаемыми трендами (например, с 1998 г. по 2012 г.)*. Уверенность в способ-

* Возможным причинам этого расхождения между модельными расчетами и наблюдающимся замедлением глобального потепления в 5-м оценочном докладе МГЭИК уделяется большое внимание.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Таблица 3.1.1. Модели CMIP5, использованные в анализе современного климата и его будущих изменений

№	Индекс модели и год создания	Научные организации, страна	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента	Параграф 2.3.2		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
					Ансамбль Hist	Ансамбль Hist-GHG, Hist-Nat			
1	ACCESS1.0, 2011	CSIRO&BOM, Австралия	N96 (1.875° × 1.25°) L38	MOM4p1 (1° × 0.3° - 1.0°) L50	✓			✓	✓
2	ACCESS1.3, 2011	CSIRO&BOM, Австралия	N96 (1.875° × 1.25°) L38	MOM4p1 (1° × 0.3° - 1.0°) L50	✓			✓	✓
3	BCC-CSM1.1 2011	BCC, Китай	T42 (2.8° × 2.8°) L26	MOM4 (1° × 0.3° - 1.0°) L40	✓		✓	✓	✓
4	BNU-ESM1*, 2011	BNU, Китай	T42 (2.8° × 2.8°) L26	MOM4p1 (1° × 0.3° - 1.0°) L50			✓	✓	✓
5	CanESM2, 2010	CCCMA, Канада	T63 (1.9° × 1.9°) L35	(~0.7° × ~0.9°) L40 256 × 192	✓		✓	✓	✓
6	CCSM4, 2010	NCAR, США	f09_g16 (1.25° × 0.9°) L27, 288 × 192	POP2 (1.1° × 0.3° - 0.6°) L60 320 × 383	✓		✓	✓	✓
7	CESM1-BGC, 2010	NSF-DOE-NCAR, США	f09_g16 (1.25° × 0.9°) L27 288 × 192	POP2 (1.1° × 0.3° - 0.6°) L60 320 × 384			✓	✓	✓
8	CESM1-CAM5**, 2010	NSF-DOE-NCAR, США	f09_g16 (1.25° × 0.9°) L27 288 × 192	POP2 (1.1° × 0.3° - 0.6°) L60 320 × 384			✓	✓	✓
9	CMCC-CM, 2009	CMCC, Италия	T159 (0.75° × 0.75°) L31 480 × 240	ORCA2 (2.0° × 0.5° - 2°) L31 182 × 149			-	✓	✓
10	CMCC-CMS, 2009	CMCC-CMS, Италия	T63 (1.9° × 1.9°) L95	ORCA2(2.0° × 0.5° - 2°) L31 182 × 149			✓	✓	✓
11	CNRM-CM5, 2010	CNRM, Франция	TL127 (1.4° × 1.4°) L31	ORCA1 (~1° × 1~0.3°) L42 256 × 128	✓		✓	✓	✓
12	CSIRO Mk3.6, 2010	CSIRO, Австралия	T63 (1.9° × 1.9°) L18	MOM2.2 (1.9° × 0.9°) L31	✓		✓	✓	✓
13	GFDL-CM3, 2011	GFDL, США	AM3 C48 (2° × 2.5°) L48	MOM4 T(1° × 0.3° - 1.0°) L50 360 × 200			✓	✓	✓
14	GFDL-ESM2G, 2010	GFDL, США	AM2 M45 (2° × 2.5°) L24	ТОРАЗТ(1° × 0.3° - 1.0°) L63, 360 × 210	✓		✓	✓	✓
15	GFDL-ESM2M, 2010	GFDL, США	AM2 M45 (2° × 2.5°) L24	MOM4 ((1° × 0.3° - 1.0°) L50 360 × 200	✓		✓	✓	✓
16	GISS-E2-H, 2004	NASA, США	(2.0° × 2.5°) L40	HYCOM (1° × 0.2° - 1.0°) L26			✓	✓	✓

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Таблица 3.1.1. Продолжение.

17	GISS-E2-R, 2011	NASA, США	(2.0° × 2.5°) L40	Russel (1° × 1.25°) L32	✓	✓	✓
18	HadGEM2-AO, 2008	NIMR/КМА, Корея	N46 (2.0° × 2.5°) L38	(1° × 0.3~1°) L40	✓	✓	✓
19	HadGEM2-CC, 2011	Hadley Centre, Великобритания	HadGEM2N96 (1.875° × 1.25V) L60	HadGOM2 (1° × 0.3~1.0°) L40	✓	–	✓
20	HadGEM2-ES, 2009	Hadley Centre, Великобритания	HadGEM2N96 (1.875° × 1.25°) L38	HadGOM2 (1° × 0.3~1.0°) L40	✓	✓	✓
21	INM CM4, 2009	ИВМ, Россия	(2.0° × 1.5°) L21	R1× (1.0°~0.5°) L40 360 × 340	✓	–	✓
22	IPSL-CM5A-LR ^{***} , 2010	IPSL, Франция	LMDZ4 (1.9° × 3.75°) L39 96 × 95	ORCA2 (2° × 2°) L31 1 82 × 149	✓	✓	✓
23	IPSL-CM5A-MR, 2010	IPSL, Франция	LMDZ4 (1.3° × 2.5°) L39 144 × 143	ORCA2 (2° × 2°) L31 182 × 149	✓	✓	✓
24	MIROC5 ^{****} , 2010	AORI/NIES/JAME S&T, Япония	T85L40 (1.4° × 1.4°) L40	COCO4.5R(1.4° × 0.5°) L50 256 × 224	✓	✓	✓
25	MIROC-ESM, 2010	JAMES&T/A&ORI/ NIES, Япония	T42L80 (2.8° × 2.8°) L80	COCO3.4R(1.4° × 0.5°) L44 256 × 192	✓	✓	✓
26	MIROC-ESM-CHEM, 2010	JAMES&T/A&ORI/ NIES, Япония	T42L80 (2.8° × 2.8°) L80	COCO3.4R(1.4° × 0.5°) L44 256 × 192	✓	✓	✓
27	MPI-ESM-LR, 2009	MPI, Германия	T63 (1.90 × 1.90) L47	MPIO GR16 (~1° × 0.5°) L40 256 × 220	✓	✓	✓
28	MPI-ESM-MR, 2009	MPI, Германия	T63 (1.90 × 1.90) L95	MPIO TP04(~0.4° × 0.4°) L40 802 × 404	✓	✓	✓
29	MRI-CGCM3, 2011	MRI, Япония	TL159 (1.1° × 1.1°) L48 320 × 160	MRI.COM3 (1° × 0.5°) L51 360 × 368	✓	✓	✓
30	NorESM1-M, 2011	NCC, Норвегия	F19 (2.5° × 1.9°) L26 144 × 96	MICOM (r112, 0.9° × 1~0.5°) L53 384 × 320	✓	✓	✓
31	NorESM1-ME, 2012	NCC, Норвегия	F19 (2.5° × 1.9°) L26 144 × 96	MICOM (r139, 0.9° × 1~0.5°) L53 384 × 320	✓	✓	✓

Примечания: * Данные этой модели не использовались при анализе ледовых характеристик.

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

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

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

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Таблица 3.1.2. Сводная таблица источников данных наблюдений/реанализов

Характеристика	Источник данных	Ссылка
Температура у поверхности Земли	CRU – Группа анализа данных наблюдений за климатом Университета Восточной Англии, Великобритания	New. et al., 1999; 2000
	CFSR (NCEP) – Национальные центры США по прогнозированию окружающей среды (реанализ)	Saha et al., 2010
	ERA40 – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Uppala et al., 2005
	ERA-Interim – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Dee et al., 2011
	NCEP (NCEP-DOE) – Национальные центры США по прогнозированию окружающей среды – Департамент энергетики США (реанализ)	Kanamitsu et al., 2002
	MERRA (NASA) – Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США (реанализ)	Rienecker et al., 2011
Осадки	ERA40 – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Uppala et al., 2005
	ERA-Interim – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Dee et al., 2011
	MERRA (NASA) – Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США (реанализ)	Rienecker et al., 2011
	СМАР (NOAA CPC) – Центр прогноза климата, Национальное управление по океану и атмосфере, США	Xie, Arkin, 1997
	GPCP (GSFC NASA) – Центр космических полетов Годдарда, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США	Huffman et al., 2001
	Legates	Legates, Willmott, 1990
	Serreze	Serreze et al., 2005
	Xie-Arkin	Xie P., Arkin P.A., 1998
Давление	ERA40 – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Uppala et al., 2005
	ERA-Interim – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (реанализ)	Dee et al., 2011
	NCEP – Национальные центры США по прогнозированию окружающей среды	Kanamitsu et al., 2002
Морской лед	NadISST – архив данных о ТПО и сплоченности морского льда Центра Хэдли, Великобритания	Rayner et al., 2003
	NSIDC – Национальный центр данных оснеге и льде, США	Fetterer et al., 2002
	NASA – Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США	Comiso, Nishio, 2008
Снег	Rutgers University – Ратгерский Университет, США	Robinson, Frai, 2000
Многолетняя мерзлота	IPA – Международная ассоциация по мерзлотоведению	Brown et al., 1997, 1998
Сток		Dai, Trenberth, 2002

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

ности моделей воспроизводить приземную температуру на региональном уровне ниже, чем в более крупном масштабе. Однако с *высокой достоверностью* констатируется более высокое качество моделирования региональной приземной температуры моделями CMIP5, нежели CMIP3. Отмечается значительный прогресс в моделировании экстремальных погодных и климатических явлений. Модельные средние глобальные тренды частоты экстремально жарких и экстремально холодных дней и ночей во второй половине XX века, как правило, совпадают с данными наблюдений. Хотя качество моделирования осадков в масштабах континентов повысилось, на региональном уровне оно хуже, что усугубляется неопределенностями в данных наблюдений. Модели стали лучше воспроизводить некоторые важные климатические явления. С *высокой достоверностью* повысилось качество статистики по муссонам и явлению Эль Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). Хотя климатические модели стали включать больше процессов, связанных с облаками и аэрозолями, а также с их взаимодействием, результаты воспроизведения этих процессов в моделях оставляют желать лучшего. Определенный прогресс достигнут в воспроизведении наблюдаемого тренда площади морского льда в Северном полушарии, однако в Южном полушарии (при значительном межмодельном разбросе) знаки средне-модельного и наблюдаемого (восходящего, хоть и небольшого) трендов не совпадают. Многие модели воспроизводят наблюдаемое изменение тепло-содержания верхних слоев океана (0–700 м) с 1961 г. по 2005 г. (*высокий уровень достоверности*). Климатические модели, включающие углеродный цикл (модели Земной системы), воспроизводят глобальную структуру потоков CO₂ между океаном и атмосферой с выделением CO₂ в тропиках и поглощением в средних и высоких широтах. В большинстве этих моделей масштабы глобальных стоков углерода в почву и океан за последнюю часть XX века находятся в диапазоне оценок, основанных на наблюдениях.

Следует отметить более чем двукратное, по сравнению с CMIP3, увеличение числа глобальных моделей, участвующих в сравнении. Некоторые центры представили для участия в CMIP5 более одной версии своих моделей, что внесло су-

щественный вклад в указанное увеличение. Описанная ситуация создала дополнительные трудности в применении мультимодельного ансамблевого подхода и сделала более актуальным поиск альтернатив “модельной демократии” при формировании ансамблей для оценок будущих изменений климата (см. п. 3.1.3).

В табл. 3.1.1 приводятся характеристики 31 модели CMIP5, которые были отобраны для использования в оценках будущих изменений климата (см. гл. 3.2), и большая часть которых использовалась в гл. 2.3 для установления причин наблюдающихся изменений климата.

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

В оценках качества воспроизведения моделями наблюдаемого климата использованы различные источники данных, включая реанализы. Расхождения между данными наблюдений (реанализов) на рассматриваемой территории могут достигать сравнительно больших значений и в некоторых случаях сопоставимы с межмодельным разбросом для соответствующих характеристик. Последние, впрочем, включают не только модельные ошибки, но и в определенной степени отражают собственную изменчивость климатической системы, неустраненную осреднением модельных данных по времени и пространству. Сводка источников данных наблюдений и реанализов, использованных в настоящей главе, приводится в табл. 3.1.2.

В качестве “базового” климатического периода в настоящей главе выступает период 1981–2000 гг., а также, в ряде случаев, – 1980–1999 гг., использовавшийся в Четвертом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2007) и первом “Оценочном докладе...” Росгидромета (ОД_РФ-1, 2008). Использование двух базовых периодов обусловлено наличием обоих в публикациях, посвященных анализу результатов CMIP5, в

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

особенности в сравнениях этих результатов с СМIP3. Сколько-нибудь существенных различий, возникающих в результате применения указанных базовых периодов, не обнаружено.

3.1.3. Подходы к дискриминации глобальных климатических моделей

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

Насущность дискриминации климатических моделей, формирующих ансамбли, равно как и совершенно не достаточная исследованность соответствующего круга фундаментальных проблем подтверждается нарастающим количеством научных публикаций на соответствующую тему. Дискриминация моделей стала постоянным предметом дискуссии в научном сообществе (см., напр., (Knutti et al., 2010)).

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

Экспериментирование в области комплексирования ансамблей, в том числе на основе сравнения с данными наблюдений, позволило сделать ряд выводов относительно современной ситуации и перспектив дискриминации климатических моделей. На современном уровне развития моделирования и в обозримом будущем дискриминация моделей при формировании ансамблей, предназначенных для оценки будущих изменений климата, по видимому, не может представлять собой ничего большего, нежели исключение непригодных моделей (Overland et al., 2011) или моделей приблизительно равного качества, количество которых превышает “оптимальный” размер ансамбля (Генихович и др., 2010). Исключение моделей может быть особенно уместно при формировании ансамблей для региональных оценок. В некоторых регионах некоторые модели могут оказаться непригодными для оценок будущих изменений климата из-за низкого качества воспроизведения рассматриваемой климатической характеристики (например, для приземного климата высоких широт – морского льда). Маловероятно, что при современном уровне развития моделирования присвоение разным членам мультимодельного ан-

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

самбля различных ненулевых (т. е., нецелых в пределах от 0 до 1) весов может получить достаточное научное обоснование. При этом осреднение по ансамблю моделей с равными весами не является универсально наилучшим подходом (в ряде случаев, например, предпочтительно определение “медианной” модели). Экспертные оценки региональных изменений климата на основе того или иного дискриминационного подхода к комплексованию мультимодельного ансамбля должны включать анализ робастности полученного результата. Робастность оценивается путем сопоставления с полным (недискриминированным) ансамблем, или с ансамблем, составленным на основе иной системы метрик (см., например, Катцов, Мелешко, 2008).

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

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

Как правило, качество расчетов климата с помощью той или иной модели неодинаково для разных переменных, регионов и оценочных метрик.

Причины различий редко бывают очевидны. Дискриминация моделей, таким образом, должна, по-видимому, основываться на следующих соображениях. Во-первых, должна оцениваться способность моделей воспроизводить наблюдаемый (например, в XX – начале XXI в.) климат, включая его изменчивость. Эта изменчивость включает годовой цикл климатических характеристик, а также ведущие пространственные и/или временные моды. Уже на этом первоначальном этапе из дальнейшего рассмотрения могут быть исключены некоторые модели. Следующим шагом отбора (присвоения весов) является рассмотрение воспроизведение климата XX века для переменных, представляющих интерес с точки зрения конкретной задачи (приложения). При этом, несмотря на определенную привлекательность, выбор единственной “лучшей” модели и, соответственно, полученных с ее помощью оценок будущих изменений климата, очевидно, рискован, поскольку результаты ранжирования моделей, как правило, не являются робастными по отношению к выбору метрики. Кроме того, разброс расчетов с различными моделями является мерой т. н. “структурной” неопределенности, связанной с недостатками модельных описаний различных климатообразующих процессов. Наконец, должна быть рассмотрена “полнота” модельных описаний интересующих климатических параметров.

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

В настоящем докладе реализован упрощенный вариант дискриминации моделей CMIP5 для отдельных регионов: Северное полушарие; северная полярная область в пределах 60° с.ш.; водосборы суши Северного Ледовитого океана; территория России; ее отдельные части (например, водосборы крупных рек или групп рек). Наиболее существенным допущением при этом была равнозначность (одинаковый вес) рассматриваемых климатических характеристик, включая равнозначность различных переменных (например, температуры и осадков), средних значений и изменчивости (например, среднеквадратичное от-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Таблица 3.1.3. Средние систематические ошибки расчета температуры приземного воздуха (°C) на территории России по ансамблям из 19 моделей СМIP3 для современного климата (1980–1999 гг.) и из 31 модели СМIP5 (1981–2000 гг.), по отношению к данным наблюдений CRU. Приводятся стандартные отклонения температуры, характеризующие межмодельный разброс ($\pm \sigma$)

Регионы	Ансамбль	Зима	Лето	Год
Россия	СМIP3	-1.9 ± 2.6	-1.1 ± 1.5	-1.8 ± 1.5
	СМIP5	-0.0 ± 2.0	0.2 ± 1.5	-0.3 ± 1.3
ЕТР	СМIP3	-3.4 ± 2.6	-1.1 ± 1.5	-2.3 ± 1.6
	СМIP5	-1.2 ± 2.5	0.1 ± 1.5	-0.5 ± 1.5
Западная Сибирь	СМIP3	-2.3 ± 2.7	-1.2 ± 1.7	-2.1 ± 1.5
	СМIP5	-0.4 ± 2.2	0.1 ± 1.5	-0.5 ± 1.3
Восточная Сибирь	СМIP3	-0.6 ± 3.4	-0.8 ± 1.8	-1.1 ± 1.9
	СМIP5	1.2 ± 2.7	0.2 ± 1.7	0.3 ± 1.6

клонение), средних значений и трендов, средних годовых и средних сезонных значений и т. п. При этом наборы климатических характеристик для разных регионов были различными (например, для Северного полушария, помимо прочих характеристик, рассматривалась площадь ледяного покрова океана, а для водосборов суши – речной сток).

При формировании ансамбля моделей, предназначенного для использования в настоящем Докладе, была применена “мягкая” дискриминация (по сравнению, например, с работами (Мелешко, Говоркова, 2013) или (Анисимов, Кокорев, 2013), в которых отбирались “лучшие” модели). В итоге был сформирован ансамбль из 31 модели СМIP5 (табл. 3.1.1), что, примерно, в полтора раза больше, чем число моделей СМIP3, использовавшихся в первом Оценочном докладе (ОД_РФ-1) (Катцов и др., 2008).

3.1.4. Воспроизведение наблюдаемого климата России с помощью моделей СМIP5

3.1.4.1. Температурный режим

Географическое распределение полученных в результате осреднения по ансамблю моделей СМIP5 отклонений средних годового и сезонных значений температуры воздуха от данных наблюдений характеризуется рядом особенностей (рис. 3.1.1). Над большей частью территории России модели занижают среднюю годовую температуру, по отношению к данным реанализов. По сравнению с данными анализа CRU, занижение темпера-

туры отмечается, главным образом, на ЕТР и на Дальнем Востоке. В то же время над Сибирью отмечается завышение температуры ансамблем моделей, по отношению к CRU. Наиболее заметной систематической погрешностью в холодный период является занижение температуры над северными регионами Европейской территории России и Западной Сибири.

По отношению к среднему по ансамблю моделей СМIP3, практически на всей территории России температура воздуха у поверхности Земли в ансамбле СМIP5 повысилась, особенно в зимний период (рис. 3.1.2). Тем самым систематическая погрешность, присущая ансамблю моделей СМIP3, в целом для территории России уменьшилась (табл. 3.1.3).

Большинство моделей успешно воспроизводит сезонный ход температуры приземного воздуха на крупных водосборах (рис. 3.1.3). В большинстве случаев среднемесячные наблюдаемые значения температуры (и, зачастую, разбросы между данными наблюдений/реанализов) оказываются в пределах одного стандартного отклонения от среднего по модельному ансамблю (рис. 3.1.2П, 3.1.4Па). Межмодельный разброс заметно превышает среднюю ошибку по ансамблю.

Качество расчета экстремальных значений приземной температуры воздуха в моделях СМIP5 несколько выросло по сравнению с моделями предыдущего поколения. Повышение качества расчетов затронуло, в первую очередь, экстремально высокие температуры воздуха, в то время как расчет экстремально низких температур остался примерно на прежнем уровне качест-

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

ва. Так, например, пространственное распределение среднего за 20 лет годового максимума температуры воздуха (в умеренных широтах отмечается обычно летом) в моделях СМIP5 хорошо согласуется с данными реанализа, в то время как оценки СМIP3 несколько заниженные относительно тех же данных (рис. 3.1.4). Среднее отклонение годового максимума температуры на территории суши Северного полушария для ансамбля СМIP3 составляет -1.8°C , а для СМIP5 – -0.8°C . На территории России отклонения составляют -1.8°C и -0.1°C , соответственно. Что касается среднего годового минимума температуры воздуха, то для моделей обоих поколений характерной систематической погрешностью остается недооценка экстремальности зимнего термического режима. Как следует из рисунка 3.1.4, несмотря на общую удовлетворительную согласованность пространственных распределений экс-

тремально низких температур между реанализом и моделями СМIP3 и СМIP5, модельные температуры завышены соответственно на 4.1°C и 5.1°C (по России) и на 4.5°C и 4.1°C на территории суши Северного полушария. В небольших по размеру областях на севере Центральной и Восточной Сибири абсолютные значения отклонений температуры в СМIP5 от реанализа оказываются несколько большими по сравнению с отклонениями СМIP3. Однако в целом качество расчетов низкотемпературных экстремумов в моделях разных поколений близкое. При этом необходимо отметить, что в настоящее время климатологии экстремальных явлений континентального масштаба, основанной на данных наземных наблюдений и пригодной для сравнения с модельными оценками, не существует, а в оценках экстремальности термического режима по реанализам имеется значительная неопределенность, особенно в регионах с

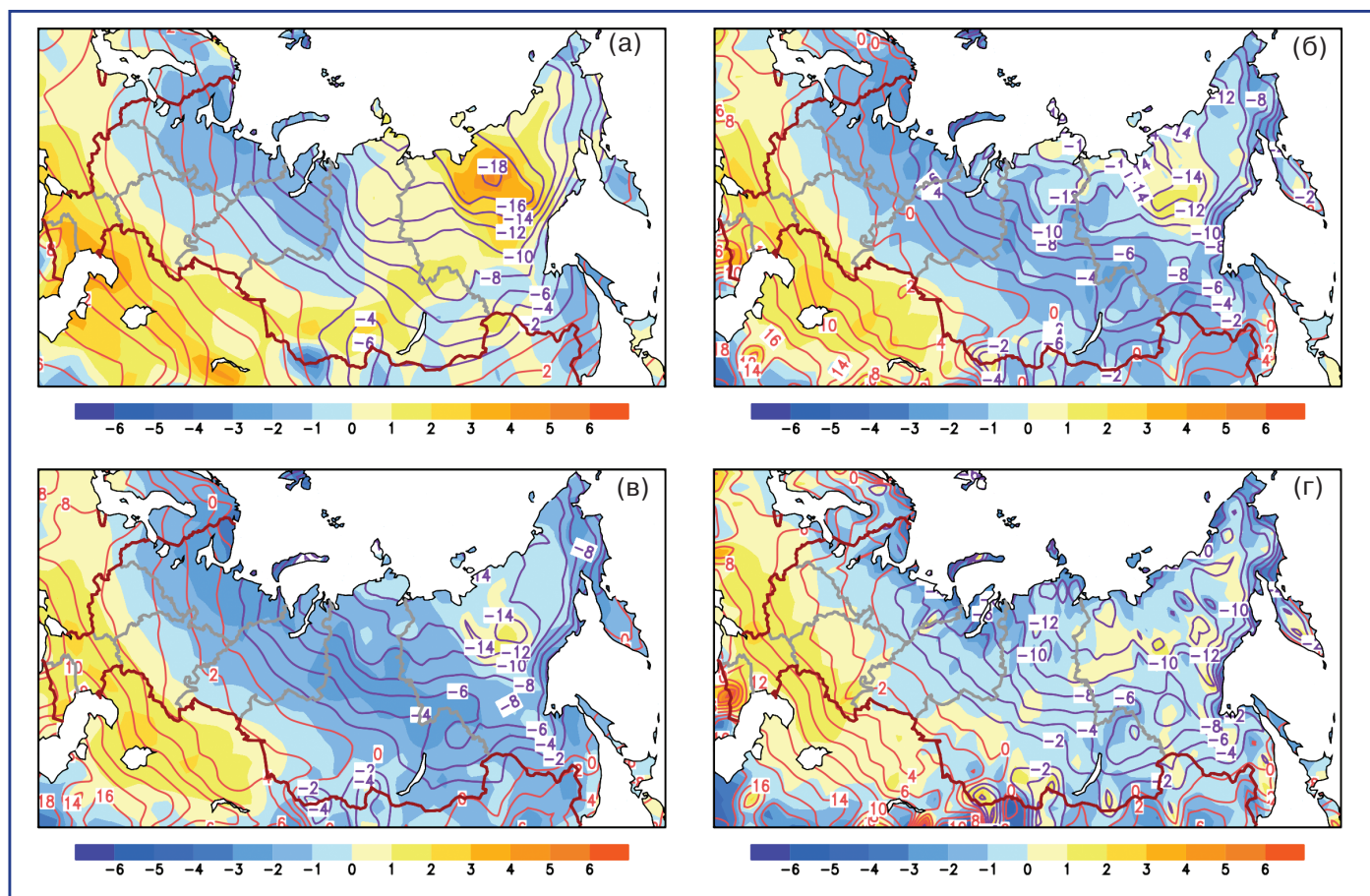


Рис. 3.1.1. Распределения средней систематической ошибки расчета средней за год температуры приземного воздуха (1981–2000 гг.) (показана цветом, $^{\circ}\text{C}$), полученной в ансамбле из 31 модели СМIP5, по отношению к (а) данным наблюдений CRU и (б–г) данным реанализов ERA-Interim, ERA40, MERRA, соответственно, (табл. 3.1.2) (показаны изолиниями).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

редкой сетью метеорологических наблюдений (Kharin et al., 2005). К таким регионам относятся, в первую очередь, Сибирь и российский Крайний Север, для которых сравнение модельных оценок с реанализом представляется менее надежным по сравнению с западными регионами России.

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

Завышение числа дней в году с минимальной суточной температурой воздуха ниже 0°C на 20

суток сократилось при использовании результатов расчета температуры по моделям СМIP5 по сравнению со СМIP3 более чем в два с половиной раза (до 8 суток). Заметно возросла и степень согласованности между рассчитанной по моделям непрерывной длительностью морозного периода (периода со средней суточной температурой приземного воздуха ниже 0°C) и данными реанализа: завышение длительности такого периода на 9 дней, рассчитанное по температуре из моделей СМIP3, сменилось по оценкам моделей нового поколения незначительным занижением (на 4 дня).

В то же время, существенных различий в описании средней продолжительности волн тепла летом и волн холода зимой, рассчитанных относительно соответствующих 90 и 10 квантилей максимальной и минимальной суточных температур, не отмечается. По данным обоих ансамблей прослеживается тенденция к незначительному завы-

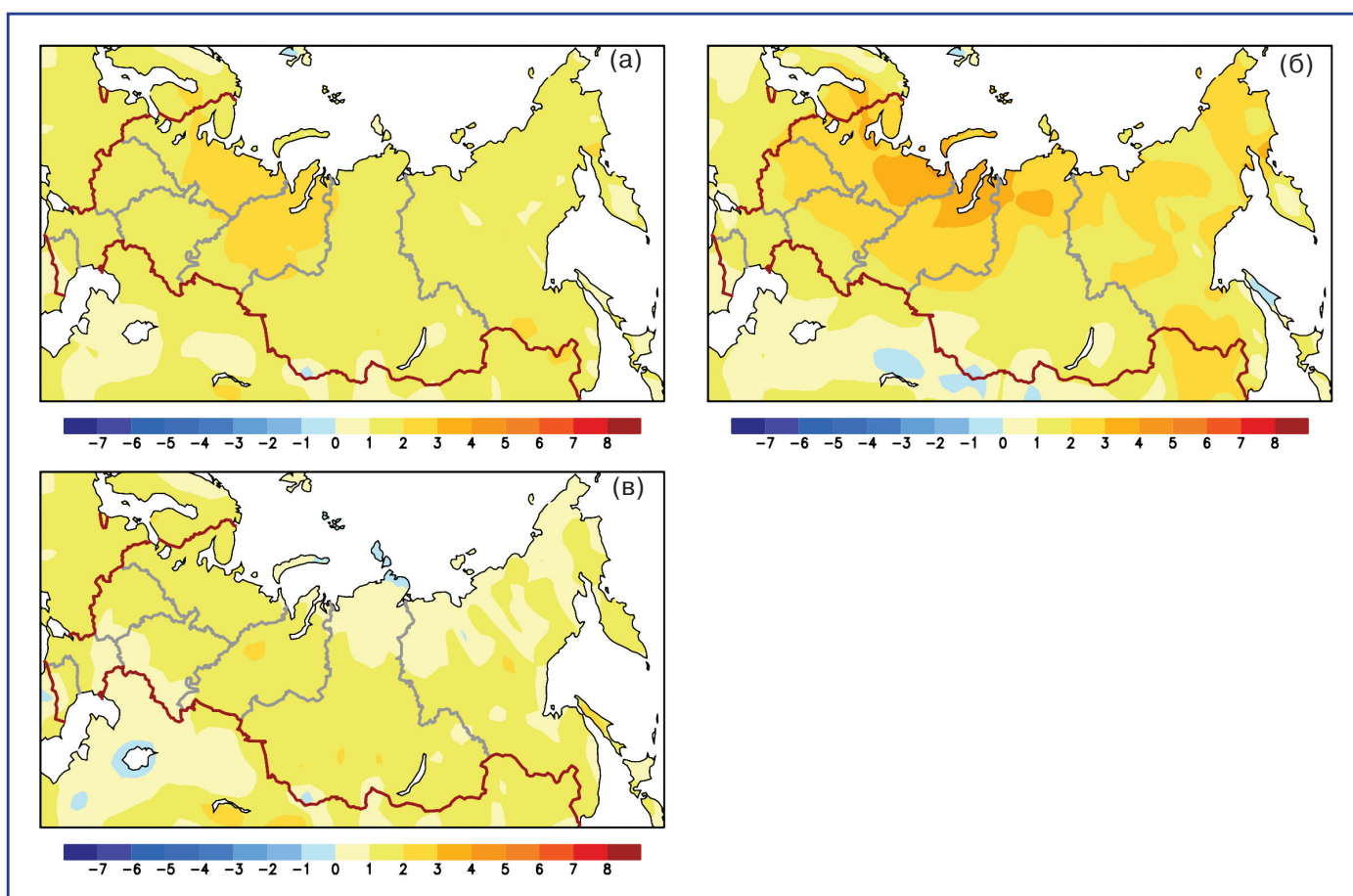


Рис. 3.1.2. Распределения разности (а) средней за год, (б) зимней и (в) летней температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) между ансамблями СМIP5 (1981–2000 гг.) и СМIP3 (1980–1999 гг.).

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

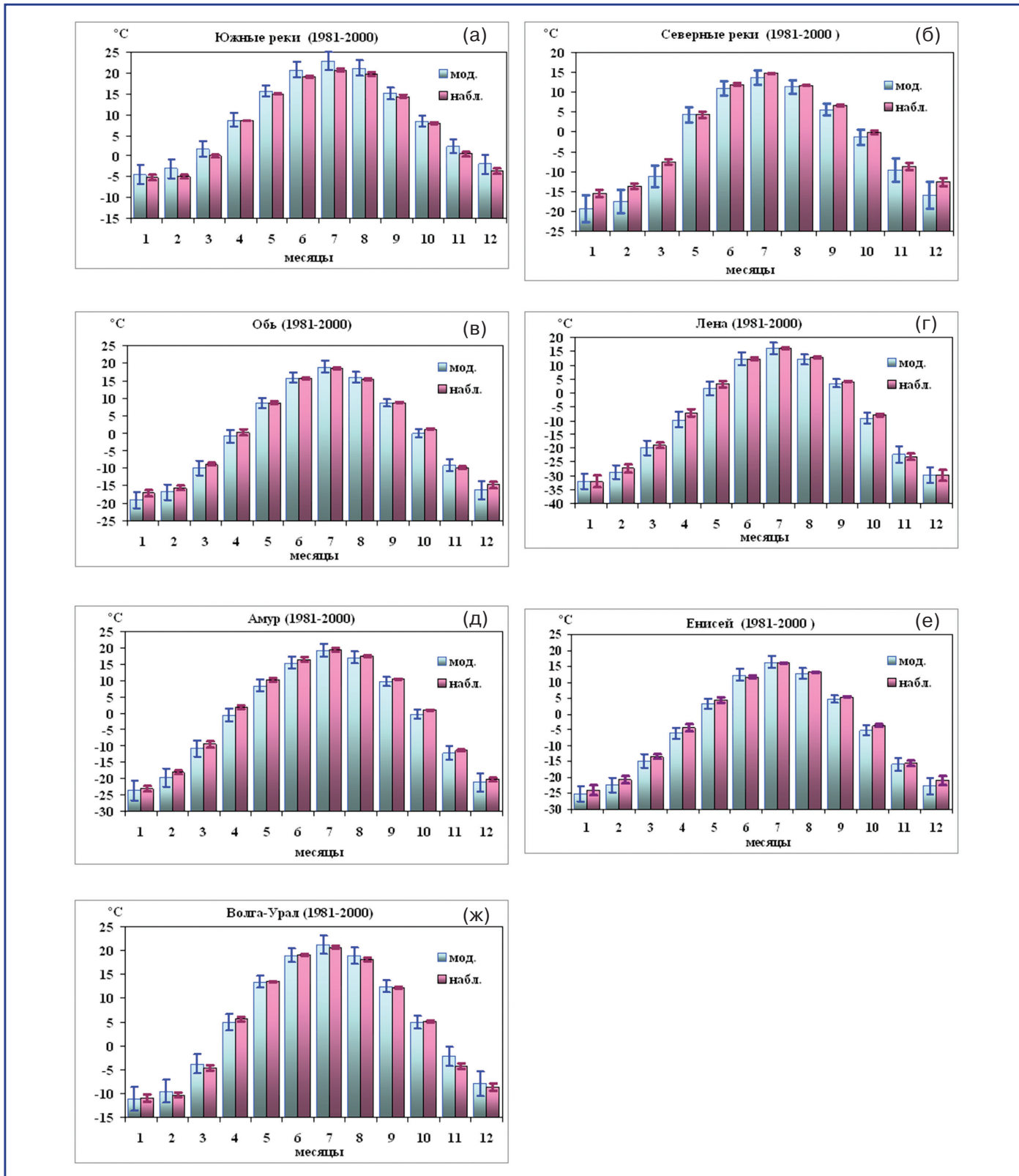


Рис. 3.1.3. Сезонные изменения температуры приземного воздуха на водосборах российских рек (1981–2000 гг.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели СМIP5 (“мод.”) и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”). В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm \sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов. Расчеты представлены для семи водосборов: (а) Южные реки (Днепр, Днестр, Дон, Кубань); (б) Северные реки (Западная Двина, Печора, Мезень); (в) Обь; (г) Лена, (д) Амур, (е) Енисей, (ж) Волга-Урал.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

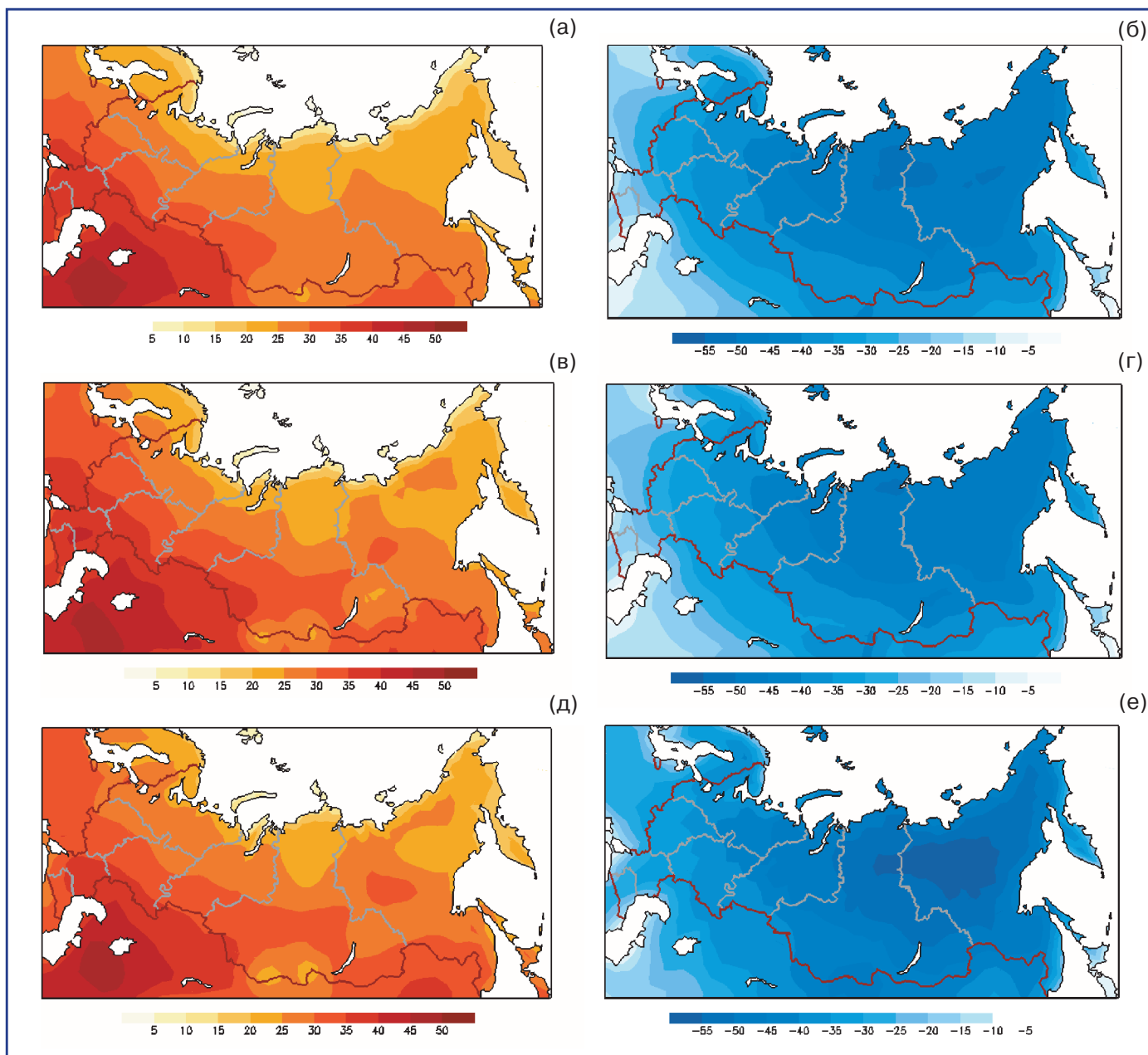


Рис. 3.1.4. Пространственные распределения среднего за период 1980–1999 гг. годового максимума (а, в, д) и минимума (б, г, е) температуры приземного воздуха по оценкам ансамбля моделей CMIP3 (а, б), CMIP5 (в, г) и по данным реанализа (д, е) NCEP-DOE (Kanamitsu et al., 2002). Рисунки (а, б, д, е) были включены в (ОД_РФ-1, 2008). Оценки рассчитаны с использованием ансамбля 9 моделей (номера 5, 11, 12, 14, 20, 22, 24, 27, 29 из табл. 3.1.1) одних и тех же исследовательских групп, принимавших участие в CMIP3 и CMIP5.

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

3.1.4.2. Циркуляционный режим атмосферы

Изменчивость циркуляции атмосферы над Северной Евразией зависит от сезонного положения и интенсивности основных центров действия атмосферы в Северном полушарии. Ансамбль моделей CMIP5 достаточно успешно воспроизводит положение и интенсивность Исландского и Алеутского минимумов и Сибирского максимума зимой

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

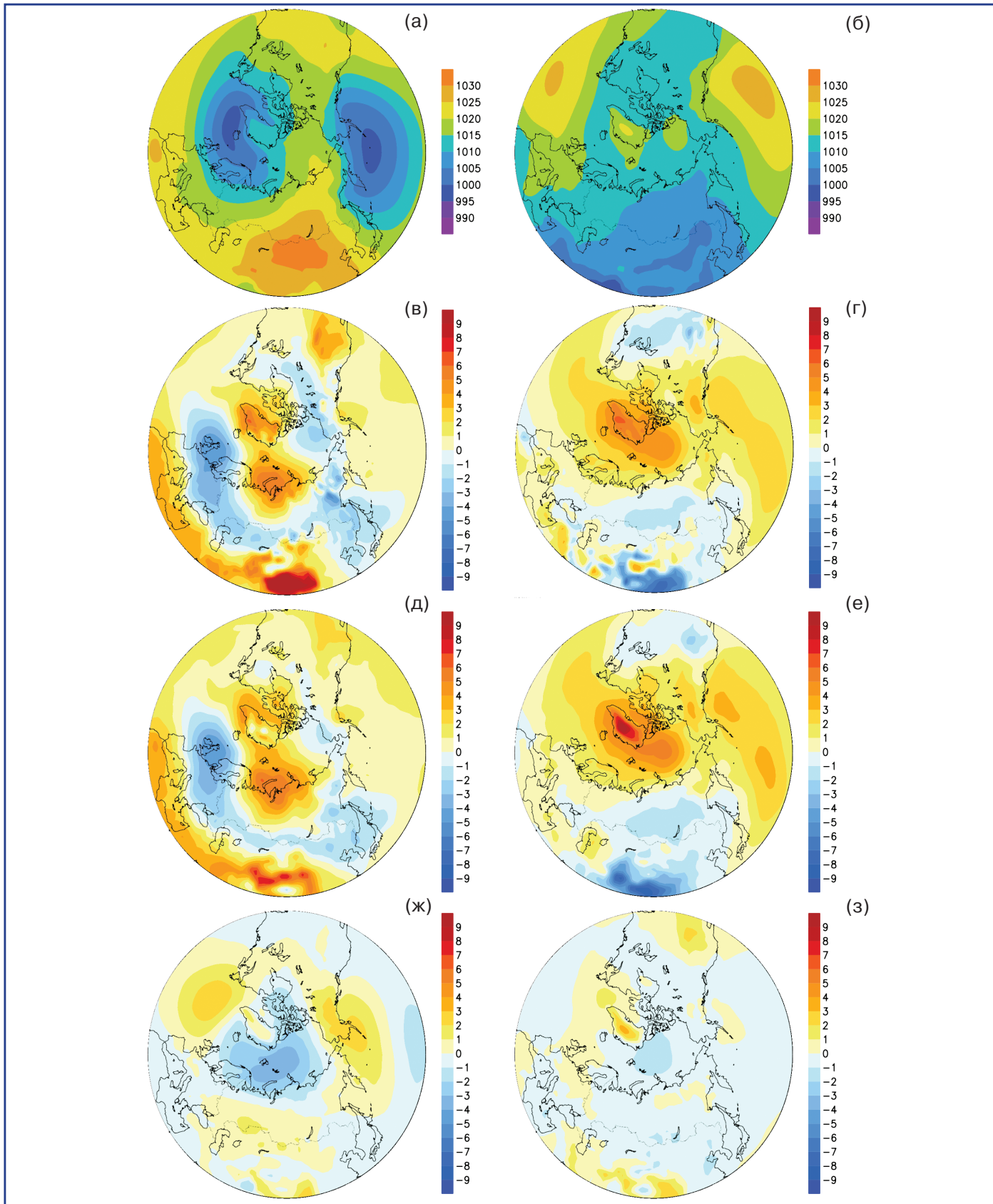


Рис. 3.1.5. Атмосферное давление на уровне моря (гПа) в среднем за период 1981–2000 гг. (а) зимой и (б) летом, полученное в ансамбле из 31 модели CMIP5, а также разности давления для зимы (в, д, ж) и лета (г, е, з) между ансамблем CMIP5 и реанализом ERA-Interim (в, г), CMIP5 и реанализом NCEP-2 (д, е), CMIP5 и CMIP3 (ж, з).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

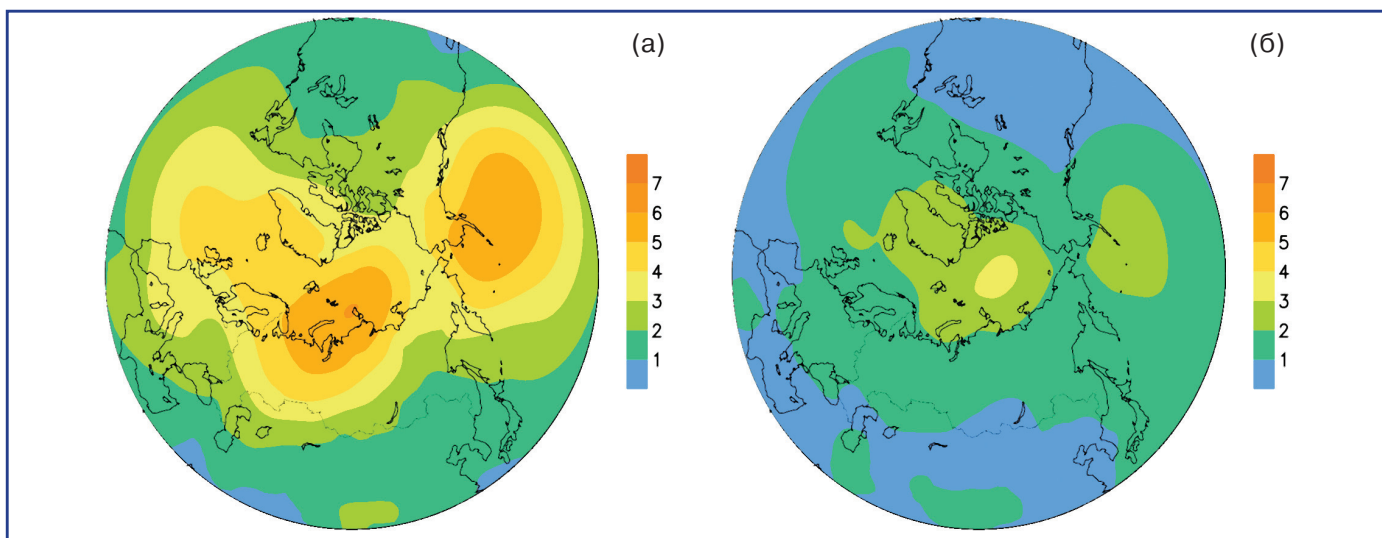


Рис. 3.1.6. Межгодовая изменчивость атмосферного давления на уровне моря (гПа) (а) зимой и (б) летом, полученная в ансамбле из 31 модели СМIP5 (1981–2000 гг.).

(рис. 3.1.5). Летом более выраженными оказываются субтропические антициклоны над Атлантическим и Тихим океанами, причем в модельных расчетах они получились несколько более интенсивными, чем показывают данные наблюдений.

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

Модели реалистично воспроизводят области максимальной изменчивости атмосферного давления на уровне моря зимой и летом (рис. 3.1.6). Изменчивость несколько занижается моделями, по сравнению с данными наблюдений, особенно зимой. Однако, в ансамбле СМIP5 отмечается некоторое улучшение в воспроизведении этой характеристики, по сравнению с СМIP3 (см. (Катцов и др., 2008), рис. 5.8).

3.1.4.3. Атмосферные осадки и речной сток

В целом, ансамбль моделей СМIP5 реалистично воспроизводит основные крупномас-

штабные характеристики осадков (рис. 3.1.7). На Европейской территории России наблюдаются меньшие по абсолютной величине погрешности среднегодовых осадков. Тенденция к завышению расчетных осадков отмечается на большей части Азиатской территории России. Распределения систематических ошибок по территории России зависят от того, какие данные наблюдений за осадками использованы при анализе. Интерпретировать полученные отклонения достаточно сложно, учитывая их большую пространственную изменчивость и большой разброс между данными наблюдений/реанализов*. Как и в СМIP3, межмодельные стандартные отклонения в ансамбле СМIP5 оказываются, как правило, значительно большими, чем средние за год погрешности для всей территории России.

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

Средние сезонные колебания осадков в бассейнах крупных российских рек, рассчитанные по моделям СМIP5, в целом, удовлетворительно согласуются с наблюдениями/реанализами (рис. 3.1.8), особенно если учесть значительные расхождения между данными наблюдений (реанализов) из разных источников.

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

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Модельные оценки сезонного хода осадков для федеральных округов РФ представлены в Приложении (рис. 3.1.3П, 3.1.4Пб). Среднегодовые оценки стока для крупных водосборов средних и высоких широт хорошо согласуются с данными наблюдений (рис. 3.1.9). По сравнению с ансамблем CMIP3 (ОД_РФ-1, 2008; рис. 5.11), качественного улучшения расчетов в ансамбле CMIP5 не произошло.

3.1.4.4. Снежный покров суши и многолетняя мерзлота

Прогностическими характеристиками снежного покрова суши в климатических моделях обычно являются его толщина, удельная (на единицу площади) масса или водный эквивалент, температура поверхности и в толще снега, а также, в некоторых моде-

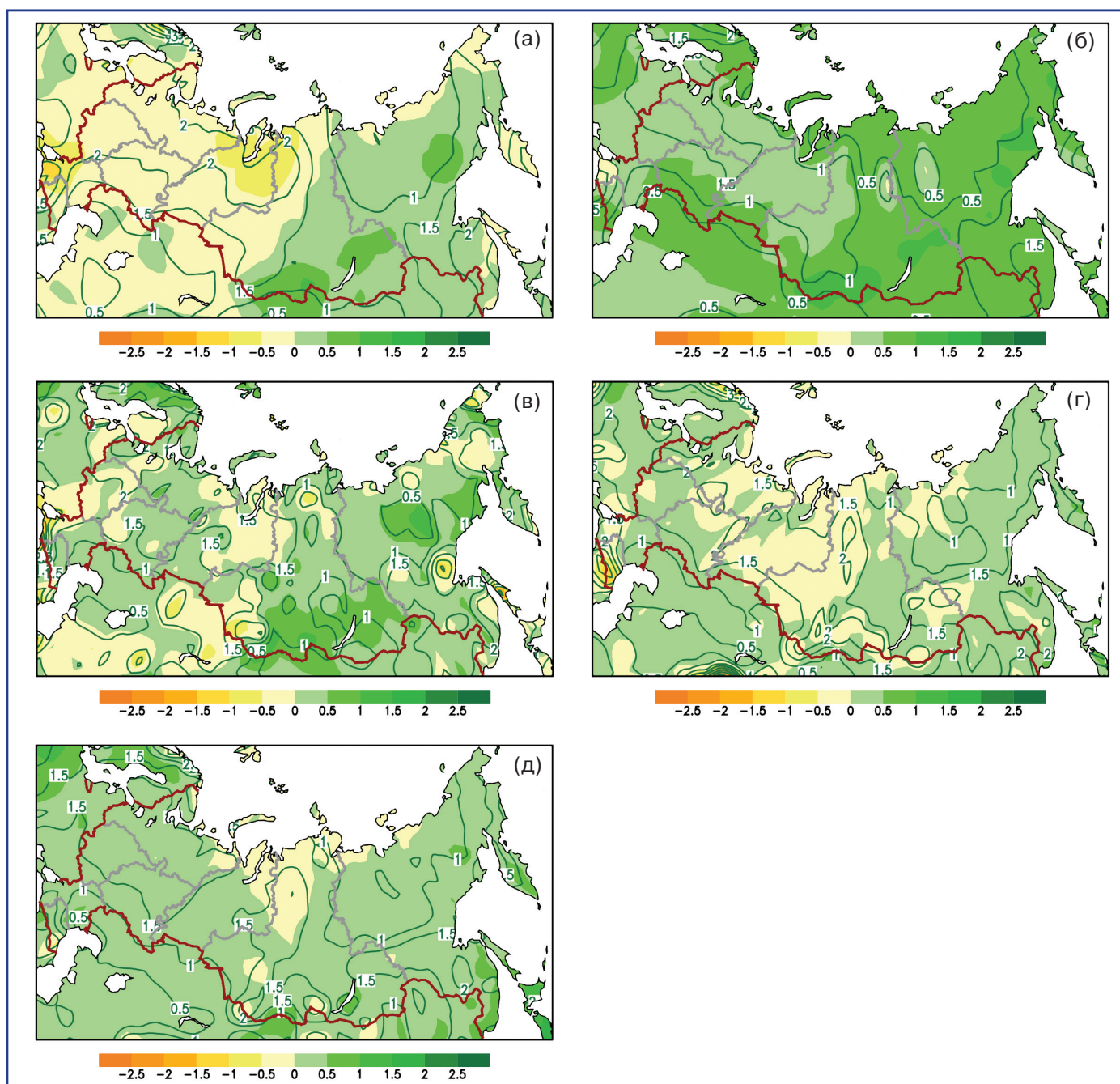


Рис. 3.1.7. Распределения средней систематической ошибки расчета средних за год атмосферных осадков (1981–2000 гг.) (показана цветом, мм/сутки), полученной в ансамбле из 31 модели CMIP5, по отношению к данным наблюдений (а) GPCP, (б) XA, (в) Legates и данным реанализов (г) ERA-Interim, (д) ERA40, соответственно, (табл. 3.1.2) (показаны изолиниями).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

лях, доля суши, покрытая снегом. Благодаря спутниковым наблюдениям площадь снежного покрова является наиболее надежно измеряемой характеристикой, и потому используется в сравнительных анализах модельных расчетов в качестве основной.

В целом ансамбль моделей СМIP5 удовлетворительно воспроизводит площади, занятые снегом и

многолетней мерзлотой в Северном полушарии, при этом соответствие расчетных и наблюдаемых границ зоны многолетней мерзлоты лучше в Евразии, чем в Северной Америке, а для снежного покрова суши – наоборот (рис. 3.1.10). По сравнению с моделями СМIP3, произошло некоторое улучшение качества воспроизведения площади снежного покрова

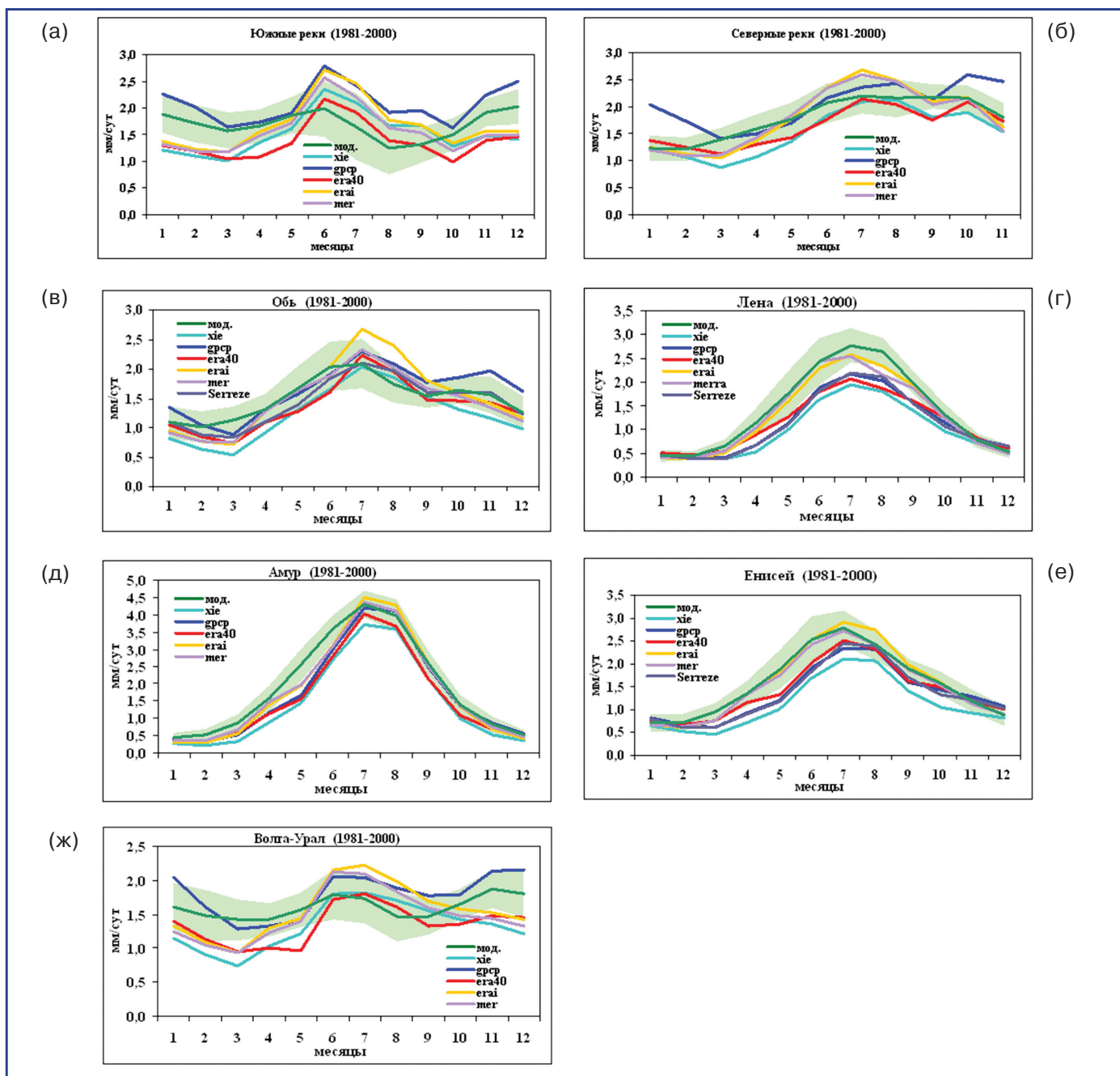


Рис. 3.1.8. Сезонный ход осадков (мм/сутки) на водосборах российских рек (1981–2000 г.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели СМIP5 (“мод.”) и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”) (см. табл. 3.1.2). Заштрихованная область показывает межмодельные стандартные отклонения от среднего по ансамблю моделей ($\pm \sigma$). Расчеты представлены для семи водосборов: (а) Южные реки (Днепр, Днестр, Дон, Кубань); (б) Северные реки (Западная Двина, Печора, Мезень); (в) Обь; (г) Лена, (д) Амур, (е) Енисей, (ж) Волга-Урал.

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

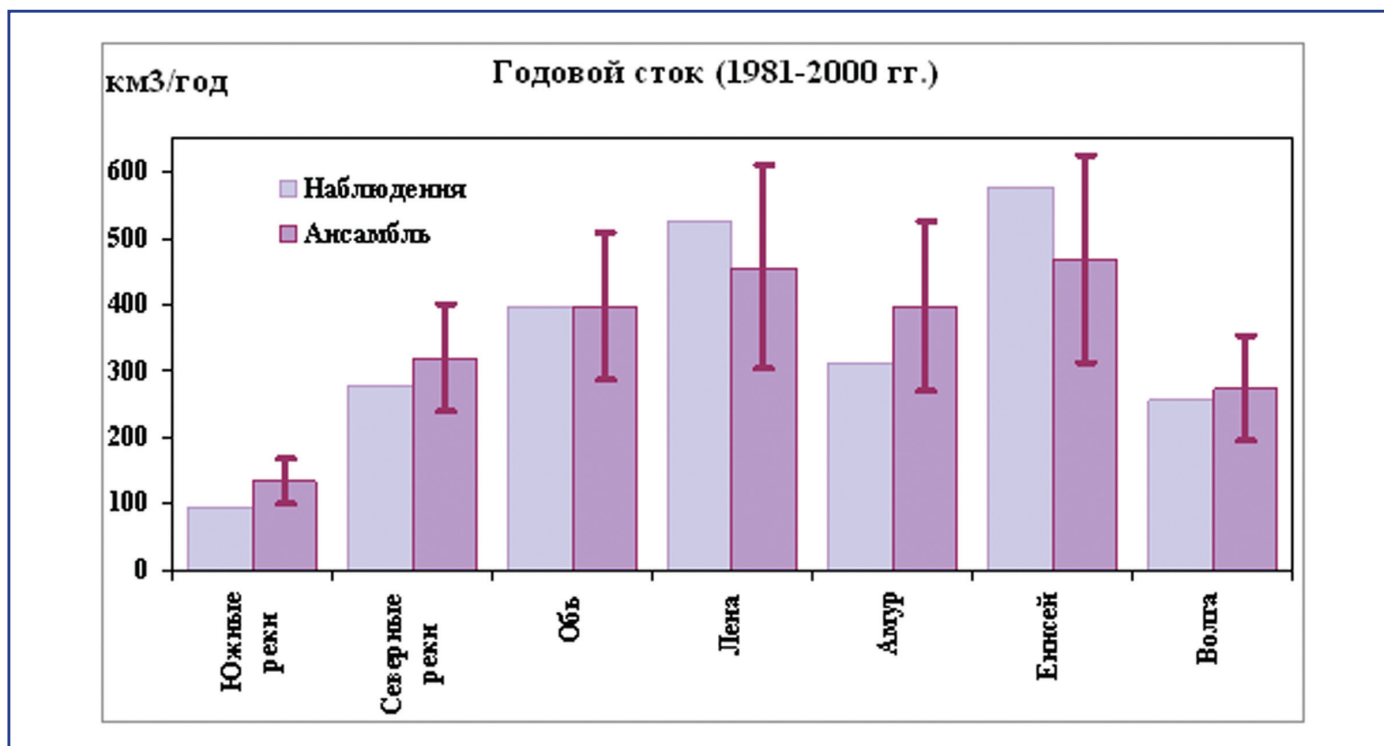


Рис. 3.1.9. Средние значения годового стока (км³/год) на крупных водосборах, рассчитанные по ансамблю из 26 моделей (1981–2000 гг.) и полученные по данным наблюдений (Dai, Trenberth, 2002; Hagemann, Dumenil, 1998). В столбцах с модельными данными, помимо средних, приводятся стандартные отклонения, характеризующие межмодельный разброс ($\pm \sigma$).

в моделях СМIP5, хотя по-прежнему, часть моделей неудовлетворительно воспроизводит площадь снежного покрова на территории Китая и Монголии.

По сравнению с моделями СМIP3, ансамбль моделей СМIP5 лучше воспроизводит сезонный ход площади снега, лишь немного занижая ее в зимние месяцы и в июне, но межмодельный разброс остается значительным (рис. 3.1.11). Столь же существенный разброс между моделями характерен и для расчетов массы снега. По сравнению с ансамблевыми расчетами по 17 моделям СМIP3 (Павлова и др., 2007, рис. 2), существенных изменений в результатах моделирования этой характеристики снежного покрова не обнаруживается (рис. 3.1.12а).

Сравнение с данными наблюдений по-прежнему затруднительно в связи с отсутствием надежных данных наблюдений. К настоящему времени разработан ряд методов и моделей восстановления на основе спутниковых данных таких характеристик, как площадь, высота и водный эквивалент снежного покрова. В основном методы отличаются в зависимости от типа используемого датчика, но могут включать учет зависимости от преобладающего типа

растительности, рельефа и климатических условий. Подробный обзор методов получения и использования спутниковой информации для восстановления данных о снежном покрове приведен в работе (Dietz et al., 2011). Как показывают исследования (Китаев, Титкова, 2010; Носенко и др., 2005; 2006), погрешность восстановленных данных водного эквивалента снега может быть весьма значительна по сравнению с данными наземных измерений.

Данные наземных наблюдений свидетельствуют о том, что в последние десятилетия на территории России происходит увеличение высоты снежного покрова как максимальной, так и средней за зиму (Бульгина и др., 2011). В работе (Бульгина и др., 2011) выполнен анализ пространственных и временных изменений снежного покрова за период 1966–2010 гг. и показано (рис. 6, 8 в этой работе), что положительный тренд в рядах средней за зиму высоты снега обнаруживается для регионов атлантической и сибирской Арктики, южной части Западной Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока, а максимальный за зиму запас воды в снеге увеличился на севере Восточ-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

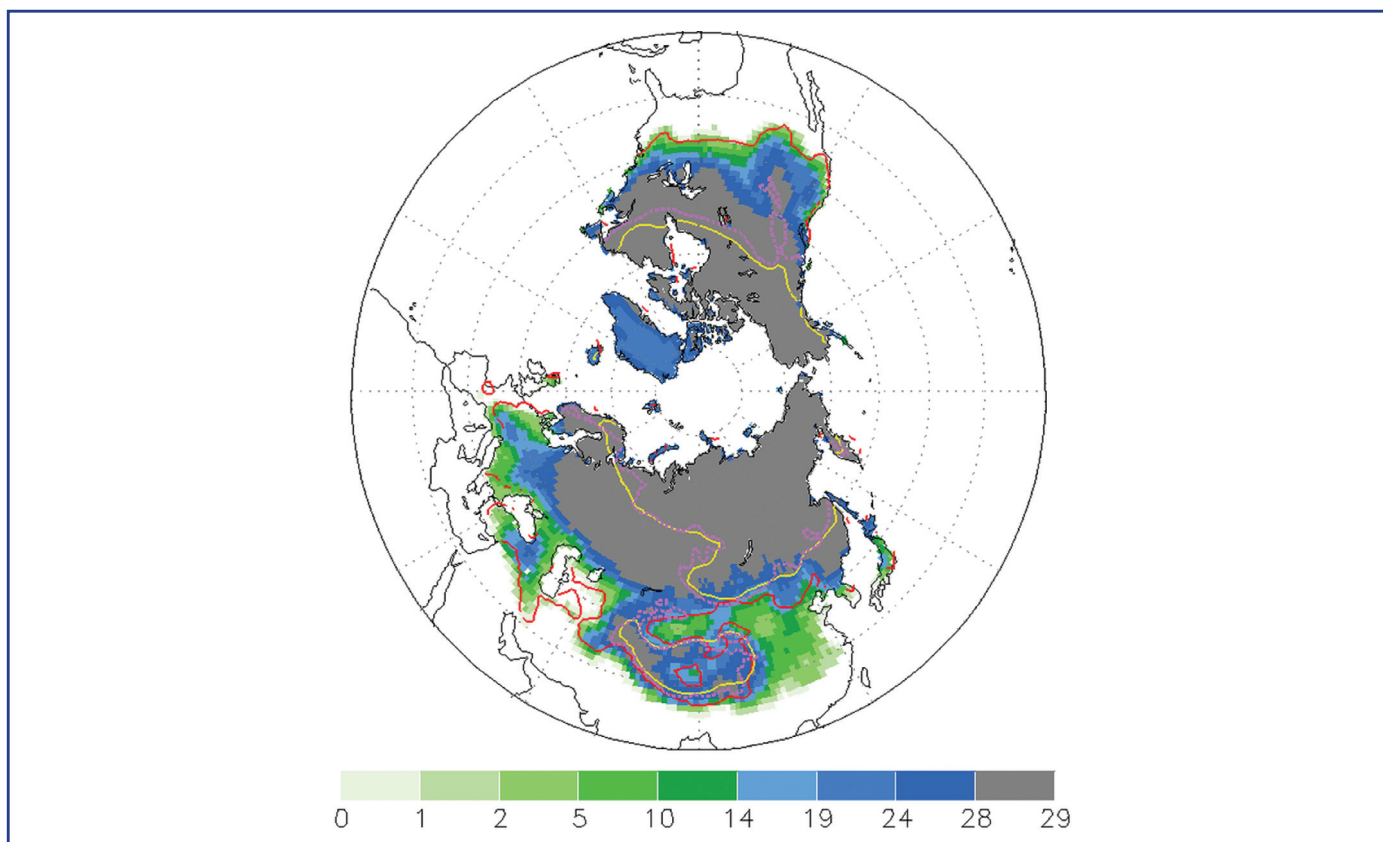


Рис. 3.1.10. Распределение снежного покрова суши в Северном полушарии в расчетах с моделями CMIP5 для февраля: за период 1980–1999 гг. В каждой ячейке модельной сетки различными цветами, в соответствии со шкалой внизу рисунка, показано количество моделей, в которых для этой ячейки получен снег удельной массой не менее 5 кг/м². Красная линия – наблюдаемые границы снежного покрова (не менее 20% дней месяца) за период 1980–1999 гг., полученные по данным (Robinson, Frei, 2000). Желтая линия – расчетная граница зоны многолетней мерзлоты, фиолетовая штриховая линия – современная наблюдаемая граница многолетней мерзлоты. (Brown et al., 1997, 1998).

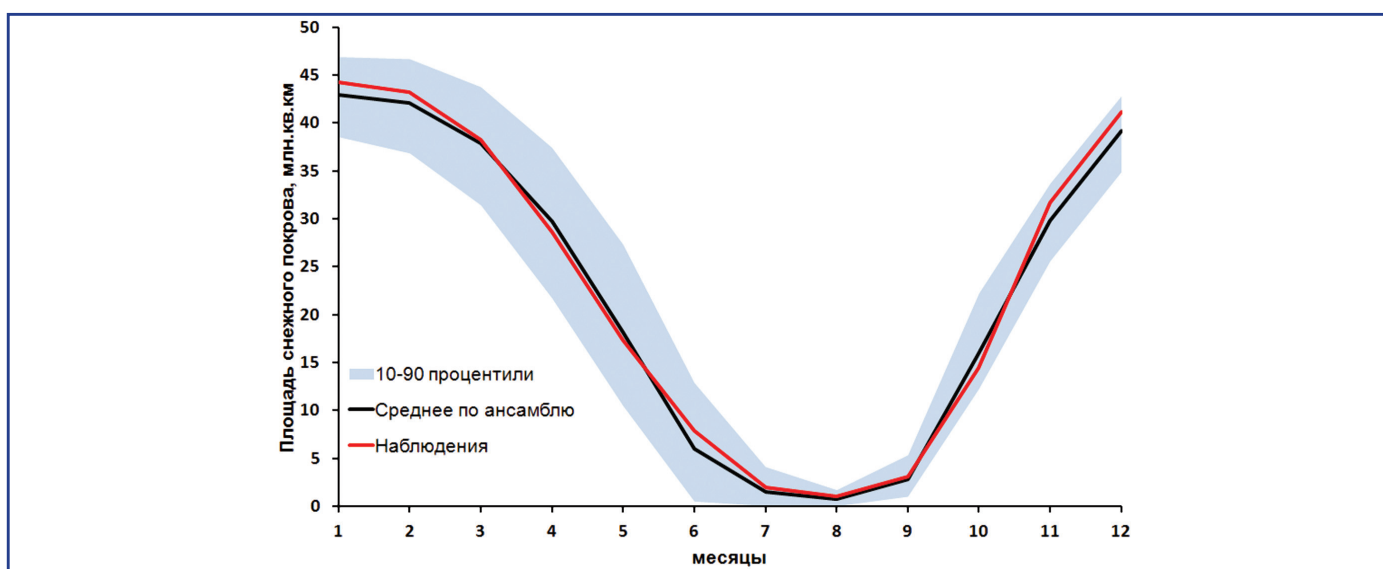


Рис. 3.1.11. Сезонный ход площади снежного покрова суши Северного полушария без учета Гренландии (млн км²) по данным модельных расчетов и данным наблюдений (Robinson, Frei, 2000) за период 1980–1999 гг. Голубая штриховка – межмодельный разброс в пределах 10-й и 90-й процентилей.

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

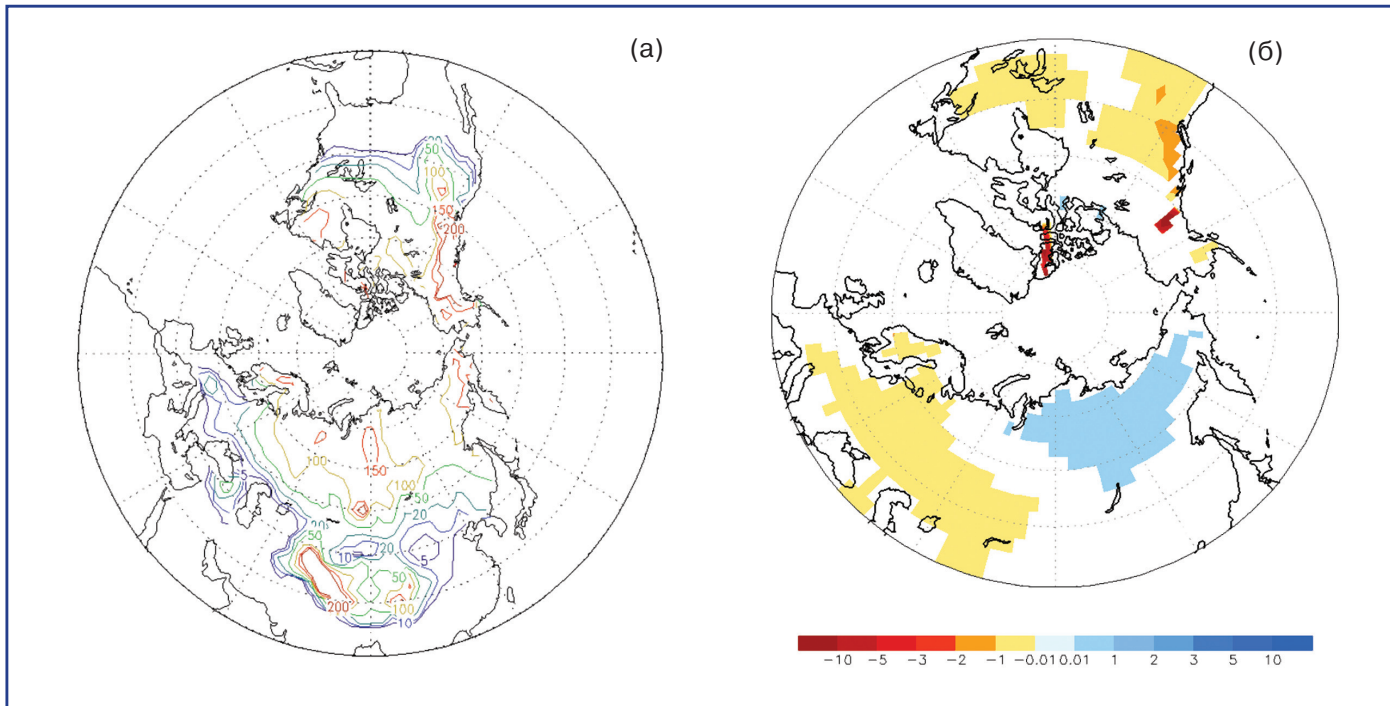


Рис. 3.1.12. Удельная масса снега по данным ансамбля CMIP5: (а) удельная масса ($\text{кг}/\text{м}^2$) для февраля за период 1980–1999 гг. и (б) линейный тренд среднемесячных значений удельной массы снежного покрова для марта 1966–2010 гг. ($\text{кг}/\text{м}^2$ в год). Показаны области статистически значимых трендов.

но-Европейской равнины, юге Западной Сибири, на Дальнем Востоке и центральной части Восточной Сибири. Анализ модельных данных за этот же период показал, что в некоторых моделях и в среднем по ансамблю обнаруживается увеличение среднемесячной массы снежного покрова в основном для регионов Восточной Сибири (рис. 3.1.12).

Расчеты линейных трендов среднегодовой площади снежного покрова суши в Северном полушарии в ансамбле моделей CMIP5 за периоды 1900–1999 и 1980–1999 гг. показали результаты, близкие к расчетам по моделям CMIP3, а именно: для периода 1900–1999 гг. все члены рассмотренного ансамбля CMIP5 демонстрируют сокращение площади снежного покрова суши, величина тренда оказывается равной -6.0 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ против -6.2 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ в ансамбле CMIP3. Для периода 1980–1999 гг. в пяти моделях CMIP5 выявляется рост среднегодовой площади снежного покрова, в двадцати пяти – сокращение площади снега, величина среднего по ансамблю CMIP5 линейного тренда оказывается сопоставимой с соответствующей оценкой, полученной по данным моделей CMIP3: -31.6 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ против -32.5 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$. Наблюдаемый тренд за период

1980–1999 гг. составил -25.9 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$. (Павлова и др., 2013)

Анализ данных наблюдений (Brown, Robinson, 2011) показывает сокращение площади снежного покрова весной (март–апрель) в период с 1922 г. по 2010 г., при этом скорость сокращения возросла за последние 40 лет. Линейный тренд изменения мартовской и апрельской площади снега в период 1922–2010 гг. составил -32.4 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ и -47.2 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ соответственно, и -72.6 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ и -83 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ соответственно в период 1970–2010 гг. (Brown, Robinson, 2011). Тренды, полученные по данным (Robinson, Frei, 2000) несколько меньше, чем приведенные в работе (Brown, Robinson, 2011), но и в этом случае скорость сокращения площади снега в эти месяцы в среднем по ансамблю из 28 моделей CMIP5 оказывается меньше наблюдаемой: -42.7 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ в марте и -54.4 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ в апреле против наблюдаемых -66.4 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ и -70 тыс. $\text{км}^2/\text{год}$ соответственно (Павлова и др., 2013).

Снежный покров (площадь его распространения, высота, продолжительность залегания) оказывает существенное влияние на температурный режим многолетнемерзлых грунтов. Оценки площади

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

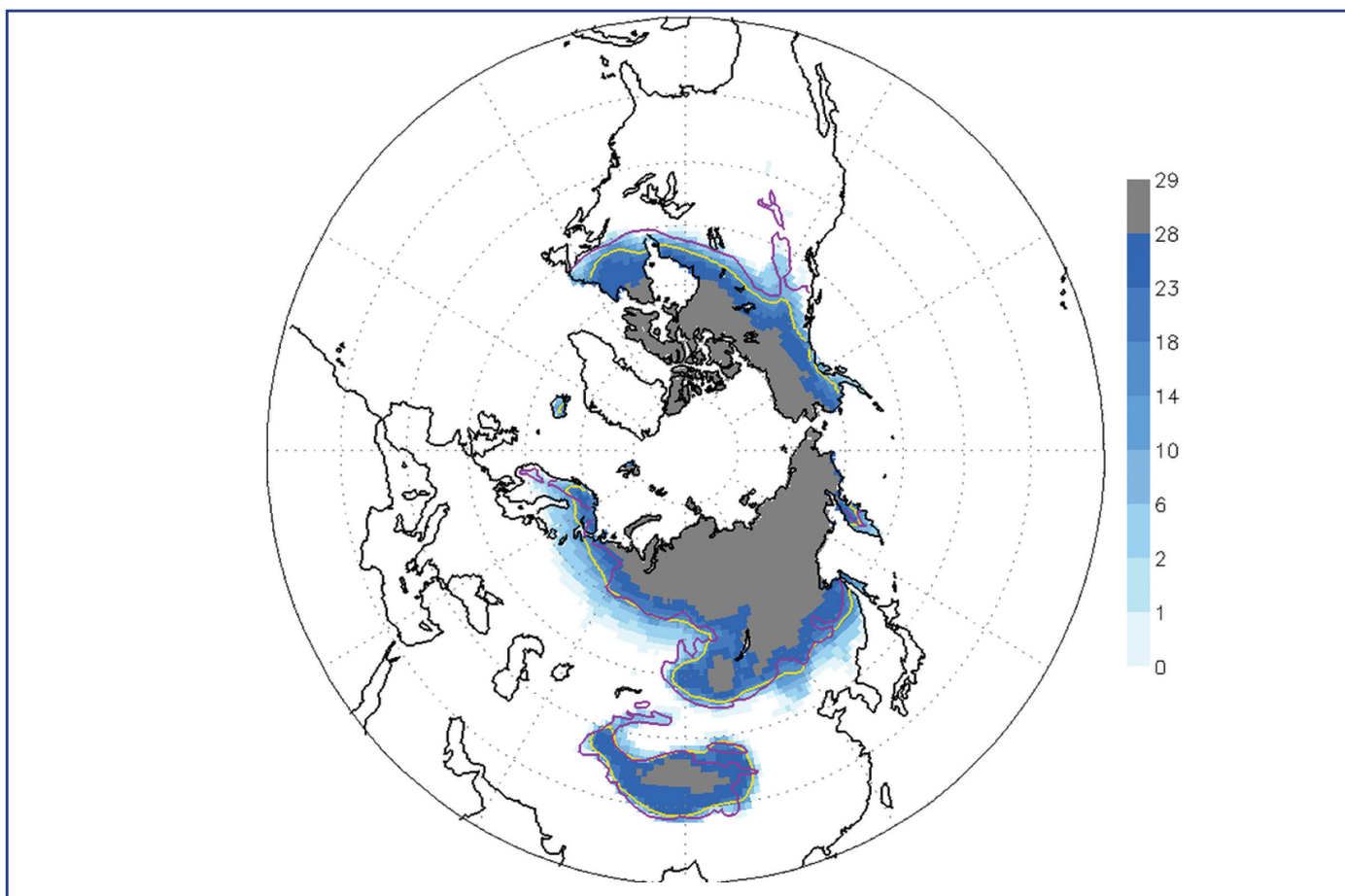


Рис. 3.1.13. Площадь, занятая мерзлотой в верхнем (3.3 м) слое почвы по данным расчетов на базе 29 моделей СМIP5 для периода 1980–1999 гг. В каждой ячейке сетки $1^\circ \times 1^\circ$ различными цветами показано количество моделей, в которых для этой ячейки осредненная за период 1980–1999 гг. среднегодовая температура грунта на глубине 3.3 м не превышает 0°C . Желтая линия показывает условную расчетную границу зоны многолетней мерзлоты, определяемую по положению среднегодовой изотермы 0°C на глубине 3.3 м, осредненной по ансамблю моделей, фиолетовая линия – современная наблюдаемая граница многолетней мерзлоты (Brown et al., 1997, 1998).

и ряда других характеристик многолетней мерзлоты и их эволюции могут быть получены либо напрямую из климатических моделей по данным о расчетной температуре почвы на различных глубинах, либо с помощью других моделей и расчетных схем, использующих в качестве входных параметров данные о температуре воздуха (подстилающей поверхности) и высоте снежного покрова, полученные из реанализов и/или климатических моделей.

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

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

Разброс модельных значений площади многолетней мерзлоты, рассчитанной напрямую по данным о модельной температуре почвы, оказывается очень большим. Рассчитанная в 18 моделях СМIP5 современная площадь многолетней мерзлоты составила от 1.4 до 27.3 млн km^2 (Koven et al., 2013). Оценки современной площади многолетней мерзлоты, полученные на основе почвенно-мерзлотного индекса (Nelson, Outcalt, 1987), рассчитанного по модельным данным о снежном покрове и температуре воздуха, составили от 11 до 21 млн km^2 (Slater, Lawrence, 2013).

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В расчетах термического состояния грунтов, выполненных с помощью модели теплопереноса в грунтах ГГО (Malevsky-Malevich et al., 2001) с использованием данных о температуре подстилающей поверхности и высоте снежного покрова, рассчитанных в 29 моделях CMIP5, положение средней по ансамблю расчетов нулевой изотермы среднегодовой температуры грунта на глубине 3.3 м удовлетворительно описывает современную границу многолетней мерзлоты, включая зоны прерывистой и островной мерзлоты (рис. 3.1.13). Площадь, занятая многолетней мерзлотой в Северном полушарии (без учета Гренландии), составила 21.9 млн км² в расчетах с данными моделей CMIP5, что практически совпадает с результатами, полученными с использованием данных CMIP3 (21.8 млн км²). Фактическая площадь этой зоны по современным оценкам 22.8 млн км² (Zhang et al., 1999).

В целом сравнение результатов расчетов CMIP5 и CMIP3 показало, что значительных изменений в качестве воспроизведения площади снежного покрова и многолетней мерзлоты в моделях не произошло, особенности будущих изменений данных характеристик, полученные в моделях CMIP3, подтвердились в моделях CMIP5.

3.1.4.5. Морской лед

Прогностическими переменными ледовых компонентов климатических моделей обычно являются толщина (или удельная масса) льда, сплоченность, толщина снежного покрова, температура поверхности и в толще морского льда, а также скорость дрейфа. За редким исключением, соленость морского льда не является прогностической переменной, а альбедо ледяного покрова океана обычно весьма произвольно связано с толщиной льда и наличием снежного покрова. Площадь распространения морского льда является его сравнительно надежно измеряемой (со спутников) характеристикой и потому используется в сравнительных анализах модельных расчетов в качестве основной. Имеющиеся данные наблюдений за толщиной и скоростью дрейфа льда не достаточны для полноценного анализа качества модельных расчетов этих характеристик.

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

Совокупная картина распределения морского льда в Северном полушарии для ансамбля CMIP5 (рис. 3.1.14), построенная для базового периода 1980–1999 гг., указывает на значительный разброс между моделями. При этом есть отдельные модели, существенно завышающие или существенно занижающие площадь льда. В то же время, медианное положение границы льда (т. е. граница, в пределах которой половина моделей имеет не менее 15% льда в ячейке) удовлетворительно согласуется с границей, построенной по данным анализа наблюдений, что отмечалось и для моделей CMIP3 (Randall et al., 2007).

Несмотря на значительные различия между моделями CMIP5, рассматриваемый ансамбль в среднем хорошо согласуется с данными наблюдений. Средняя по ансамблю площадь льда, оцениваемая как площадь модельных ячеек, в которых концентрация льда составляет не меньше 15%, отличается от наблюдаемых значений в Северном полушарии не более, чем на 10% зимой и весной, практически совпадая с наблюдаемой площадью в остальные сезоны (рис. 3.1.15). Следует отметить, однако, что в ряде моделей региональные особенности распределения морского льда воспроизводятся плохо, даже если суммарная площадь близка к наблюдаемой. При этом ансамбль CMIP5 в среднем заметно лучше воспроизводит площадь морского льда, нежели CMIP3.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

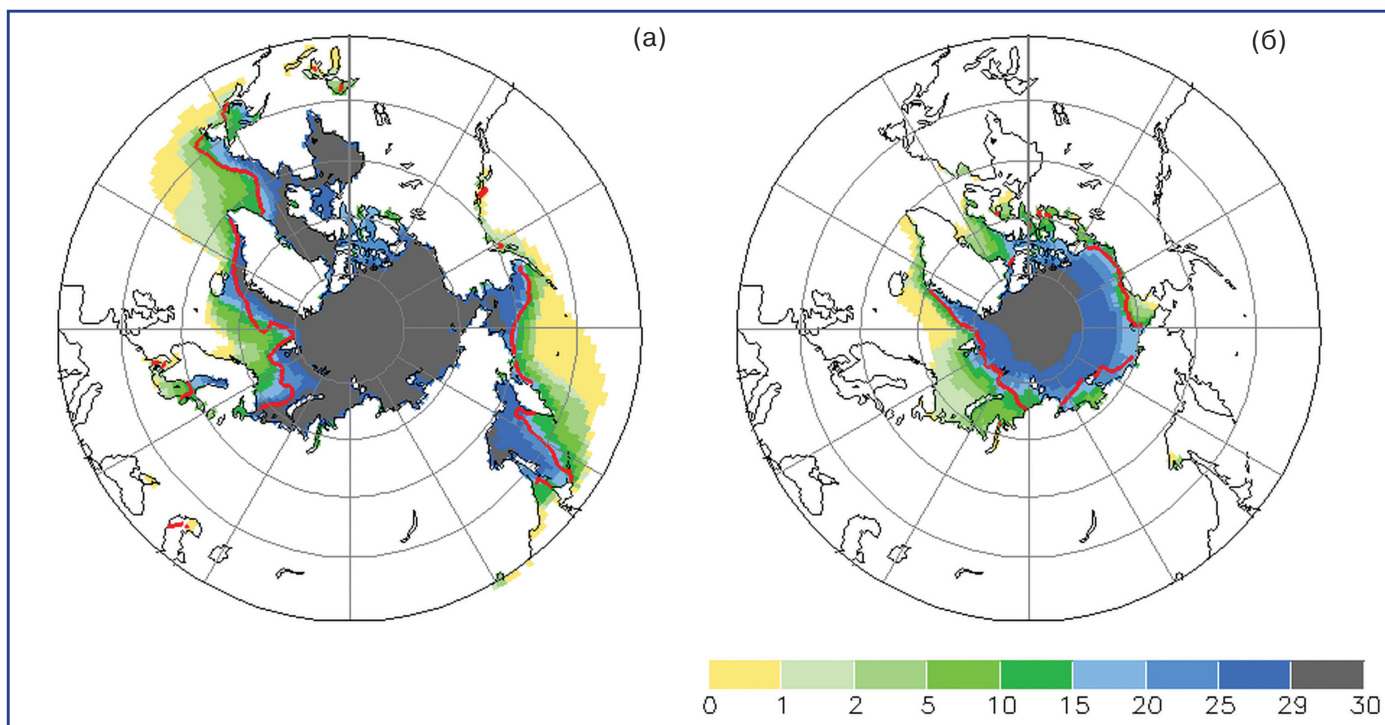


Рис. 3.1.14. Распределение морского льда в Северном полушарии для февраля (слева) и сентября (справа) в расчетах с 30 моделями CMIP5 за период 1980–1999 гг. В каждой ячейке широтно-долготной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ различными цветами, в соответствии со шкалой внизу рисунка, представлено количество моделей, в которых для этой ячейки получен лед сплоченностью не менее 15%. Наблюдаемые границы ледяного покрова сплоченностью не менее 15% (красная линия) за период 1980–1999 гг. получены по данным HadISST (Rayner et al., 2003).

За период спутниковых, т. е. наиболее надежных, наблюдений за ледяным покровом Мирового океана, площадь сентябрьского льда в Северном Ледовитом океане сокращается с ускорением: в 2012 г. был достигнут ее абсолютный минимум – 3.41×10^6 км², а средняя скорость этого сокращения по отношению к периоду 1979–2000 гг. составила 13% за десятилетие (NSIDC).

В то же время модели CMIP3 в среднем по ансамблю показывали существенно меньшее значение. “Консервативность” моделей CMIP3 обсуждалась в ряде работ (Rampal et al., 2011; Stroeve et al., 2007; Winton, 2011; Zhang, 2010). В работе (Kattsov et al., 2010) при обсуждении возможных причин указанной “консервативности” моделей CMIP3 затрагивался вопрос о том, насколько от моделей в принципе следует ожидать воспроизведения времени быстрого сокращения площади морского льда, коль скоро соотношение внешнего воздействия (антропогенного потепления) и собственной изменчивости климатической системы в этом случае не получено. Впоследствии в работе

(Notz et al., 2012) были приведены результаты анализа ансамблевых расчетов с моделью MPI-ESM, которые показывают, в частности, что собственная изменчивость климатической системы в Арктике может приводить к тому, что в отдельных реализациях для рассматривавшегося 29-летнего периода (начиная с 1979 г.) тренды площади морского льда в Арктике могут различаться не только величиной, но и знаком, несмотря на фоновое потепление климата.

В среднем ансамбль из 30 моделей CMIP5 лучше, чем CMIP3 (12 моделей), воспроизводит наблюдаемый в последние десятилетия тренд сентябрьской площади морского льда в Северном полушарии (рис. 3.1.16). Примерно, в четверти моделей CMIP5 значения сентябрьского тренда превышают по абсолютному значению наблюдаемое (Павлова, Катцов, 2013).

Модели CMIP5 в среднем по ансамблю демонстрируют улучшение, по сравнению с ансамблем CMIP3, в воспроизведении сезонного хода и тренда площади арктического морского льда. При

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

этом проблема соотношения собственной изменчивости и изменений, связанных с внешним воздействием, в наблюдаемом резком сокращении сентябрьского льда в Арктике требует дальнейших исследований.

3.1.5. Пространственная детализация результатов моделирования глобальной климатической системы

Современные глобальные климатические модели включают описание климатообразующих процессов в самом широком диапазоне масштабов – от глобального до регионального и локального. Все эти процессы описываются моделями взаимобусловлено в рамках замкнутой физической системы по аналогии с тем, как это происходит в реальной климатической системе Земли. Однако использование глобальных климатических моделей в оценках регионального климата и

экстремальных явлений часто оказывается затруднительным по причине большой пространственной сглаженности модельного климата, занижения его естественной изменчивости и недооценки опасных погодных явлений. Проблема сглаженности обусловлена недостаточным разрешением глобальных моделей и, как следствие, ограниченным учетом влияния региональных особенностей на расчет мезомасштабной атмосферной циркуляции и характеристик приземного климата.

Использование глобальных климатических моделей высокого разрешения (с шагами сетки менее 100 км), которое необходимо для удовлетворительного описания регионального климата, затруднено чрезвычайной длительностью расчетов по таким моделям, даже с использованием современных суперкомпьютерных систем. Проблема вычислительных ресурсов усугубляется в случаях, когда ставится задача проведения массовых

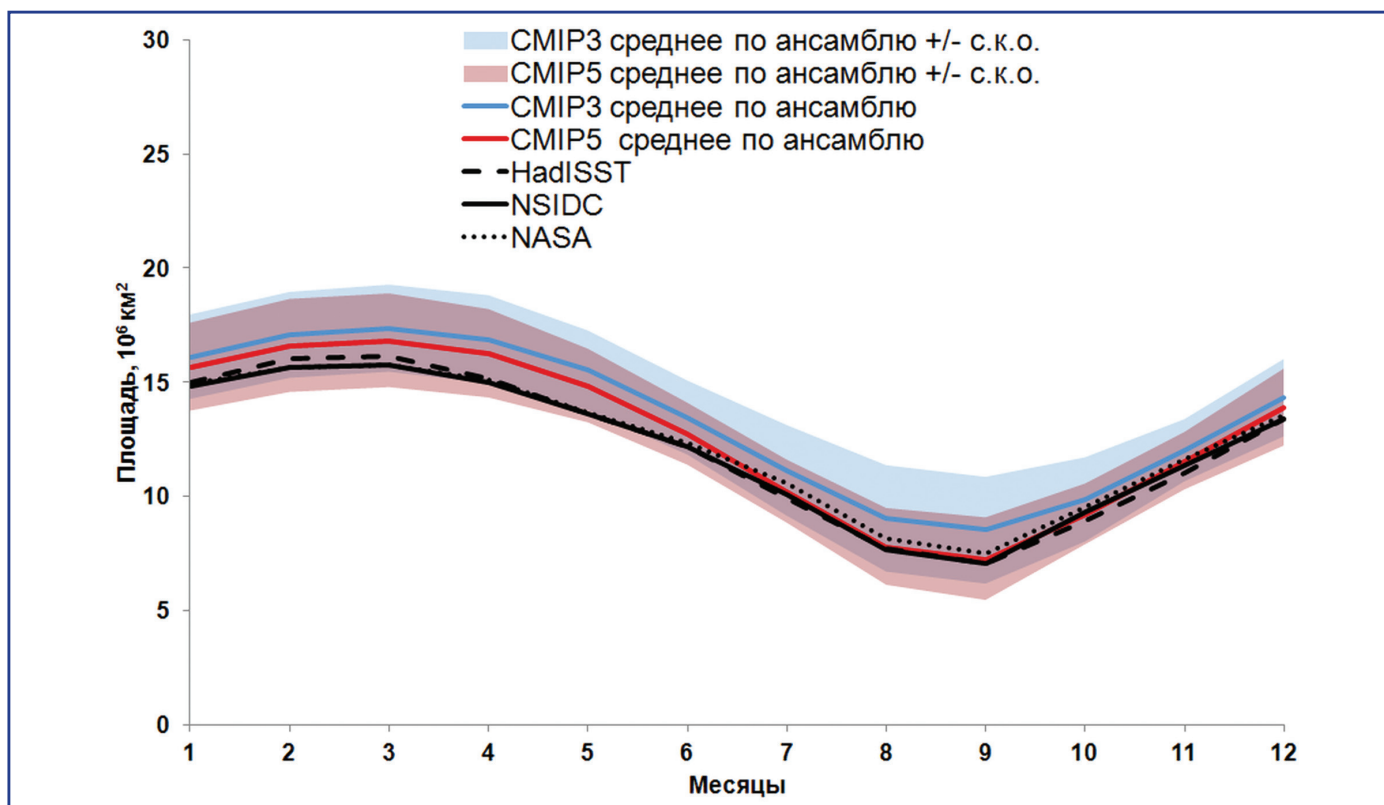


Рис. 3.1.15. Средний многолетний (за период 1980–1999 гг.) сезонный ход площади морского льда (км^2) в Северном полушарии (площадь океана, покрытого льдом сплоченностью более 15%): полученный в ансамблях из 30 моделей CMIP5 (красная линия) и 17 моделей CMIP3 (голубая линия), а также по данным наблюдений HadISST (Rayner et al., 2003) (прерывистая черная линия); NSIDC (Fetterer et al., 2002) (сплошная черная линия) и NASA (Comiso, Nishio, 2008) (черный пунктир). Заштрихованные области соответствуют среднеквадратичному отклонению членов ансамблей от средних по ансамблям CMIP5 (розовая) и CMIP3 (голубая).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

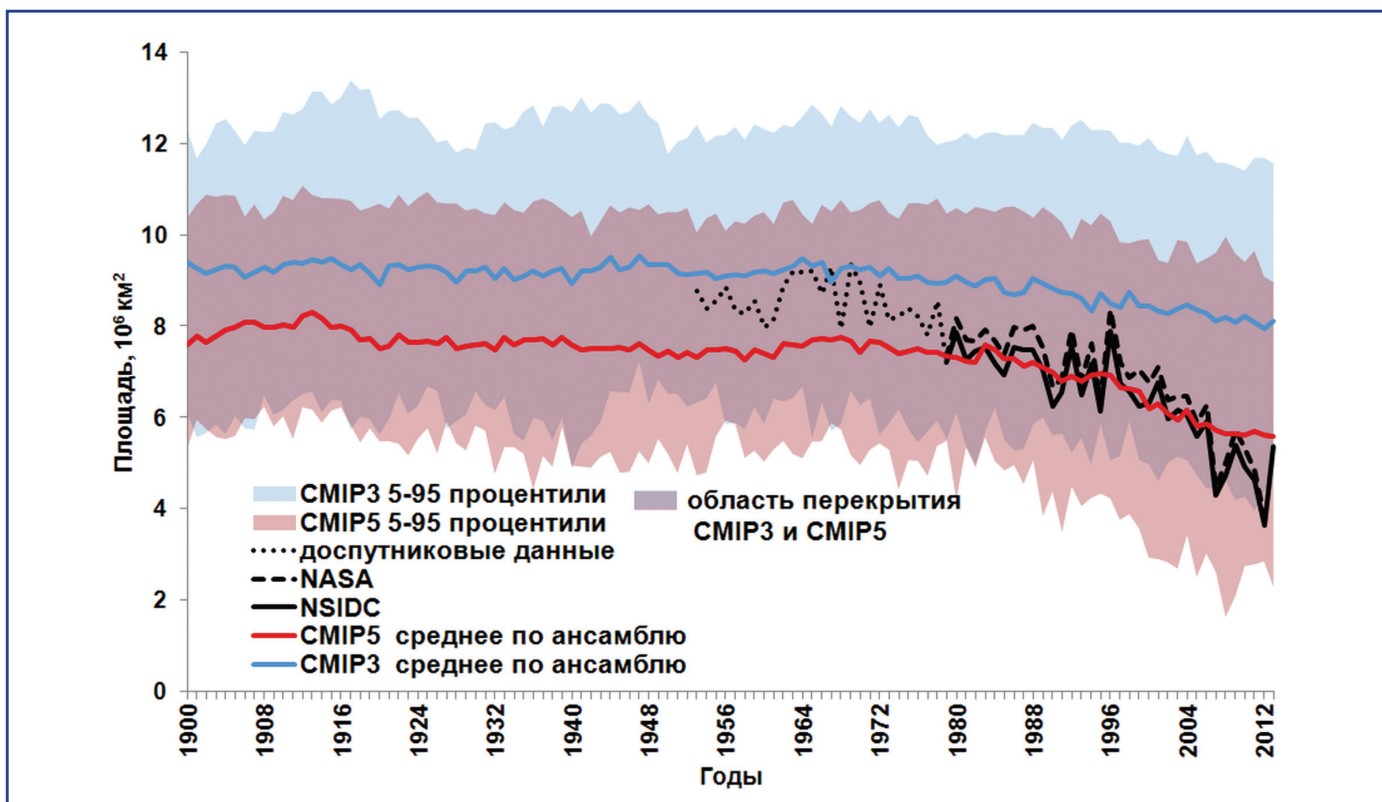


Рис. 3.1.16. Площадь морского льда в период с 1900 по 2013 гг. в Северном полушарии в сентябре по данным моделирования (CMIP5 и CMIP3) и наблюдений. Данные моделей: среднее по ансамблю 30 моделей CMIP5 (красная линия); среднее по ансамблю 12 моделей CMIP3 (голубая линия) и области 5–95 перцентилей для обоих ансамблей (розовая и голубая штриховки, соответственно). Ретроспективные расчеты CMIP5 (т. е. до 2005 г. включительно) дополнены сценарными расчетами RCP4.5 для периода 2006–2013 гг.; расчеты CMIP3 – для периода 2000–2013 гг. – SRES A2 (Катцов и др., 2007). Показаны средние оценки для среднемесячных значений (не абсолютные годовые минимумы). Каждая модель в ансамбле представлена единственным расчетом. Данные наблюдений – NASA, (Comiso, Nishio, 2008); NSIDC; (Fetterer et al. 2002) – соответственно, прерывистая и сплошная черные линии). Черная пунктирная линия показывает эволюцию площади морского льда в Арктике, полученную на основе “доспутниковых” данных наблюдений (Meier, Stroeve, 2008; Stroeve et al. 2012).

ансамблевых расчетов – тогда требования к производительности суперкомпьютеров возрастают многократно из-за необходимости проводить одновременно большое число экспериментов. В настоящее время расчеты климата с помощью глобальных моделей с разрешением до 20 км и переменным разрешением (с локальным сгущением сетки) проводятся лишь на сравнительно небольшие сроки (10–20 лет) в рамках атмосферных компонент моделей (Murakami et al., 2012; Fox-Rabinovitz et al., 2008) и не имеют широкого распространения.

Помимо недостаточного разрешения, имеется и другое препятствие для более широкого применения глобальных климатических моделей в исследованиях регионального климата – это единообразие подхода к описанию физических процессов од-

новременно во всех регионах Земли. Для реалистичного описания климатического режима конкретного региона, представляющего интерес для импактных исследований, требуется специальная адаптация используемого в глобальном масштабе обобщенного описания взаимодействия пограничного слоя атмосферы с подстилающей поверхностью, детализация гидрологических процессов на суше и регионального термического режима.

Альтернативным источником детализированной информации о региональном климате и его изменениях служат специально разрабатываемые региональные климатические модели (РКМ), основанные на тех же физических законах и методах вычислительной математики, что и глобальные модели, но имеющие более высокое пространственное разрешение (Laprise, 2008;

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Rummukainen, 2010; Christensen et al., 2010; Школьник и др., 2012). РКМ лежат в основе так называемой динамической детализации расчетов глобальных климатических моделей. Региональные модели применяются для ограниченных областей субконтинентального масштаба с использованием на боковых границах модельных областей данных об эволюции глобального климата. Если большинство современных глобальных климатических моделей имеют разрешение в диапазоне 100–300 км, то региональные климатические модели к настоящему времени в ряде случаев уже перешагнули рубеж 10 км. Наиболее распространенное сейчас разрешение РКМ – 25 км, однако часто используется и более низкое – 50 км. Разрешение 10–50 км позволяет учитывать влияние на эволюцию климата мезомасштабных факторов, начиная с реалистичной орOGRAPHии, небольших внутриконтинентальных водоемов, изменчивых характеристик растительности и свойств подстилающей поверхности, и заканчивая детальным описанием прибрежных зон, экосистемы которых демонстрируют высокую чувствительность к изменениям глобального климата. Следует упомянуть, что в России протяженность прибрежных зон – самая большая в мире, а разнообразие типов подстилающей поверхности исключительно велико в силу больших размеров территории, включающей почти все типы известных науке ландшафтов. Как отмечено выше, перечисленные региональные особенности, взаимодействующие с глобальной циркуляцией атмосферы и играющие важную роль в формировании регионального баланса тепла и влаги, представлены на сетках глобальных климатических моделей со слишком большим пространственным осреднением.

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

В настоящее время на смену разрозненным исследованиям климата с помощью высокоразрешающих модельных систем, в рамках которых были получены детализированные оценки изменений регионального климата для нескольких регионов Северной Америки и Европы, приходят скоординированные в глобальном масштабе проекты, среди которых – крупный проект Всемирной программы исследования климата CORDEX (<http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr>). Эксперименты в рамках указанного проекта включают ансамблевые мультимодельные расчеты по РКМ для всех регионов Земли, причем не только для суши, но и для тех регионов Мирового океана, где высокое разрешение моделей необходимо для улучшения описания экстремальных режимов атмосферной циркуляции и их прогноза на будущее. Один из таких регионов – Арктика, над акваторией которой часто возникают экстремальные полярные мезоциклоны, которые сопровождаются опасными погодными явлениями (штормовой ветер и осадки исключительно высокой интенсивности). Прохождение таких циклонов несет угрозу экономической деятельности в полярных морях и наносит большой ущерб инфраструктурам в прибрежных зонах. Задача воспроизведения (и прогнозирования) таких сравнительно небольших атмосферных вихрей, какими являются полярные циклоны, ложится, в первую очередь, на климатические модели, обладающие высоким пространственным разрешением и позволяющие обеспечить лучшую согласованность числа полярных циклонов между расчетами и данными наблюдений по сравнению с глобальной моделью более низкого разрешения (рис. 3.1.17).

Для получения еще более локализованной, по сравнению с РКМ, климатической информации к результатам расчетов по глобальным климатическим моделям и РКМ применяются специальные статистические преобразования (статистическая детализация). Такие преобразования базируются на установлении регрессионных эмпирических соотношений между оценками климатических моделей (предикторами) и данными наблюдений за климатом (предиктантами) на сети метеорологических станций (Segui et al., 2010; van Vliet et al., 2011).

К сожалению, статистическая детализация, проведенная для отдельно взятой модели климата,

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

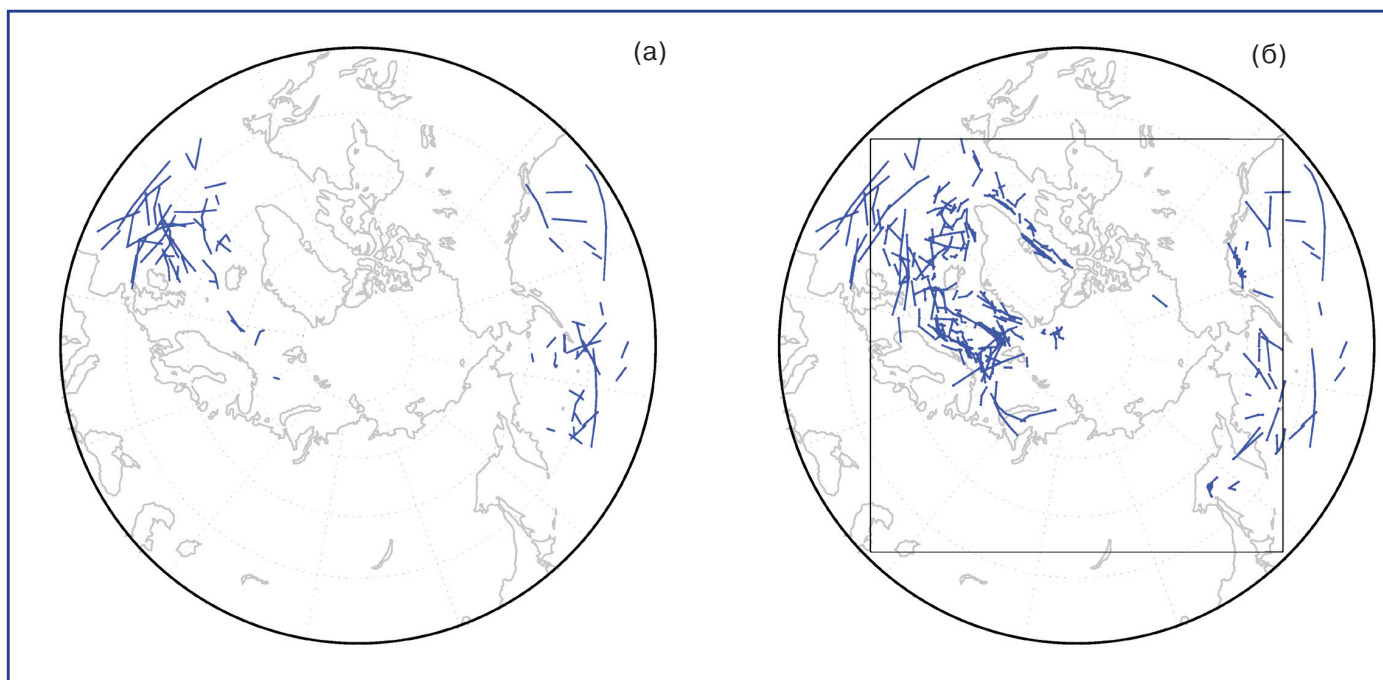


Рис. 3.1.17. Пространственное распределение траекторий полярных циклонов за десять зимних сезонов с 1981 по 1990 годы по оценкам глобальной модели атмосферы с разрешением 200 км (а) и оценкам встроенной в нее РКМ ГГО с разрешением 25 км (б). Рисунок взят из работы (Shkolnik, Efimov, 2013). По сравнению с глобальной моделью, оценки РКМ лучше согласуются с данными анализа наблюдений (Lutsenko, Lagun, 2010), согласно которым только в Северо-Европейском секторе Арктики, включающем северную часть акватории Норвежского моря, Баренцево море и часть акватории Гренландского моря, число полярных циклонов за указанный временной интервал составляет 97.

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

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

ных связей в климатической системе, сравнительно невысокая.

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

3.1.6. Выводы

Несмотря на значительный разброс между отдельными моделями СМIP5, удовлетворительное согласие средних по ансамблю моделей расчетов основных характеристик наблюдаемого приземного климата на территории России с данными наблюдений позволяют констатировать пригодность этого ансамбля для оценок будущих изме-

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

нений климата на территории России. Сравнение моделей разных поколений указывает на постепенное улучшение воспроизведения моделями ряда характеристик приземного климата на территории России.

Отмеченные в (ОД_РФ-1, 2008) принципиальные сложности совокупной оценки качества моделей, несмотря на значительные усилия научного сообщества, в целом, остаются актуальными. Равно как остаются открытыми и некоторые важные вопросы, касающиеся избирательной применимости (пригодности) отдельных моделей в оценках будущих изменений отдельно взятых климатических характеристик в отдельно взятых регионах. Формирование ансамблей (комплексирование) глобальных моделей для оценки будущих региональных изменений климата остается в повестке актуальных исследований.

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

3.1.7. Литература

- Анисимов О. А., Кокорев В. А., 2013.** Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу, Лед и Снег, № 1 (121), с. 83–92.
- Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н., 2011.** Снежный покров на территории России и его пространственные и временные изменения за период 1966–2010 гг., Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 24, с. 211–227.
- Генихович Е. Л., Павлова Т. В., Катцов В. М., 2010.** О комплексировании ансамбля климатических моделей, Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, т. 561, с. 28–46.
- Катцов В. М., 2010.** Предсказание климата: достижения, проблемы и перспективы. Метеорология и гидрология, №.1, с. 18–22.
- Катцов В. М., Алексеев Г. В., Павлова Т. В., Спорышев П. В., Бекряев Р. В., Говоркова В. А., 2007.** Эволюция ледяного покрова Мирового океана в 20-м и 21-м веках в расчетах с глобальными климатическими моделями нового поколения, Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 43, № 2, с. 1–17.
- Катцов В. М., Мелешко В. П., 2008.** Современные приоритеты фундаментальных исследований климата, Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, т. 557, с. 3–19.
- Катцов В. М., Мелешко В. П., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М., 2008.** Модели, предназначенные для оценки будущих изменений климата. В кн.: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации А. И. Бедрицкий и др., (ред.), т. 1. Изменения климата, с. 112–151.
- Китаев Л. М., Титкова Т. Б., 2010.** Оценка снегозапасов по данным спутниковой информации, Криосфера Земли, Т. XIV, № 1, с. 76–80.
- Мелешко В. П., Говоркова В. А., 2013.** Успешность расчета современного регионального климата с помощью ансамбля моделей СМIP3 и СМIP5, Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, т. 568, с. 26–50.
- Носенко Г. А., Долгих Н. А., Носенко О. А., 2005.** О возможности практической реализации существующих алгоритмов восстановления характеристик снежного покрова по данным микроволновых съемок из космоса для мониторинга водных ресурсов, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей, т. II, с. 150–156.
- Носенко О. А., Долгих Н. А., Носенко Г. А., 2006.** Снежный покров центра Европейской части России по данным AMSR-E и SSM/I, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей, вып. 3, т. I, с. 296–301.
- ОД_РФ-1, 2008.** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

- Российской Федерации. Бедрицкий А. И. и др., (ред.), в 2 томах, М.: Росгидромет.
- Павлова Т. В., Катцов В. М., 2013.** Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей СМIP5, Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 568, с. 7–25.
- Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013.** Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях СМIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений, Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, т. 569, с. 38–61.
- Павлова Т. В., Катцов В. М., Надежина Е. Д., Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2007.** Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения, Криосфера Земли, т. XI, № 2, с. 3–13.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Ефимов С. В., Стафеева Е. Н., 2012.** Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине 21 века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО, Метеорология и гидрология, № 2, с. 5–23.
- Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A., Melnikov E. S., 1997.** International Permafrost Association Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions, U.S. Geological Survey Circum-Pacific Map Series, Map CP-45. Scale 1:10,000,000.
- Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A., Melnikov E. S., 1998.** Digital circum-arctic map of permafrost and groundice conditions., In Circumpolar Active-Layer Permafrost System (CAPS) CD-ROM, version 1.0. National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder.
- Brown R. D., Robinson D. A., 2011.** Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty, *The Cryosphere*, vol. 5, pp. 219–229, doi:10.5194/tc-5-219-2011.
- Christensen J. H., Kjellstrom E., Giorgi F., Lenderink G., Rummukainen M., 2010.** Weight assignment in regional climate models. *Climate Research*, vol. 44, no. 2–3, pp. 179–194. doi: DOI 10.3354/cr00916
- Comiso J. C., Nishio F., 2008.** Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data, *J. Geophys. Res.*, vol. 113, C02S07.
- Dai A., Trenberth K. E., 2002.** Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations, *J. Hydrometeorology*, vol. 3, no. 6, pp. 660–687.
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P. et al., 2011.** The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 137, pp. 553–597 (DOI: 10.1002/qj.828).
- Dietz A. J., Kuenzer C., Gessner U., Dech S., 2012.** Remote sensing of snow – a review of available methods, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 33, no. 13, pp. 4094–4134.
- Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., 2002.** Sea Ice Index. Boulder, Colorado USA, National Snow and Ice data Center.
- Fox-Rabinovitz M., Cote J., Dugas B., Deque M., McGregor J. L., Belochitski A., 2008.** Stretched-grid Model Intercomparison Project: decadal regional climate simulations with enhanced variable and uniform-resolution GCMs, *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 100.1–4. pp. 159–177, doi: DOI10.1007/s00703-008-0301-z
- Frolov A. V., Kattsov V. M., 2009.** Predicting Arctic climate: Knowledge gaps and uncertainties, in: UNESCO Climate change and Arctic sustainable development: Scientific, social, cultural and educational challenges, pp. 302–312.
- Hagemann S., Duemenil L., 1998.** A parameterization of the lateral waterflow for the global scale. *Climate Dyn.*, vol. 14, pp. 17–31.
- Huffman G. J., Adler R. F., Morrissey M. M., Bolvin D. T., Curtis S., Joyce R., McGavock B., Susskind J., 2001.** Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations, *J. Hydrometeorol.*, vol. 2, pp. 36–50.
- IPCC, 2007.** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

- (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC, 2010.** Meeting Report of the IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections (NCAR, Boulder, CO, USA, 25–27 January 2010), (T.Stocker, Q.Dahe, G.-K. Plattner, M. Tignor, P. Midgley, eds.), IPCC WGI TSU, University of Bern, Switzerland, 117 pp. (https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/supportingmaterial/IPCC_EM_MultiModel_Evaluation_MeetingReport.pdf)
- IPCC, 2013.** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W.I., Woollen J. et al., 2002.** NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R–2), *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 83, no. 11, pp. 1631–1643.
- Kattsov V., Ryabinin V., Overland J., Serreze M., Visbeck M., J. Walsh, Meier W., Zhang X., 2010.** Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science, *Journal of Glaciology*, vol. 56, no. 200, p. 1115–1121.
- Kharin V. V., Zwiers F. W., Zhang X., 2005.** Intercomparison of near surface temperature and precipitation extremes in AMIP-2 simulations, reanalyses and observations, *Journal of Climate*, vol. 18, pp. 5201–5223.
- Knutti R., Furrer R., Tebaldi C, Cermak J., Meehl G., 2010.** Challenges in combining projections from multiple climate models, *Journal of Climate*, vol. 23, pp. 2739–2758.
- Koven C. D., Riley W. J., Stern A., 2013.** Analysis of Permafrost Thermal Dynamics and Response to Climate Change in the CMIP5 Earth System Models, *Journal of Climate*, vol. 26, pp. 1877–1900. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00228.1>
- Laprise R., 2008.** Regional climate modelling, *Journal of Computational Physics*, vol. 227, no. 7, pp. 3641–3666. doi:10.1016/j.jcp.2006.10.024
- Legates D. R., Willmott C. L., 1990.** Mean seasonal and spatial variability in gauge corrected global precipitation, *Int. J. Climatol.*, vol. 10, pp. 111–133.
- Lutsenko E., Lagun V., 2010.** Polar meso-scale cyclonic eddies in the Arctic atmosphere, *Handbook, Arctic and Antarctic Research Institute*, pp.97, in Russian (available at http://www.aari.ru/projects/mesocyclone/mez_ant.html).
- Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., Shklyarevich O. B., 2001.** Numerical simulation of permafrost parameters distribution, *Cold Regions Sci. and Technol.*, no. 32, pp. 1–11.
- Meehl G. A., Covey C., Taylor K. E, Delworth T., Stouffer R. J., Latif M., McAvaney B., Mitchell J. F. B., 2007.** The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 88, pp. 1383–1394.
- Meier W. N., Stroeve J., 2008.** Comparison of sea ice extent and ice edge location estimates from passive microwave and enhanced-resolution scatterometer data, *Annals of Glaciology*, vol. 48, no. 1, pp. 65–70. doi:10.3189/172756408784700743.
- Murakami H., Wang Y. Q., Yoshimura H., Mizuta R., Sugi M., Shindo E, Kitoh A., 2012.** Future Changes in Tropical Cyclone Activity Projected by the New High-Resolution MRI-AGCM, *Journal of Climate*, vol. 25, no. 9, pp. 3237–3260. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00415.1/
- Murphy J., Kattsov V., Keenlyside N., Kimoto M., Meehl J., Mehta V., Pohlmann H., Scaife A., Smith D., 2009.** Towards Prediction of Decadal Climate Variability and Change. White paper for the World Climate Conference 3, Geneva, 31 August – 4 September 2009. *Procedia Environmental Sciences* 1 (2010) pp. 287–304, doi:10.1016/j.proenv.2010.09.018/
- Nelson F., Outcalt S., 1987.** A computational method for prediction and regionalization of permafrost, *Arct. Alp. Res.*, vol. 19, pp. 279–288, doi:10.2307/1551363.
- New M., Hulme M., Jones P., 1999.** Representing twentieth-century space-time climate ariability. Part I: Development of a 1961–90 mean month-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

- ly terrestrial climatology, *Journal of Climate*, vol.12, pp. 829–856.
- New M., Hulme M., Jones P., 2000.** Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface temperature, *Journal of Climate*, vol. 13, pp. 2217–2238.
- Notz D., Haumann F. A., Haak H., Jungclaus J. H., Marotzke J., 2012.** Sea-ice evolution in the Arctic as modeled by MPI-ESM, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 5, pp. 173–194, doi:10.1002/jame.20016
- Overland, J. E., Wang M., Bond N. A., Walsh J. E., Kattsov V. M., Chapman W. L., 2011.** Considerations in the Selection of Global Climate Models for Regional Climate Projections: The Arctic as a Case Study. *Journal of Climate*, vol. 24, pp. 1583–1597, doi: 10.1175/2010JCLI3462.1.
- Rampal P., Weiss J., Dubois C., Campin J. M., 2011.** IPCC climate models do not capture Arctic sea ice drift acceleration: Consequences in terms of projected sea ice thinning and decline, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, vol. 116. doi: 10.1029/2011jc007110.
- Randall D. A., Wood R. A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K. E., 2007.** Climate Models and Their Evaluation, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H. L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, pp. 589–662.
- Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., et al., 2003.** Global analysis of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *Journal of Geophysical Research*, vol. 108 (D14), doi:10.1029/2002JD002670.
- Rienecker M. M., Suarez M. J., Gelaro R., Todling R., et al., 2011.** MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, *Journal of Climate*, vol. 24, pp. 3624–3648.
- Robinson D. A., Frei A., 2000.** Seasonal variability of northern hemisphere snow extent using visible satellite data, *Professional Geographer*, vol. 51, pp. 307–314.
- Rummukainen M., 2010.** State-of-the-art with regional climate models, *Wiley Interdisciplinary Reviews, Climate Change*, vol. 1, no. 1, pp. 82–96, doi: 10.1002/wcc.8
- Saha S., Adiga S. N., Hiaw C. T., Ang J. W. et al., 2010.** The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 91, pp. 1015–1057.
- Segui P. Q., Ribes A., Martin E., Habets F., Boe J., 2010.** Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins, *Journal of Hydrology*, vol. 383, no. 1–2, pp. 111–124. doi: DOI 10.1016/j.jhydrol.2009.09.050
- Serreze M. C., Barrett A., Lo F., 2005.** Northern high latitude precipitation as depicted by atmospheric reanalyses and satellite retrievals, *Monthly Weather Review*, vol. 133, pp. 3407–3430.
- Shkolnik I. M., Efimov S. V., 2013.** Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: added value and uncertainties, *Environ. Res. Lett.*, vol. 8, 045007, doi:10.1088/1748-9326/8/4/045007.
- Slater A. G., Lawrence D. M., 2013.** Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models, *Journal of Climate*, vol. 26, pp. 5608–5623, doi: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00341.1
- Stroeve J., Holland M., Meier W., Scambos T., Serreze M., 2007.** Arctic sea ice decline: Faster than forecast, *Geophysical Research Letters*, 34(9), DOI 10.1029/2007GL029703
- Stroeve J. C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W. N., 2012.** Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L16502, doi:10.1029/2012GL052676.
- Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A., 2012.** An Overview of CMIP5 and the experiment design,

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

- Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 93, pp. 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Uppala S. M., Allberg K., Simmons P., Andrae A. J., et al., 2005.** The ERA-40 re-analysis, Q.J.R. Meteorol. Soc., vol. 131, pp. 2961–3012. doi: 10.1256/qj.04.176.
- van Vliet M., Blenkinsop S., Burton A., Harpham C., Broers H., Fowler H., 2011.** A multi-model ensemble of downscaled spatial climate change scenarios for the Dommel catchment, Western Europe, Climatic Change, vol. 1–29. doi: 10.1007/s10584-011-0131-8
- Winton M., 2011.** Do Climate Models Underestimate the Sensitivity of Northern Hemisphere Sea Ice Cover?, Journal of Climate, vol. 24, no. 15, pp. 3924–3934.
- Xie P., Arkin P. A., 1998.** Global monthly precipitation estimates from satellite-observed outgoing longwave radiation, Journal of Climate, vol. 11, pp. 137–164.
- Xie P., Arkin P. A., 1997.** Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs, Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 78, pp. 2539–2558.
- Zhang T., Barry R. G., Knowles K., Heginbottom J. A., Brown J. I., 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., 2010.** Sensitivity of arctic summer sea ice coverage to global warming forcing: towards reducing uncertainty in arctic climate change projections, Tellus Series a-Dynamic Meteorology and Oceanography, vol. 62, no. 3, pp. 220–227. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00441.x.

Глава 3.1. ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. 3.1.1П. Федеральные округа РФ, для которых в настоящем докладе получены оценки современного климата и его будущих изменений: 1. Северо-Западный; 2. Центральный; 3. Южный; 4. Приволжский; 5. Уральский; 6. Сибирский; 7. Дальневосточный; 8. Северо-Кавказский.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

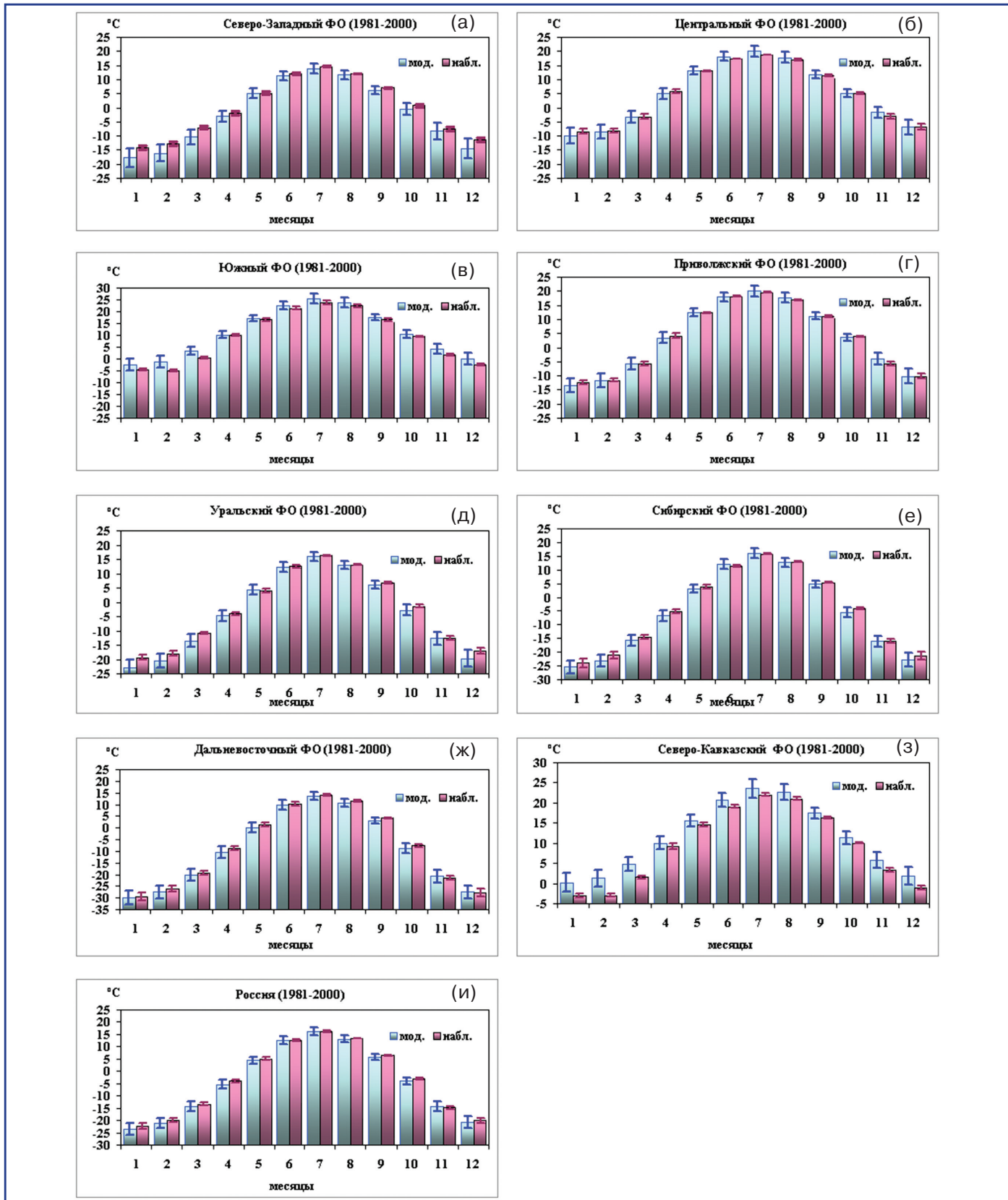


Рис. 3.1.2П. Сезонные изменения температуры приземного воздуха (1981–2000 гг.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели CMIP5 (“мод.”) и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”). В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm \sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов. Расчеты представлены для федеральных округов (рис. 3.1.1.П) и территории РФ в целом.

3.1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

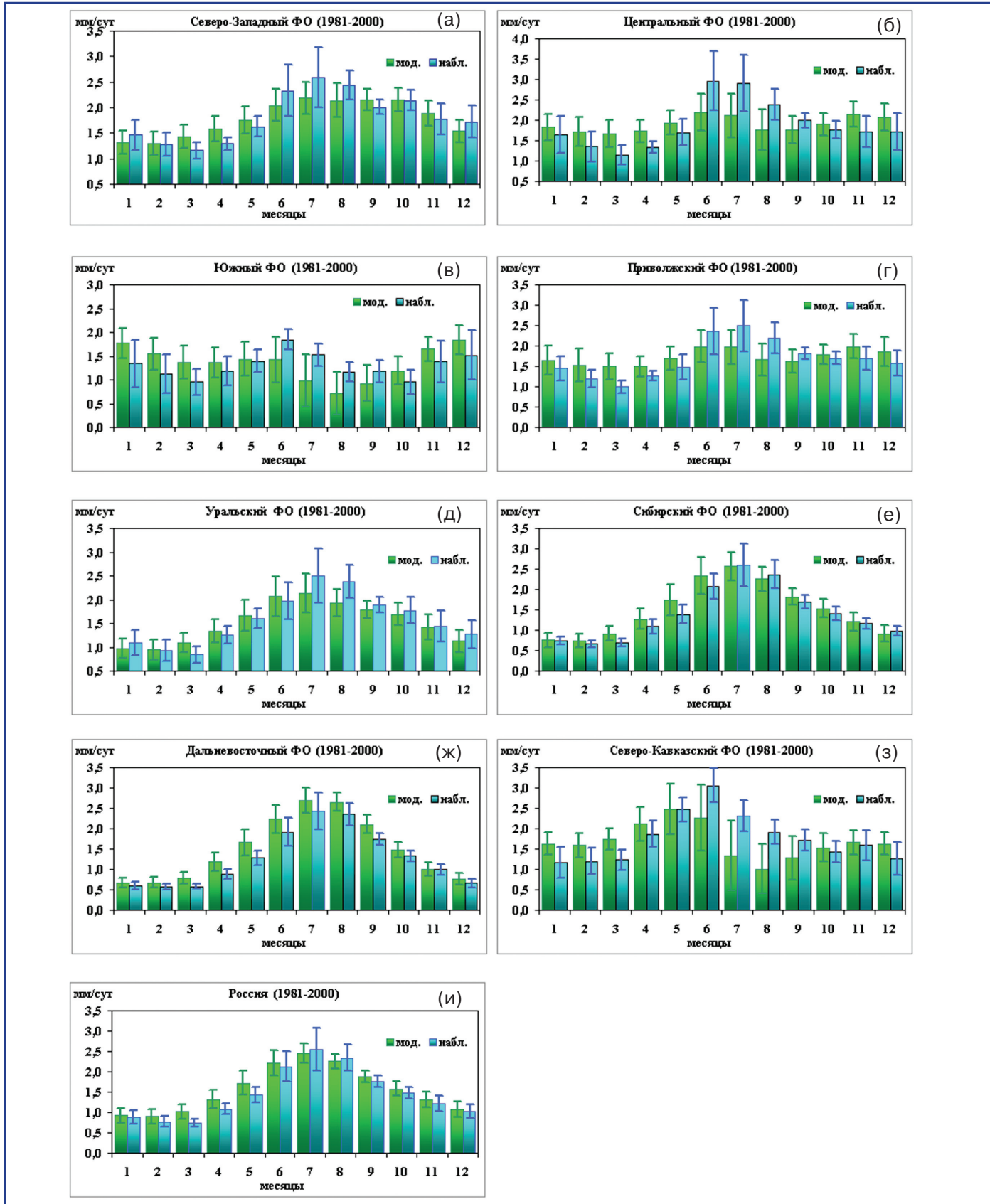


Рис. 3.1.3П. Сезонные изменения осадков (1981–2000 гг.): рассчитанные по ансамблю из 31 модели CMIP5 (“мод.”) и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”). В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm \sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов. Расчеты представлены для федеральных округов (рис. 3.1.1.П) и территории РФ в целом.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

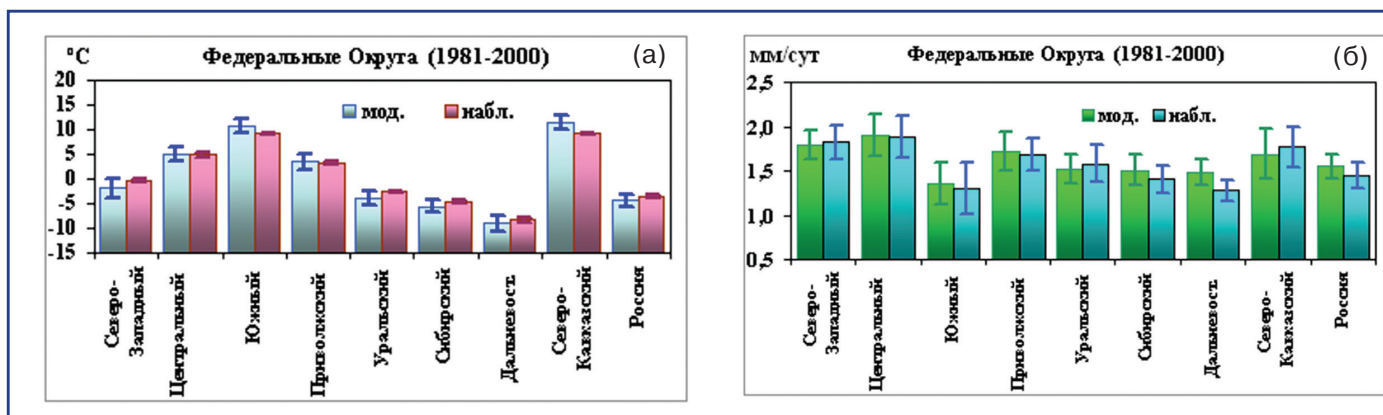


Рис. 3.1.4П. Среднегодовые значения температуры приземного воздуха (а) и осадков (б) (1981–2000 гг.), рассчитанные по ансамблю из 31 модели CMIP5 (“мод.”) и полученные по осредненным данным наблюдений/реанализов (“набл.”). В столбцах, помимо средних, показаны стандартные отклонения, характеризующие разброс ($\pm \sigma$) между моделями, а также между данными наблюдений/реанализов. Расчеты представлены для федеральных округов (рис. 3.1.1.П) и территории РФ в целом.

Глава 3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В XXI ВЕКЕ

И. М. Школьник

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

3.2.1. Сценарии антропогенных воздействий на глобальную климатическую систему

Особенности сценариев предыдущего поколения SRES (Special Report on Emissions Scenarios – Специальный Доклад о Сценариях Выбросов) кратко описаны в главе 7.1 первого Оценочного доклада Росгидромета (ОД_РФ-1 (2008)). Сценарии SRES широко использовались в модельных исследованиях последнего десятилетия. Наибольшее внимание, естественно, привлекали сценарии с экстремальными – наибольшим (A2) и наименьшим (B1) – глобальными содержаниями CO_2 в нижней атмосфере в XXI веке (см. рис. 7.1 в ОД_РФ-1).

При подготовке Пятого отчета МГЭИК были учтены недостатки “идеологии” сценариев SRES. Такие недостатки проистекали из нескольких вариантов ожидаемых путей социально-экономического развития как в глобальном, так и в региональном масштабах. Затем характеристики ка-

ждого варианта развития преобразовывались в предполагаемые изменения непосредственно эмиссий климатически активных субстанций, либо их концентраций в нижней атмосфере и на подстилающей поверхности. Эти эмиссии или концентрации и их эволюция должны служить основой для используемых в прогнозах изменений климата в XXI веке сценариев возможной эволюции климатических характеристик в глобальном и региональном масштабах. При этом указывается, что эти сценарии нацелены на антропогенную часть климатообразующих факторов. Климатообразующие факторы, связанные с “естественной” изменчивостью климатических характеристик, сценариями SRES не охватываются. Однако в ряде публикаций (см., напр., Кароль, 1988) отмечается, что с течением времени доля и влияние антропогенных климатообразующих факторов на изменения климата будут возрастать, и потому ожидаемый эффект все более будет определяться именно этими сценариями. Достаточно полное и подробное исследование и сравнение старых (SRES) и новых (RCP) сценариев представлено в работах (Rogelj et al., 2012; Meinshausen et al., 2011).

В практике использования сценариев SRES были случаи пересечения “кривых” эволюции климатообразующих факторов в некоторые мо-

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

менты времени, когда уровни содержания климатообразующих факторов от более или менее “интенсивных” в среднем сценариев менялись местами в величинах их влияния на климатическую систему из-за принятых в сценариях разных особенностей социально-экономического развития. Это затрудняло “ранжирование” сценариев по степени их эмиссий парниковых газов в атмосферу и таким образом – по степени их воздействия на климатическую систему.

Для модельных прогнозов изменений климата от антропогенных факторов основное значение имеют именно прогнозы эволюции содержания парниковых газов, а порождающие ее социально-экономические условия не входят непосредственно в прогностический механизм. Поэтому именно физические характеристики климатообразующих факторов любого сценария должны быть определяющими. Такой характеристикой в последние десятилетия служит индекс радиационного воздействия (РВ, в Отчетах МГЭИК используется также понятие “метрика”), который достаточно полно отражает степень внешнего (антропогенного) воздействия на климатическую систему и широко используется в теории и практике исследований. И при использовании сценариев SRES их общие эффекты оценивались часто по величине их РВ. Поэтому в новой системе сценариев, используемой при составлении Пятого отчета МГЭИК, за основную исходную характеристику взяты величины эволюции ожидаемых концентраций парниковых газов и их РВ к концу XXI века. Индекс сценария обозначается величиной глобального антропогенного РВ, достигаемого в 2100 г., а именно 2.6; 4.5; 6.0 и 8.5 Вт/м² – RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, соответственно. Здесь: RCP – Representative Concentration Pathway (Репрезентативные траектории [изменения] концентраций [примесей]). В квадратных скобках упомянуты части названия, подразумеваемые, но не указанные в нем явно. Отсюда видно, что RCP8.5 – сценарий, соответствующий максимальным антропогенным выбросам, а RCP2.6 – минимальным. В последнем сценарии предполагается, что максимум РВ, равный 3.0 Вт/м², будет достигнут во второй половине XXI века, но затем РВ уменьшится до 2.6 Вт/м² к 2100 г. (van Vuuren et al., 2011).

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

В отличие от линейного “одноканального” пути развития сценария в прошлом, ныне предлагается его двухканальное построение: от исходных эволюций RCP (радиационного воздействия) по годам и с возможным учетом пространственной неоднородности движение идет по “климатическому” каналу построения ожидаемых изменений климатических характеристик в глобальном и региональном масштабах. По второму “социально-экономическому” каналу исследование развивается как бы “вверх” к определению социально-экономических условий развития общества (природы), которые могут создать принятые в сценариях RCP характеристики (эволюции воздействий и других исходных факторов) ко времени “действия” этих факторов в XXI веке (табл. 3.2.1). При этом в имеющихся публикациях нет указаний, каким образом проводить это движение “вверх по потоку” и строить ожидаемые изменения социально-экономических условий, способные привести к имеющимся сценариям RCP.

Для климатических моделей необходима более конкретная и детальная информация об эволюции климатообразующих факторов, чем ее в состоянии представить сценарии SRES, которые к тому же не могли отражать возможные меры по сокращению тех или иных атмосферных эмиссий или изменений, происходящих на подстилаю-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Таблица 3.2.1. Особенности составления сценариев антропогенных воздействий на климатическую систему

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

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

1. наличие достаточно подробной и достоверной исходной информации о характеристиках атмосферы и подстилающей поверхности;
2. четыре исходных сценария без выделения среди них “оптимального”, но лишь “крайних” и промежуточных. При этом характеристики сценариев должны статистически надежно отличаться друг от друга;
3. хорошо обоснованный сценарий должен успешно обеспечивать климатические прогнозы, получаемые с помощью различных моделей;
4. используемые сценарии должны учитывать возможность включения разных климатообразующих факторов (на подробной пространственной сетке и для длительного исторического периода);
5. должна быть предусмотрена возможность адаптации сценариев для нужд климатического моделирования.

Важное развитие сценариев РВ в RCP – их экстраполяция на период после 2100 г., чего не было у предыдущих групп сценариев. Такая экстраполяция представлена на рис. 3.2.1 в виде графиков эволюции РВ и эмиссии CO₂ в системе ECP (Extended Concentration Pathway) до 2300 г. При этом экстраполяция РВ для RCP6.0 проводится в двух вариантах: помимо сохранения уровня РВ 6.0 Вт/м² в 2100 г., период после этого года еще рассмотрен сценарий ECP-SCP (Supplementary Concentration Pathway), в нем уровни РВ снижаются от РВ, равного 6.0 Вт/м² в 2100 г., до 4.5 Вт/м² к 2250 г. На рис. 3.2.1 представлены также и принятые уровни эмиссий CO₂ в период с 1900 до 2300 гг. для всех рассматриваемых сценариев. На рис. 3.2.2 и 3.2.3 представлены графики изменения со временем в XXI веке как самой величины РВ, так и соответствующих концентраций основных парниковых газов (CO₂, CH₄ и N₂O для рассматриваемых здесь сценариев RCP, взятые из (van Vuuren et al., 2011)).

В табл. 3.2.2 указаны качественные особенности изменений РВ и соответствующие им величины концентрации CO₂ для каждого из сценариев. При этом в табл. 3.2.2 для каждого из сценариев указана величина ожидаемого максимального содержания суммы парниковых газов в эквиваленте CO₂, т. е. максимальная концентрация каждого газа умножалась на величину его потенциала глобального потепления (ОД_РФ-1, 2008; IPCC, 2007).

Как указано в (van Vuuren et al., 2011), в сценариях учитывались антропогенные изменения радиационных характеристик подстилающей поверхности, глобальные эмиссии парниковых газов и других рассматриваемых климатообразующих

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

факторов, распределенных по площади поверхности Земли на сетке $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ для нескольких разных регионов на подстилающей поверхности и с учетом сезонных изменений характеристик растительности суши. Эти характеристики приняты нестационарными для разных сценариев. Также отдельно рассмотрены и приняты разными для разных сценариев скорости энергопотребления и расходов ископаемого топлива по годам XXI века. Дополнительно в (van Vuuren et al., 2011) указаны оценки эмиссий SO_2 и NO_x как газов атмосферы, частично антропогенных и участвующих в фото-

химических процессах в атмосфере, к тому же влияющих на содержание там озона и метана. Отмечается, что для всех сценариев величины эмиссий этих газов и их продуктов – аэрозолей снижаются в течение XXI века в результате мер по совершенствованию очистки воздуха в выбросах промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Как известно, снижение аэрозольного загрязнения воздуха в промышленно развитых регионах Европы и Северной Америки уже привело к росту прозрачности атмосферы над ними (Wild, 2009). Общие характеристики сценариев RCP

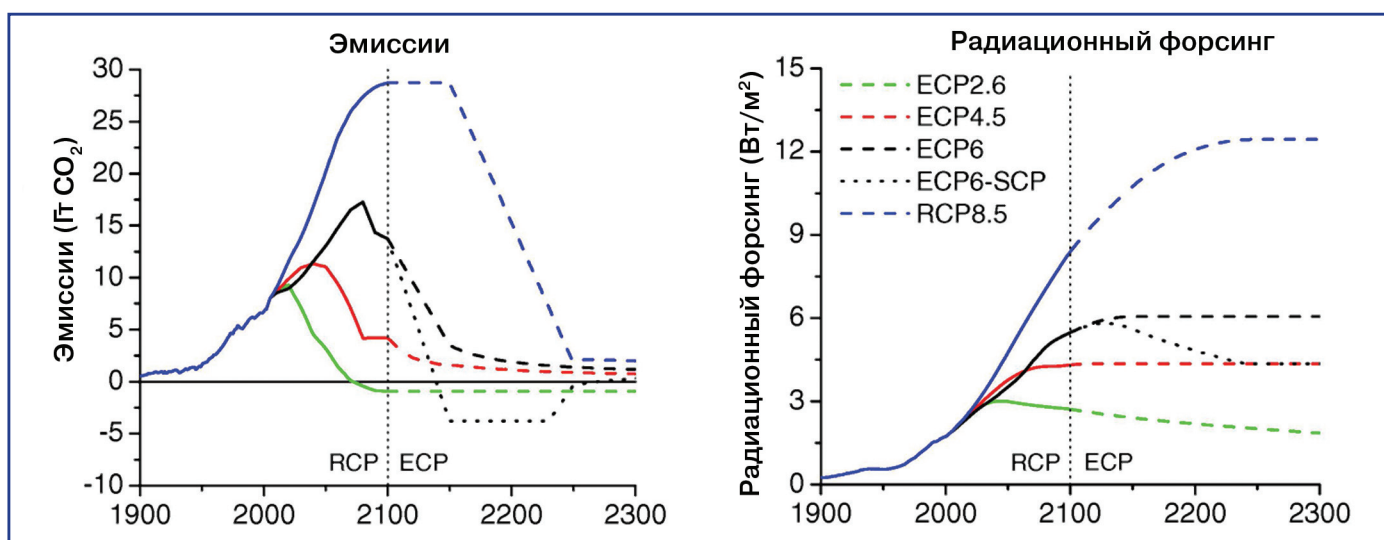


Рис. 3.2.1. Экстраполяция эмиссии CO_2 и радиационного воздействия на период после 2100 г. по сценариям RCP. Сценарий RCP6.0 до 4.5 показывает альтернативу эволюции РВ и эмиссии CO_2 (см. текст).

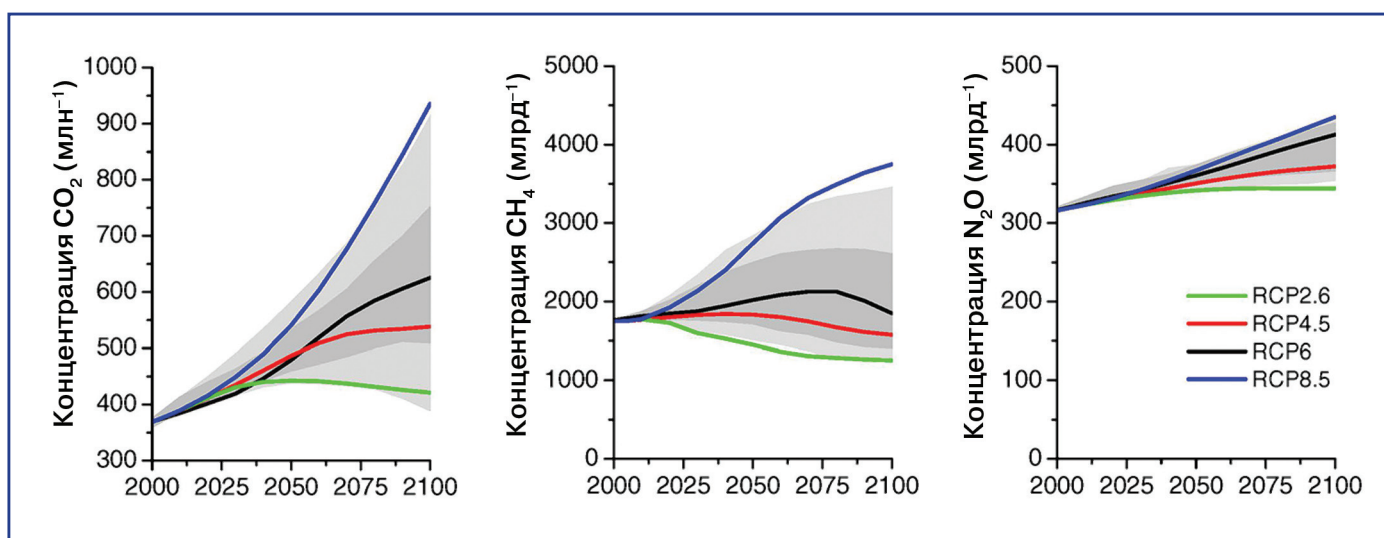


Рис. 3.2.2. Графики изменений со временем в системе RCP величины радиационного воздействия (слева); величины эмиссии CO_2 (середина); оценки вклада разных парниковых газов в РВ в 2100 г. (справа). Темно- и светло-серый фон отражает 98% и 90% процентили на левом графике и на остальных следующих графиках.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

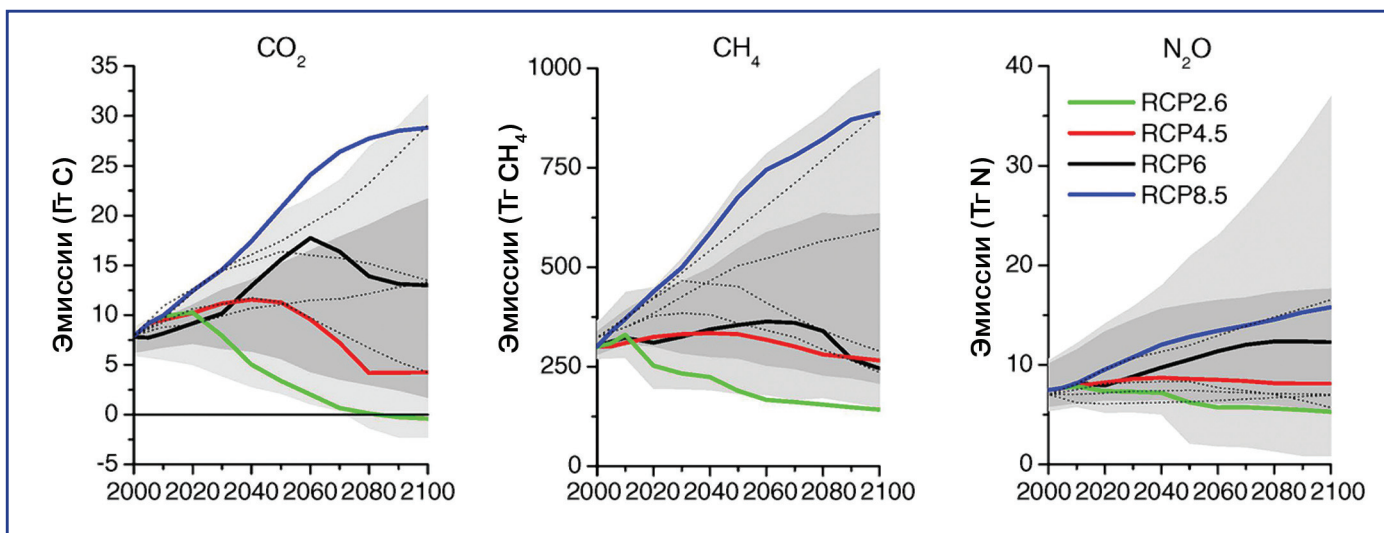


Рис. 3.2.3. Графики изменений эмиссии парниковых газов в XXI веке в сценариях RCP. Точечные линии отражают сценарии эмиссии SRES.

просуммированы в табл. 3.2.3 (по материалам из (van Vuuren et al., 2011)).

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

К недостаткам “линейки” сценариев RCP следует отнести некоторую рассогласованность подходов при их разработке, поскольку каждый из сценариев готовился разными группами исследователей при отсутствии удовлетворительной координации между ними (табл. 3.2.2). Среди существующих сценариев национальные группы чаще выбирают для работы те из них, которые подготовлены в той же стране. Например, в США отдают предпочтение сценариям RCP3.0 (RCP2.6) и RCP4.5, а не сценарию RCP6.0.

Таблица 3.2.2. Величины максимума концентраций парниковых газов в сценариях RCP

Сценарий	Величина CO ₂ экв.	Год ее достижения	Авторы
RCP8.5	1370 ppmv	2100 г.	IIASA
RCP6.0	850 ppmv	После 2100 г.	NIES (Япония)
RCP4.5	650 ppmv	После 2100 г.	GCAM (США)
RCP2.6*	490 ppmv	2100 г.	IMAGE (Нидерланды)

Примечание: * Максимум РВ, равный 3.0 Вт/м², достигается во второй половине XXI века, затем значение РВ снижается к 2100 г. до 2.6 Вт/м².

Таблица 3.2.3. Качественные характеристики сценариев RCP (van Vuuren et al., 2011)

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

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

3.2.2. Ожидаемые в XXI веке глобальные изменения климата

Большинство расчетов по моделям климата в рамках СМIP5 проводилось по описанным в предыдущем разделе заданным уровням концентраций CO₂ до конца 2100 г. – это 421 ppmv* (сценарий RCP2.6), 538 ppmv (RCP4.5), 670 ppmv (RCP6.0) и 936 ppmv (RCP8.5). С учетом концентраций метана и закиси азота соответствующие суммарные эквивалентные концентрации CO₂ составляют 475 ppmv, 630 ppmv, 800 ppmv и 1313 ppmv. По моделям СМIP5 были выполнены дополнительные расчеты с уровнями выбросов CO₂, заданными в соответствии с результатами, полученными по моделям интегрированной оценки. Кроме того, по всем сценариям проводились расчеты с использованием новых данных по химическому составу атмосферы, моделей СМIP5, включающих химические блоки, а также заданных значений выбросов химически активных газов (метан, оксиды азота, СО, неметановые летучие органические соединения). Эти расчеты позволили оценить неопределенности, обусловленные обратными связями в глобальном углеродном цикле и химическими взаимодействиями в атмосфере.

Прогнозы на ближайшие несколько десятилетий создают глобальную картину изменений климата, аналогичную той, которая ожидается на конец XXI века, но с меньшими абсолютными значениями изменений. Внутренняя изменчивость климата по-прежнему является главным фактором, осложняющим получение статистически значимых изменений климата на региональном уровне в краткосрочной перспективе. Однако с учетом сценариев RCP к середине XXI века значения ожидаемых изменений климата будут зависеть от выбора сценария эмиссии в большей степени, чем когда в прогнозах использовались сценарии семейства SRES. Приведенное ниже описание возможных в будущем изменений в глобальной климатической системе опирается на оценки, представленные в выпущенном Техническом резюме и Резюме для лиц, принимающих решения, последнего (пятого) Отчета МГЭИК

(www.ipcc.ch/report/ar5/wg1). В настоящем разделе основное внимание уделяется изменениям температурного и гидрологического режима суши и изменениям в Мировом океане. Что касается криосферы, то ее большая часть сосредоточена на российской территории и в Арктике; изменения криосферы в указанных регионах в значительной степени характеризуют те изменения, которые могут произойти в глобальной криосфере под влиянием глобального потепления. Поэтому оценки возможных в будущем изменений снежного покрова, характеристик вечной мерзлоты и морского льда рассматриваются в разделе 3.2.3, который посвящен анализу изменений климата в регионах России и на прилегающих к ним территориях.

Температурный режим. Оценки изменения климата в XXI веке показывают, что средняя глобальная температура будет возрастать при всех сценариях радиационного воздействия. К концу столетия по отношению к периоду 1986-2005 гг. наиболее вероятным будет изменение температуры воздуха в три раза большее по сравнению со сценарием RCP2.6, допускающим стабилизацию потепления во второй половине столетия.

Наиболее вероятная оценка роста глобальной температуры в 2085–2100 гг. по отношению к 1986–2005 гг. в диапазоне 5–95% моделей СМIP5 при различных концентрациях CO₂ будет составлять: 0.2–1.8°C (RCP2.6), 1.0–2.6°C (RCP4.5), 1.3–3.2°C (RCP6.0), 2.6–4.8°C (RCP8.5).

При сценариях RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 глобальный рост температуры к 2100 году вероятно превысит 2°C, по отношению к доиндустриальному периоду, и не превысит этот рубеж при сценарии RCP2.6. В Четвертом докладе МГЭИК (IPCC, 2007) отмечалось, что изменение средней глобальной температуры на континентах превышает изменения соответствующей температуры на океанах примерно в 1.5 раза.

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

* ppmv = одна молекула углекислого газа на миллион молекул воздуха.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

лантике и в Южном океане при всех сценариях воздействия.

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

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

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

Атмосферные осадки и речной сток. С высокой степенью достоверности глобальные осадки в следующем столетии вырастут. Скорость их роста по отношению к росту температуры вероятно составит 1–3% на 1°C для всех сценариев, кроме RCP2.6. Для последнего сценария диапазон чувствительности составит 0.5–4% на 1°C к концу XXI века.

В высоких широтах и в экваториальной зоне Тихого океана к концу века, вероятно, ожидается увеличение среднегодового количества осадков по сценарию RCP8.5. Во многих засушливых регионах умеренных широт и субтропиков вероятно уменьшение среднего количества осадков, в то время как во многих влажных районах в средних

широтах среднее количество осадков к концу века возрастет по сценарию RCP8.5. Одновременно с вероятным ослаблением муссонов интенсивность муссонных осадков, вероятно, увеличится вследствие повышения влагозапаса атмосферы. Маловероятно, что сроки начала муссонов сдвинутся на более ранние сроки, однако, в целом, вероятен сдвиг завершения муссонного сезона к концу года, что приведет к удлинению сезона муссонов во многих регионах.

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

Несмотря на большую вероятность роста осадков в некоторых регионах Земли, отсутствуют регионы, для которых существовал бы надежный прогноз роста влагозапаса почвы, однако развитие в будущем засушливых условий в Средиземноморье, на юго-западе США и на юге Африки согласуется с ожидаемыми изменениями в циркуляции Гаддлея и ростом приземной температуры воздуха в целом.

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

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

Повторяемость осадков разной интенсивности также будет изменяться. По-видимому, следу-

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

ет ожидать увеличения повторяемости более интенсивных осадков за счет той части их статистического распределения, которая описывает осадки малой интенсивности. Во влажных, некоторых засушливых и полусушливых регионах с большой вероятностью осадки будут более интенсивными, но менее частыми.

Мировой океан. Наиболее заметный рост температуры океана ожидается в поверхностном слое в тропиках и в субтропической зоне Северного полушария. Наиболее правдоподобные оценки повышения температуры верхнего стометрового слоя океана к концу XXI века составляют от 0.6°C (RCP2.6) до 2.0°C (RCP8.5), а на глубине около 1000 м – от 0.3°C (RCP2.6) до 0.6°C (RCP8.5). С высокой степенью вероятности можно утверждать, что в течение XXI века Атлантическая меридиональная циркуляция будет ослабевать: ослабление может составить 11% (диапазон неопределенности от 1 до 24%) для сценария RCP2.6 и 34% (диапазон неопределенности от 12 до 54%) для RCP8.5. Вероятно, что к середине XXI века произойдет некоторое ослабление этой циркуляции на фоне ее большой междекадной изменчивости.

Повышение уровня Мирового океана, начавшееся в XX веке, будет продолжаться в течение всего XXI века. Среднее повышение уровня Мирового океана в 2081–2100 гг. по сравнению с концом XX века, вероятно, будет находиться в диапазонах: 0.26–0.55 м по сценарию RCP2.6, 0.32–0.63 м по сценарию RCP4.5, 0.33–0.63 м по сценарию RCP6.0 и 0.45–0.82 м по сценарию RCP8.5. Также вероятно, что по сценарию RCP8.5 повышение уровня к 2100 г. составит от 0.52 до 0.98 м, а скорость повышения в течение 2081–2100 гг. – от 8 до 16 мм в год. Приведенные оценки повышения уровня Мирового океана учитывают вклад, вносимый таянием ледников и ледовых щитов. Модели прогнозируют глобальное повышение уровня кислотности океана при всех сценариях. Соответствующее снижение к концу XXI века уровня pH* в поверхностном слое океана находится в диапазоне от 0.06 до 0.07 (RCP2.6), от 0.14 до 0.15 (RCP4.5), от 0.20 до 0.21 (RCP6.0) и от 0.30 до 0.32 (RCP8.5).

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

3.2.3. Будущие изменения климата России

В оценках региональных особенностей будущих изменений климата России по новым сценариям используется разделение территории страны в зависимости от экономико-административной общности регионов. Представленный в настоящем докладе анализ включает, как отмечено выше, 8 федеральных округов (рис. 3.1.1П).

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

3.2.3.1. Температурный режим

Как отмечалось в главе 3.1, модели нового поколения улучшили описание термического режима и связанных с ним экстремальных явлений по сравнению с моделями СМIP3 во многих регионах Земли (Sillman et al., 2013).

В целом, согласно сценарию RCP4.5, оценки изменений средней сезонной температуры (рис. 3.2.4) во все периоды XXI века хорошо согласуются с оценками, полученными для российских

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

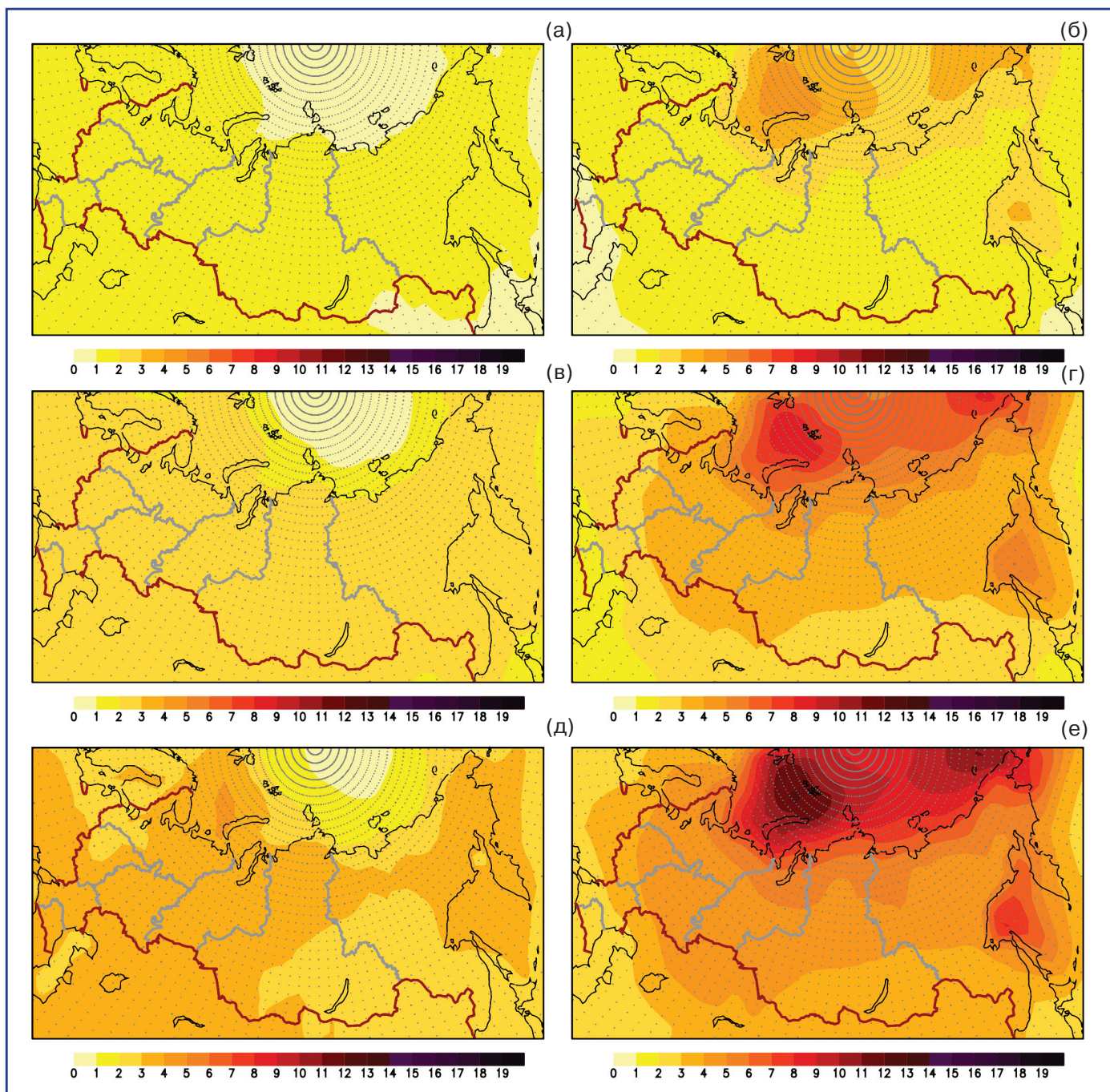


Рис. 3.2.4. Изменения средней сезонной температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в период 2011–2030 (а, б), 2041–2060 (в, г) и 2080–2099 гг. (д, е) по отношению к концу XX века летом (а, в, д) и зимой (б, г, е) по оценкам ансамбля 31 модели СМIP5 по сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5. Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу.

регионов в рамках ОД_РФ-1 (2008) и большого числа ранних исследований. Россия и ее арктические регионы по оценкам моделей СМIP5, как и по оценкам моделей предыдущего поколения, остаются регионами Земли, потепление климата в которых существенно превышает среднее глобальное потепление.

Наиболее заметные изменения средней летней температуры ожидаются в Северо-Западном и Уральском округах; там в начале века потепление ожидается в диапазоне $0.5\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$, но уже в середине века на арктическом побережье оно достигает 3°C , а в конце XXI века – $3.5\text{--}4.5^{\circ}\text{C}$. Такой рост температуры обусловлен прямым радиационным воздей-

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

вием парниковых газов на подстилающую поверхность, с одной стороны, а с другой – влиянием быстро теплеющей акватории арктических морей, примыкающей к берегам указанных территорий (там модели дают наиболее значительное сокращение ледового покрова, см. раздел 3.2.3.5). Зимой в ближайшей перспективе следует ожидать максимального потепления в тех же регионах, что и летом, но зимнее потепление окажется большим, – уже через 10–15 лет средняя зимняя температура там будет на 4–5°C выше, чем в конце XX века. Однако уже в середине XXI века быстрый рост зимней температуры начнет затрагивать большее число федеральных округов, имеющих выход на арктическое побережье России, вплоть до Чукотки. В Северо-Западном и Уральском федеральных округах потепление может достигнуть 6–7°C, а на побережьях сибирских округов – 4–5°C. К концу века (2080–2099 гг.) пространственные особенности и отмеченные тенденции роста температуры сохранятся, а на территории российской Арктики зимняя температура воздуха может вырасти до 7–9°C относительно базового периода (1980–1999 гг.). При более “агрессивном” сценарии RCP8.5 качественные

(а в краткосрочной перспективе – и количественные) изменения термического режима будут близкими тем, которые показаны на рис. 3.2.6. Однако, начиная с середины XXI века, скорость изменений температуры по сценарию RCP8.5 как зимой, так и летом, оказывается в 1.2–1.4 раза большей по сравнению с более умеренным сценарием RCP4.5. В целом необходимо отметить высокую степень согласованности рассчитанных по моделям изменений средней сезонной температуры в течение всего XXI века, как для зимнего, так и для летнего сезонов. На рис. 3.2.4 видно, что отношение сигнала к шуму (отношение среднего по ансамблю изменения температуры к стандартному отклонению изменений в ансамбле) оказывается большим единицы в течение всего XXI века на всей территории России.

В табл. 3.2.4а и 3.2.4б приведены изменения средней температуры и межмодельный разброс, полученные по ансамблю 31 модели CMIP5 в федеральных округах России за периоды 2011–2030, 2041–2060 и 2080–2099 гг. по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг. с учетом сценариев RCP4.5 и RCP8.5. Оценки приводятся для зимы, лета и в среднем за год. Жирным шрифтом выде-

Блок 3.2.1. Как изменятся температура приземного воздуха и осадки на территории России к моменту, когда среднее глобальное потепление преодолеет критическую отметку 2°C?

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

Существует несколько разных подходов к оценке изменений на территории России при потеплении глобального климата на 2°C (например, Груза и Ранькова, 2012; Катцов и Говоркова, 2013). Одним из них является следующий: эволюция средней глобальной температуры по ансамблю моделей климата позволяет определить условный “момент” превышения роста глобальной температуры отметки в 2°C (значение глобальной температуры в доиндустриальный период в настоящей работе принято соответствующим концу XIX века). Этот “момент” можно отнести к середине периода (например, двадцатилетия), для которого и можно рассматривать региональные (т. е. для территории России) изменения как температуры, так и других климатических характеристик.

Вышеупомянутые интервалы, полученные для двух сценариев (RCP4.5 и RCP8.5), оказались довольно близкими и даже частично перекрывающимися друг друга – 2034–2053 гг. и 2028–2047 гг., соответственно. Изменения климатических характеристик на территории России для указанных интервалов представлены на рис. 3.2.5 и в табл. 3.2.4 и 3.2.5.

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

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Таблица 3.2.4а. Изменения сезонной температуры (°С) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 31 модели СМР5 в федеральных округах России по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг для сценария RCP4.5.

ФО	Период															
	2011-2030				2034-2053*				2041-2060				2080-2099			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1.Сев.-Зап.	2.0 ± 1.1	1.6 ± 0.8	1.4 ± 0.6	1.5 ± 0.6	3.4 ± 1.2	2.7 ± 1.1	2.2 ± 0.9	2.6 ± 0.9	3.8 ± 1.3	3.0 ± 1.2	2.5 ± 0.9	2.8 ± 1.0	5.3 ± 1.5	4.1 ± 1.4	3.3 ± 1.2	4.0 ± 1.2
2.Центр.	1.5 ± 1.1	1.4 ± 0.9	1.3 ± 0.6	1.3 ± 0.5	2.7 ± 1.1	2.4 ± 0.9	2.1 ± 1.0	2.1 ± 0.7	3.0 ± 1.1	2.6 ± 1.1	2.4 ± 1.0	2.3 ± 0.6	4.1 ± 1.2	3.4 ± 1.2	3.0 ± 1.1	3.1 ± 0.8
3.Южн.	1.2 ± 0.8	1.0 ± 0.6	1.4 ± 0.6	1.1 ± 0.4	2.0 ± 0.7	1.9 ± 0.6	2.3 ± 0.8	1.9 ± 0.6	2.2 ± 0.8	2.0 ± 0.8	2.5 ± 0.9	2.1 ± 0.6	3.0 ± 1.0	2.7 ± 0.9	3.2 ± 1.0	2.8 ± 0.7
4.Приволж.	1.6 ± 1.1	1.4 ± 0.9	1.3 ± 0.6	1.3 ± 0.4	2.8 ± 1.1	2.6 ± 1.0	2.2 ± 0.9	2.2 ± 0.6	3.2 ± 1.1	2.9 ± 1.2	2.4 ± 1.0	2.4 ± 0.6	4.3 ± 1.3	3.7 ± 1.3	3.1 ± 1.1	3.2 ± 0.8
5.Уральск.	1.9 ± 1.1	1.5 ± 0.8	1.3 ± 0.6	1.6 ± 0.6	3.3 ± 1.2	2.7 ± 1.0	2.3 ± 0.9	2.8 ± 0.9	3.7 ± 1.4	3.1 ± 1.0	2.5 ± 1.0	3.1 ± 0.9	4.9 ± 1.4	4.0 ± 1.5	3.4 ± 1.3	4.2 ± 1.2
6.Сибирск.	1.6 ± 0.9	1.4 ± 0.7	1.2 ± 0.5	1.6 ± 0.5	2.9 ± 1.1	2.3 ± 1.0	2.1 ± 0.9	2.7 ± 0.8	3.3 ± 1.1	2.7 ± 1.0	2.4 ± 1.0	3.1 ± 0.8	4.3 ± 1.2	3.4 ± 1.3	3.1 ± 1.2	4.1 ± 1.1
7.Дальневост.	1.9 ± 0.7	1.4 ± 0.7	1.2 ± 0.6	1.7 ± 0.6	3.2 ± 1.0	2.4 ± 1.0	2.0 ± 0.9	2.9 ± 0.8	3.6 ± 1.1	2.7 ± 1.1	2.3 ± 1.0	3.3 ± 0.9	4.9 ± 1.5	3.6 ± 1.6	3.0 ± 1.2	4.4 ± 1.1
8.Сев.-Кавказ.	0.9 ± 0.5	0.8 ± 0.5	1.3 ± 0.6	1.0 ± 0.4	1.6 ± 0.5	1.6 ± 0.5	2.2 ± 0.7	1.8 ± 0.6	1.8 ± 0.6	1.8 ± 0.6	2.5 ± 0.8	2.0 ± 0.6	2.4 ± 0.8	2.4 ± 0.7	3.3 ± 1.0	2.7 ± 0.8
Россия	1.7 ± 0.7	1.4 ± 0.7	1.2 ± 0.5	1.6 ± 0.5	3.0 ± 0.9	2.4 ± 0.9	2.1 ± 0.8	2.6 ± 0.7	3.4 ± 1.0	2.7 ± 1.0	2.4 ± 0.9	3.0 ± 0.8	4.6 ± 1.2	3.6 ± 1.4	3.1 ± 1.1	4.0 ± 1.0

Таблица 3.2.4б. То же, что табл. 3.1а, но для сценария RCP8.5

ФО	Период															
	2011-2030				2028-2047**				2041-2060				2080-2099			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1.Сев.-Зап.	2.1 ± 1.0	1.8 ± 0.9	1.4 ± 0.6	1.8 ± 0.7	3.5 ± 0.9	2.7 ± 1.1	2.3 ± 0.9	2.8 ± 0.8	4.9 ± 1.0	3.7 ± 1.2	3.1 ± 1.1	3.8 ± 0.9	9.2 ± 1.8	6.8 ± 1.9	6.0 ± 1.8	6.8 ± 1.5
2.Центр.	1.6 ± 0.3	1.5 ± 0.9	1.5 ± 0.7	1.4 ± 0.6	2.6 ± 0.9	2.3 ± 1.0	2.3 ± 0.9	2.2 ± 0.7	3.7 ± 1.1	3.1 ± 1.2	3.1 ± 1.1	3.1 ± 0.7	7.0 ± 1.5	5.4 ± 1.6	5.8 ± 1.7	5.6 ± 1.1
3.Южн.	1.3 ± 0.8	1.2 ± 0.7	1.5 ± 0.6	1.2 ± 0.5	2.1 ± 0.8	1.9 ± 0.7	2.5 ± 0.8	2.1 ± 0.6	2.8 ± 1.0	2.6 ± 0.9	3.3 ± 0.9	2.9 ± 0.6	5.3 ± 1.2	4.6 ± 1.1	6.0 ± 1.4	5.3 ± 1.0
4.Приволж.	1.7 ± 1.0	1.7 ± 0.9	1.4 ± 0.6	1.4 ± 0.5	2.8 ± 0.9	2.5 ± 1.1	2.3 ± 0.8	2.3 ± 0.6	3.9 ± 1.1	3.4 ± 1.3	3.1 ± 1.0	3.2 ± 0.7	7.6 ± 1.5	6.1 ± 1.8	5.8 ± 1.7	5.8 ± 1.1
5.Уральск.	2.1 ± 1.1	1.8 ± 0.8	1.4 ± 0.7	1.9 ± 0.7	3.5 ± 1.1	2.6 ± 1.1	2.3 ± 0.9	3.1 ± 0.9	4.7 ± 1.1	3.6 ± 1.1	3.2 ± 1.1	4.1 ± 1.0	9.4 ± 1.8	7.1 ± 2.1	6.4 ± 1.9	7.5 ± 1.5
6.Сибирск.	1.9 ± 0.9	1.5 ± 0.7	1.3 ± 0.6	1.8 ± 0.6	3.1 ± 1.0	2.2 ± 0.9	2.1 ± 0.8	3.0 ± 0.9	4.2 ± 1.1	3.2 ± 1.1	3.0 ± 1.0	4.0 ± 1.0	8.6 ± 1.7	6.4 ± 1.9	6.0 ± 1.8	7.4 ± 1.4
7.Дальневост.	1.9 ± 0.7	1.5 ± 0.7	1.3 ± 0.6	1.9 ± 0.6	3.4 ± 0.9	2.4 ± 0.9	2.1 ± 0.8	3.1 ± 0.9	4.7 ± 1.2	3.4 ± 1.3	2.9 ± 1.1	4.3 ± 1.1	9.7 ± 2.1	6.5 ± 2.2	5.6 ± 1.7	8.0 ± 1.6
8.Сев.-Кавказ.	1.0 ± 0.6	1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.6	1.2 ± 0.4	1.6 ± 0.6	1.7 ± 0.5	2.5 ± 0.7	2.0 ± 0.5	2.2 ± 0.8	2.3 ± 0.6	3.3 ± 0.9	2.8 ± 0.6	4.3 ± 1.1	4.4 ± 0.9	6.2 ± 1.4	5.2 ± 1.0
Россия	1.9 ± 0.7	1.6 ± 0.7	1.3 ± 0.5	1.8 ± 0.5	3.2 ± 0.8	2.4 ± 0.9	2.2 ± 0.8	2.9 ± 0.8	4.4 ± 1.0	3.3 ± 1.1	3.0 ± 1.0	3.9 ± 0.9	8.9 ± 1.6	6.5 ± 2.0	5.9 ± 1.7	7.3 ± 1.4

* Период, на середину которого в сценарии RCP4.5 в среднем по ансамблю моделей СМР5 приходится глобальное потепление на 2°С по отношению к доиндустриальному периоду.

** Период, на середину которого в сценарии RCP8.5 в среднем по ансамблю моделей СМР5 приходится глобальное потепление на 2°С по отношению к доиндустриальному периоду.

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

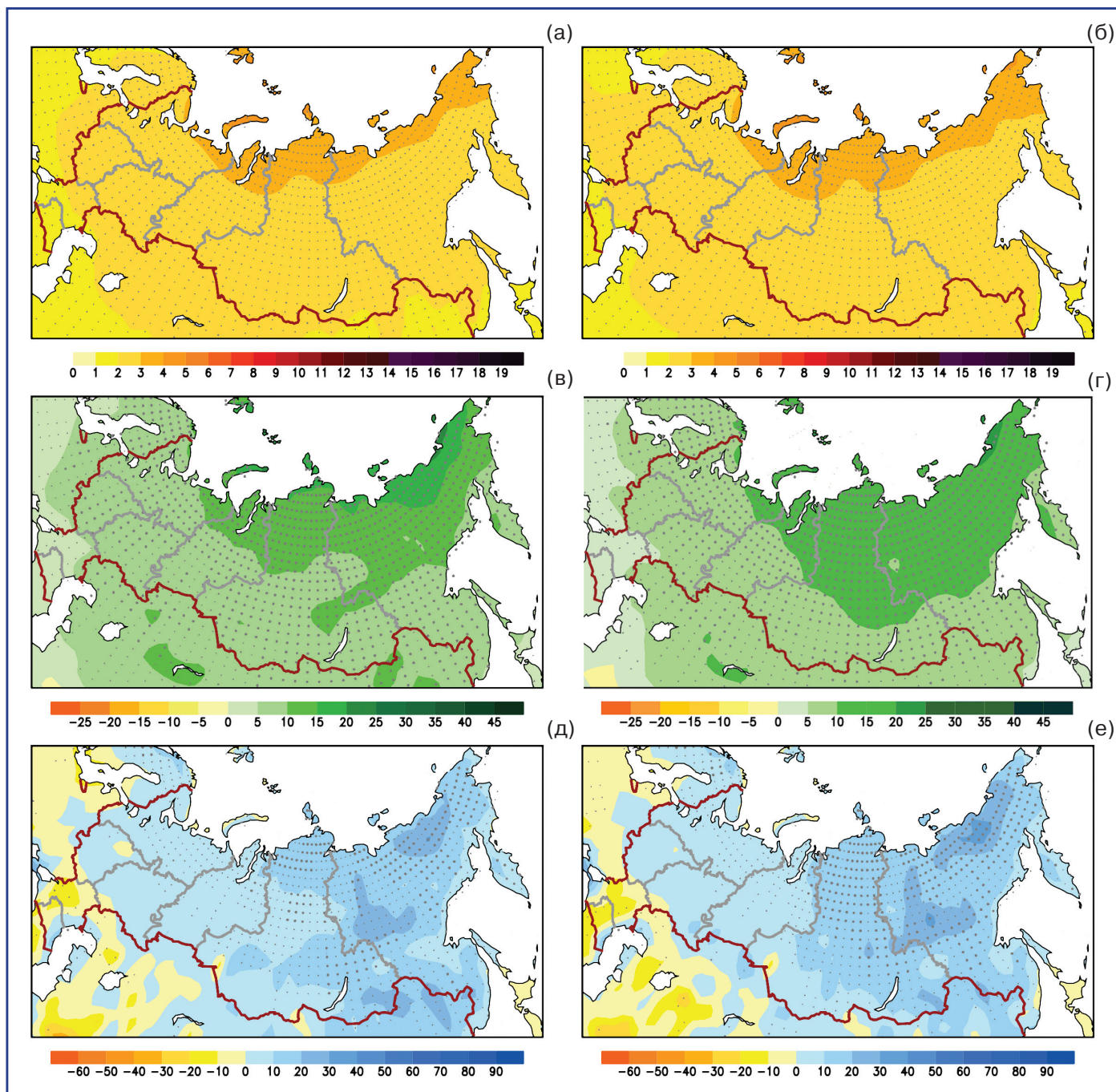


Рис. 3.2.5. Изменения среднегодовой температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) (а, б), среднегодовых осадков (%) (в, г) и суммарного годового стока (%) (д, е) в периоды 2034-2053 (а, в, д) и 2028-2047 гг. (б, г, е), соответствующие повышению средней глобальной температуры на 2°C , по отношению к доиндустриальному периоду, в сценариях RCP4.5 (а, в, д) и сценарий RCP8.5 (б, г, е).

лены оценки, для которых отношение сигнала (среднего по ансамблю изменения) к шуму (абсолютной величине стандартного отклонения в ансамбле) оказывается большим единицы.

Особенностью экстремальных климатических режимов является их малая повторяемость и, как следствие, меньшая, по сравнению со средними сезонными и годовыми характеристиками, стати-

стическая обеспеченность оценок их будущих изменений. Изменения оценок экстремальности оказываются не столь однозначными, как в случае средней сезонной температуры или давления, и предсказываются, преимущественно, с меньшей степенью достоверности (Школьник и др., 2012). Разнообразие экстремальных явлений на территории России очень велико. В континентальных рай-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Таблица 3.2.5а. Изменения сезонных суммарных осадков (%) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 31 модели CMIP5 в федеральных округах России по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг. для сценария RCP4.5. Жирным шрифтом выделены изменения, которые превышают по абсолютной величине стандартные отклонения (межмодельный разброс).

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

Таблица 3.2.5б. То же, что табл. 3.2а, но для сценария RCP8.5. Жирным шрифтом выделены изменения, которые превышают по абсолютной величине стандартные отклонения (межмодельный разброс)

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

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

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

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

онах значительную угрозу социально-экономической инфраструктуре несут, в первую очередь, такие явления, как высокие температуры воздуха летом и необычно низкие температуры зимой, продолжительность периодов с такими температурами, осадки высокой интенсивности и частота их выпадения. В регионах, имеющих выход к океану, (как отмечалось в разделе 3.1.5, Россия имеет самую большую в мире протяженность береговых зон), возникают более сложные, по сравнению с другими регионами, механизмы формирования экстремальных явлений. Ключевую роль здесь играет интенсивное взаимодействие различных сред (суша, океан, криосфера) в пределах пограничных зон сравнительно небольшой ширины. Для каждой из указанных сред характерны специфические особенности температурно-влажностного режима и атмосферной циркуляции, по-разному реагирующими на рост глобальной температуры. В таких районах происходит интенсивное тумано- и осадкообразование, обледенение, возникают другие опасные явления, оказывающие негативное влияние, например, на транспортные операции в прибрежной зоне. От эффективности таких операций, в свою очередь, зависит жизнедеятельность и функционирование объектов инфраструктуры во многих удаленных федеральных округах России.

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

В число рассматриваемых индексов экстремальности температуры, помимо ее абсолютных годовых максимумов и минимумов, годового диапазона экстремальных температур и числа морозных суток в году, входят продолжительность волн тепла (летний сезон) и волн холода (зимний сезон). Волна тепла характеризуется максимальным количеством последовательных дней (не менее шести дней) с суточным максимумом температуры, превышающим более чем на 5 градусов

многолетнюю норму суточного максимума температуры, волна холода – как максимальное количество последовательных дней (не менее 6 дней) с суточным минимумом температуры, меньшим многолетней нормы на 5 и более градусов.

По сравнению с изменениями средней летней температуры (рис. 3.2.4), абсолютный годовой максимум температуры (рис. 3.2.6) будет более заметно возрастать, в первую очередь, на юге и Крайнем Севере Европейской Территории России, вблизи акваторий морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского. Во все периоды XXI века рост экстремально высоких температур воздуха в указанных районах будет более быстрым по сравнению с ростом средней температуры теплого сезона. К концу века потепление там будет находиться в диапазоне 6–7°C – это на 3°C больше, чем изменение средней летней температуры. В то же время, в других регионах Центральной и Восточной Сибири, за исключением побережий Карского и Берингова морей, ожидается незначительный рост экстремально высоких температур в летний сезон в течение всего XXI века (изменение находится в диапазоне 1–2°C).

Как и в случае средней летней температуры, модели рассчитывают изменения максимума годовой температуры с высокой степенью достоверности, за исключением периода 2011–2030 гг., когда на части территории Центральной Сибири отношение сигнала к шуму в ансамбле моделей оказывается меньшим единицы. На том же рисунке приведены изменения волн тепла. Из рисунка видно, что с наиболее высокой степенью вероятности продолжительность волн тепла будет сокращаться на Кольском полуострове (на 1–2 суток за сезон). Такие изменения, по-видимому, обусловлены ростом временной изменчивости летних суточных максимумов температуры на северо-западе в течение всего XXI века. На севере Сибири к концу XXI века, напротив, ансамбль предсказывает рост средней длительности волн тепла до 3 суток. Следует отметить, в регионе Прикаспийской низменности в период 2041–2060 гг. также ожидаются более затяжные периоды с высокими температурами (до 3 суток). По сравнению с базовым периодом такое увеличение находится в диапазоне 30–40%, то есть представляется весьма значительным.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

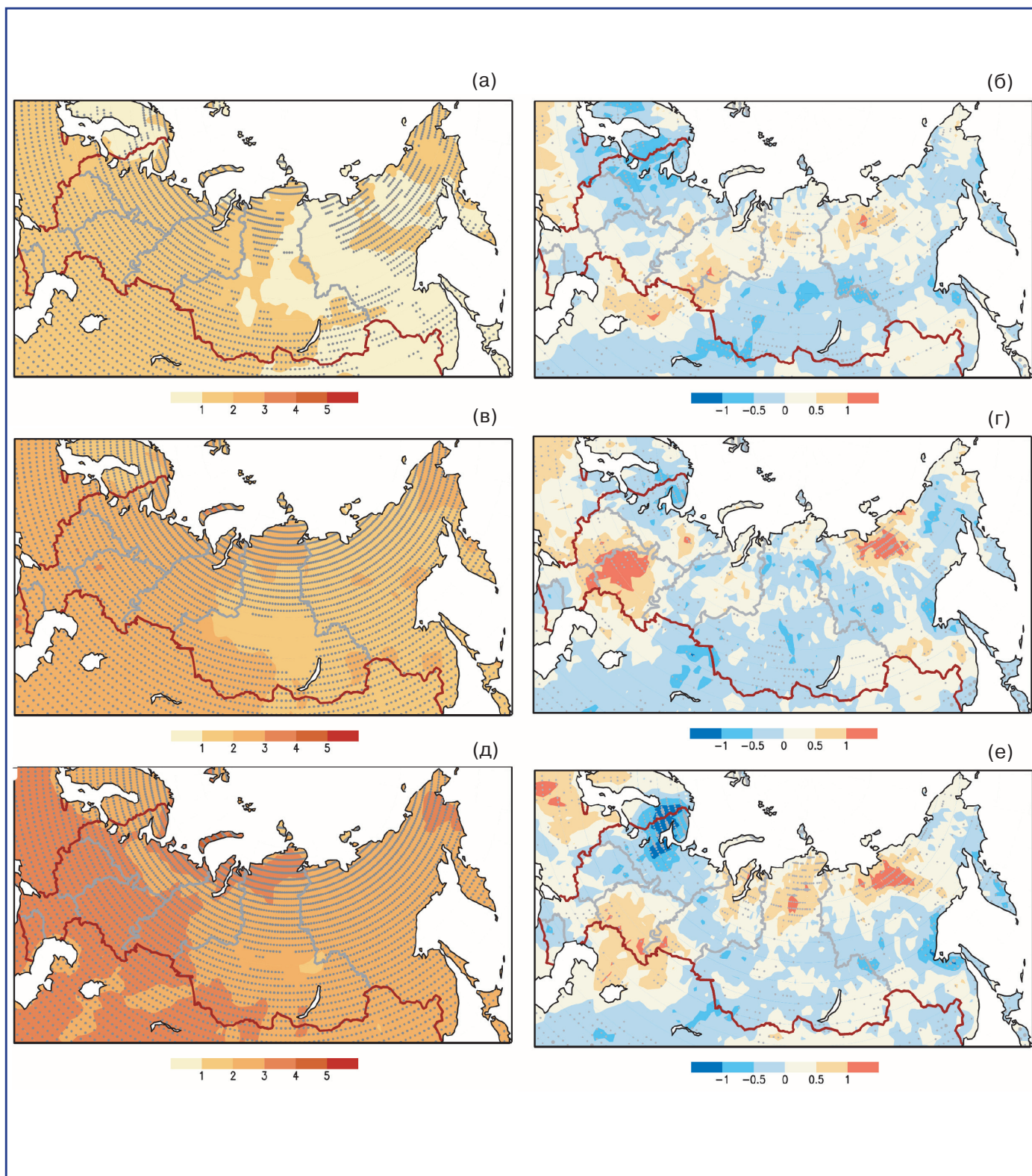


Рис. 3.2.6. Изменения среднего за 20 лет абсолютного годового максимума температуры (°C) приземного воздуха в периоды 2011–2030, 2041–2060 и 2080–2099 гг. (а, в, д) и длительности (дни) волн тепла летом (б, г, е) по оценкам ансамбля 14 моделей CMIP5 согласно сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5. Для температуры точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1. Для волн тепла мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в более, чем 90% моделей. Определение волны тепла см. в тексте.

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Изменения среднего за 20 лет годового минимума температуры (рис. 3.2.7), указывают на то, что как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе следует ожидать заметного смягчения температурного режима в холодное время года, в первую очередь, за счет повышения наиболее низких температур воздуха на севере Европейской территории России. На этой территории ожидается рост годовых минимумов температуры воздуха в период 2011–2030 гг. на 2–4°C, а концу XXI века – до 8°C. Наименее подверженными воздействию экстремально низких температур окажется восток России, где их рост будет примерно в 2 раза меньшим по сравнению с другими регионами. Среди причин, обуславливающих пространственные особенности изменения годового минимума температуры, следует назвать сокращение длительности залегания снежного покрова или его полное исчезновение в тех регионах, где будет отмечаться наиболее сильный рост минимумов температуры приземного воздуха. Что касается волн холода (их изменения показаны на том же рисунке), критерием экстремальности для которых выбирается порог температур на 5°C ниже средней минимальной суточной температуры в базовом периоде, то их изменения в ближайшие 10–15 лет будут слабыми на всей территории России. Однако в середине XXI века и, тем более, в его конце, ожидаются существенные (до 3 суток) уменьшения продолжительности волн холода, прежде всего, на побережьях Баренцева и Белого морей, а также на территориях Камчатки и Дальнего Востока. Для климата конца XX века характерная длительность волн холода в прибрежной полосе находилась в диапазоне 3–5 суток. Таким образом, в ряде прибрежных районов повторяемость экстремальных событий, связанная с очень холодными периодами, может оказаться близкой нулю, начиная уже с середины XXI века. В южных регионах России, особенно в Сибирском Федеральном округе, напротив, ожидается некоторое увеличение продолжительности волн холода (до 2 суток) в начале и середине века. Однако затем, до конца XXI века, их длительность там будет сокращаться.

Что касается годового диапазона экстремальных значений температуры, который представля-

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

В средней полосе России, а также на юге в районах, примыкающих к Каспийскому и Черному морям, некоторое снижение экстремальности температурного режима устойчиво проявится к концу XXI века. Зимы в этих регионах будут, по видимому, малоснежными или бесснежными, а радиационный баланс подстилающей поверхности – положительным в течение всего календарного года. Число морозных суток (когда минимальная суточная температура опускается ниже 0°C) наиболее заметно изменится во все периоды на прибрежных территориях тех федеральных округов, которые расположены в Европейской части России – это Северо-западный и Уральский округа (рисунок не приводится). Там в ближайшие 10–15 лет число морозных дней в году станет в среднем на 10–20 меньшим по сравнению с концом XX века, а концу XXI века уменьшение числа таких дней достигнет 40 за год.

3.2.3.2. Циркуляционный режим атмосферы

Атмосферная циркуляция оказывает значительное влияние на формирование термического и гидрологического режима на территории России. Изменения атмосферной циркуляции в XXI веке могут существенно отразиться не только на средних сезонных и годовых характеристиках приземного климата, но и на экстремальных явлениях, связанных с температурой приземного воздуха и осадками. Среди таких явлений, уча-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

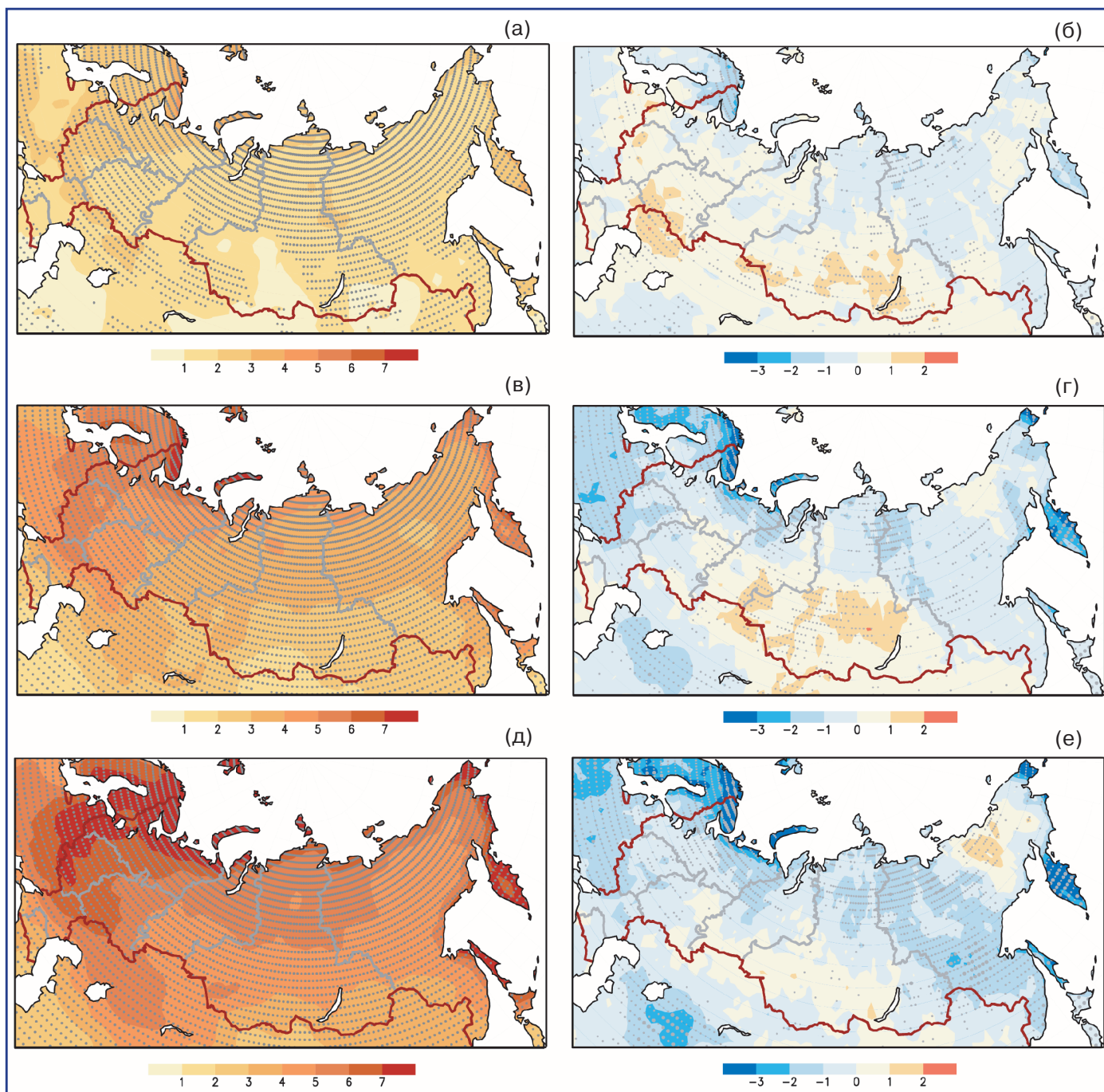


Рис. 3.2.7. То же, что на рис. 3.2.6, но для годового минимума температуры и длительности волн холода зимой.

сившихся в последние годы и, возможно, обусловленных изменениями глобальной атмосферной циркуляции, следует отметить небывалую засуху в Центральной России 2010 года и исключительно интенсивный паводок в Амурской области в 2013 году.

В последних отчетах МГЭИК отмечается, что обнаружение отклика атмосферной циркуляции на антропогенное воздействие затруднено по

причине ее большой пространственно-временной изменчивости во внетропических широтах. Результат высокого уровня климатического шума – большая, по сравнению с тропиками, неопределенность модельных оценок будущих изменений атмосферной циркуляции, особенно на ближайшие 30–50 лет. Что касается более отдаленной перспективы (например, конца текущего века), то большая часть модельных оценок сходится в од-

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

ном: под влиянием глобального потепления ожидается постепенное смещение траекторий циклонов к полюсу и ослабление глобальной циклонической активности в целом (см., например, Bengtsson et al., 2009).

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

Будущие изменения массы атмосферы на территории России в целом согласуются с ранее выполненными перспективными оценками в рамках ОД_РФ-1 (2008), где использовались результаты расчетов изменений климата по моделям предыдущего поколения СМIP3. Картина изме-

нений атмосферного давления для зимнего и летнего сезонов для сценария RCP8.5 свидетельствуют о том, что при потеплении климата на всей территории России в летний сезон в средне- и долгосрочной перспективе будет преобладать тенденция к уменьшению давления на 1–2 гПа относительно базового периода. Зимой тенденция уменьшения давления будет выражена сильнее на большей части территории страны (модели прогнозируют понижение давления до 3 гПа к концу XXI века), за исключением ее южных регионов, где модельный ансамбль указывает на слабый рост давления (в дальней перспективе согласно сценарию RCP8.5 – до 2 гПа). Что касается ближайших 10–20 лет, то зимой и до середины XXI века летом значительных изменений давления не ожидается. Ветер у подстилающей поверхности, согласно сценарию RCP8.5 подвергнется слабым

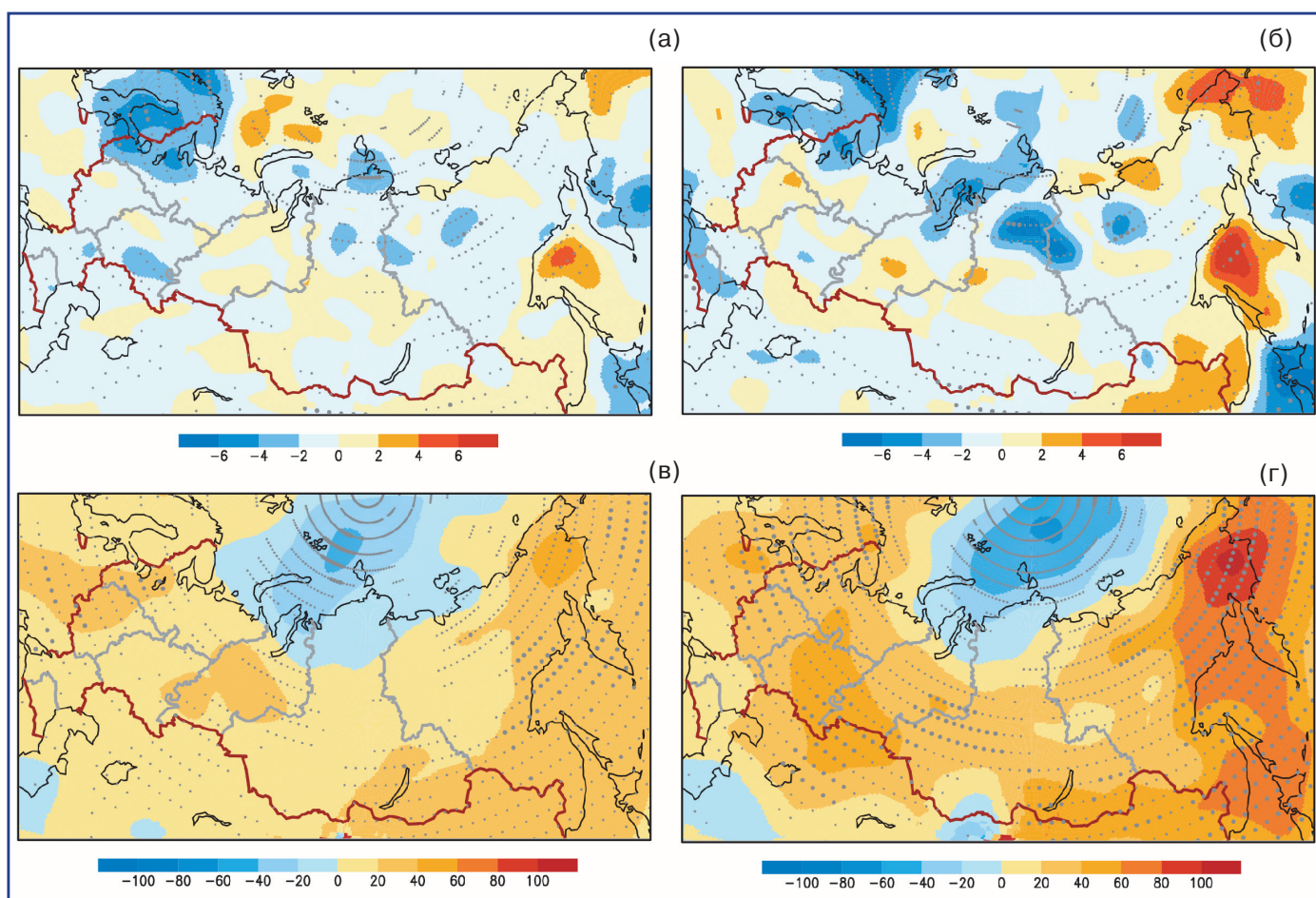


Рис. 3.2.8. Изменение среднего числа дней (а, в), когда на данной территории присутствуют циклоны, и изменение их среднего размера (б, г) в километрах зимой в периоды 2041–2060 (а, б) и 2080–2099 гг. (в, г) по отношению к концу XX века по оценкам ансамбля 14 моделей СМIP5 по сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP8.5. Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

изменениям на всей территории России во все периоды, вплоть до конца XXI века (рисунок не приводится). Изменения ветрового режима, независимо от региона и времени года, находятся в диапазоне ± 1 м/с, причем изменения приземного ветра летом в субарктической зоне России и зимой на территории Западной Сибири преимущественно отрицательные, а на юге Европейской территории летом – положительные. При реализации менее “агрессивных”, по сравнению с RCP8.5, сценариев радиационного воздействия, на территории страны следует ожидать, соответственно, более слабых изменений атмосферного давления и ветра.

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

При анализе будущих изменений атмосферной циркуляции значительный интерес представляют изменения таких характеристик циклонической активности, как число дней с циклоном на данной территории и их средний размер зимой (рис. 3.2.8). В это время года активность бароклинных волн в атмосфере Северного полушария наибольшая. В другие сезоны изменения характеристик циклонической активности до конца XXI века на большей части территории России незначительные. Из рисунка видно, что в условиях глобального потепления, как в середине, так и в конце века, число дней с циклоном зимой убывает, преимущественно, в субарктическом поясе и в центральной России, но особенно сильно – в районах Северо-Западного Федерального округа. Наибольшее сокращение числа дней с циклоном ожидается на Кольском полуострове – до 6 дней за сезон к концу XXI века (число дней с циклоном зимой в базовом периоде составляет 25–30).

Размеры циклонов при потеплении климата обнаруживают тенденцию к росту, в первую оче-

редь, в южных регионах и на западе России (на 40–60 км), но, в особенности, на территории Восточной Сибири (на 60–80 км). На Чукотке циклоны станут в среднем больше в диаметре на 100 км и более. Заметное увеличение диаметра циклонов возможно над акваториями морей у тихоокеанского побережья России – там, как показывают модельные расчеты, будет существенно сокращаться ледовый покров, что в зимний период приведет к ослаблению устойчивости атмосферы и созданию более благоприятных условий для интенсификации циклогенеза. В тех же регионах прогнозируется наиболее значительное в регионе увеличение числа дней с циклоном (рис. 3.2.8а, б).

В западном секторе Арктики, наоборот, ожидается некоторое уменьшение среднего диаметра циклона (до 80 км). Приведенные изменения характеристик циклонической активности указывают на возможное уменьшение вклада мезомасштабных барических систем в общую статистику циклонов на юге и рост числа мезоциклонов над акваторией Северного Ледовитого океана. Среди других возможных причин уменьшения среднего размера циклонов в западном секторе Арктики при потеплении климата – смещение в условиях глобального потепления к полюсу областей циклогенеза, в пределах которых преобладают сравнительно небольшие барические системы, находящиеся на начальной стадии жизненного цикла.

3.2.3.3. Атмосферные осадки и речной сток

Изменения средних сезонных осадков, показанные на рис. 3.2.9, свидетельствуют об устойчивой тенденции их роста на всей территории России зимой при потеплении, для всех сценариев и временных рамок прогноза. Анализ модельных расчетов показал, что, согласно наиболее “агрессивному” сценарию RCP8.5, в Сибири возможен полуторакратный рост осадков относительно осадков в базовом периоде. В летний сезон рост средних осадков ожидается на большей части территории России, за исключением южных регионов, где по сценарию RCP8.5 возможно уменьшение осадков до 25% к концу XXI века относительно базового периода. Степень согласованности модельных оценок на рисунке выражена в

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

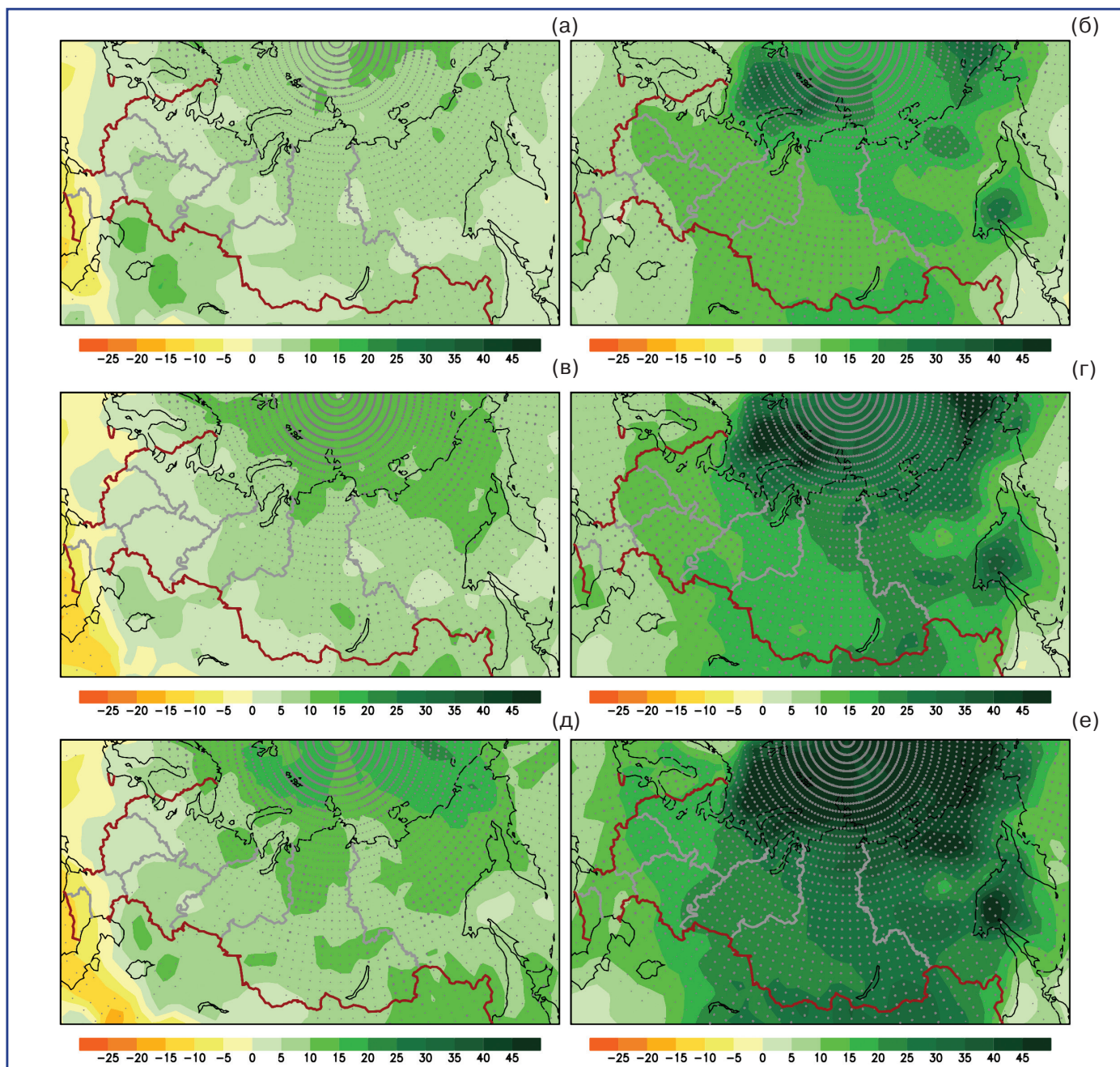


Рис. 3.2.9. Изменения средних сезонных осадков в периоды 2011–2030 (а, б), 2041–2060 (в, г) и 2080–2099 гг. (д, е) по отношению к концу XX века летом (а, в, д) и зимой (б, г, е) по оценкам ансамбля 31 модели СМIP5 и сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5. Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей.

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

В таблице 3.2.5 приведены изменения летних, зимних и среднегодовых осадков в федеральных округах России и межмодельный разброс, полученные по ансамблю 31 модели СМIP5 в административных регионах России за периоды 2011–2030, 2041–2060 и 2080–2099 гг. по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг. с учетом сценариев RCP4.5 и RCP8.5.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Среди характеристик экстремальности гидрологического режима одними из часто используемых в оценках климатических воздействий являются максимальная сумма осадков за пятидневный период и длительность периодов без осадков. Что касается ожидаемых в XXI веке изменений максимальных в году пятидневных сумм осадков (рис. 3.2.10), то на всей территории России они будут возрастать и, если в период 2011–2030 гг. их изменение будет находиться преимущественно в диапазоне 5–10%, то в середине и в конце текущего века рост интенсивных осадков будет превышать 10% относительно их величин в базовом периоде. Наиболее заметный рост ожидается на Тихоокеанском побережье Восточной Сибири, побережьях Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых – в этих регионах уже в краткосрочной перспективе изменения будут превышать порог 20% при удов-

летворительной согласованности модельных оценок. В целом пространственная картина роста максимальных пятидневных сумм осадков удовлетворительно согласуется с пространственным распределением изменений средних сезонных осадков на рис. 3.2.9. Заметим, что в умеренных широтах наибольшая интенсивность осадков приходится на весенне-летний период, так что годовой максимум пятидневных сумм осадков отмечается преимущественно в теплое время года. Как видно из рис. 3.2.9, в Южном Федеральном округе летом прогнозируется уменьшение осадков, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе (аналогичные оценки были получены и в ОД_РФ-1). В то же время, максимальные пятидневные суммы осадков там могут возрастать во все периоды XXI века, что свидетельствует об усилении опасных явлений, связанных с экстремальными осадками

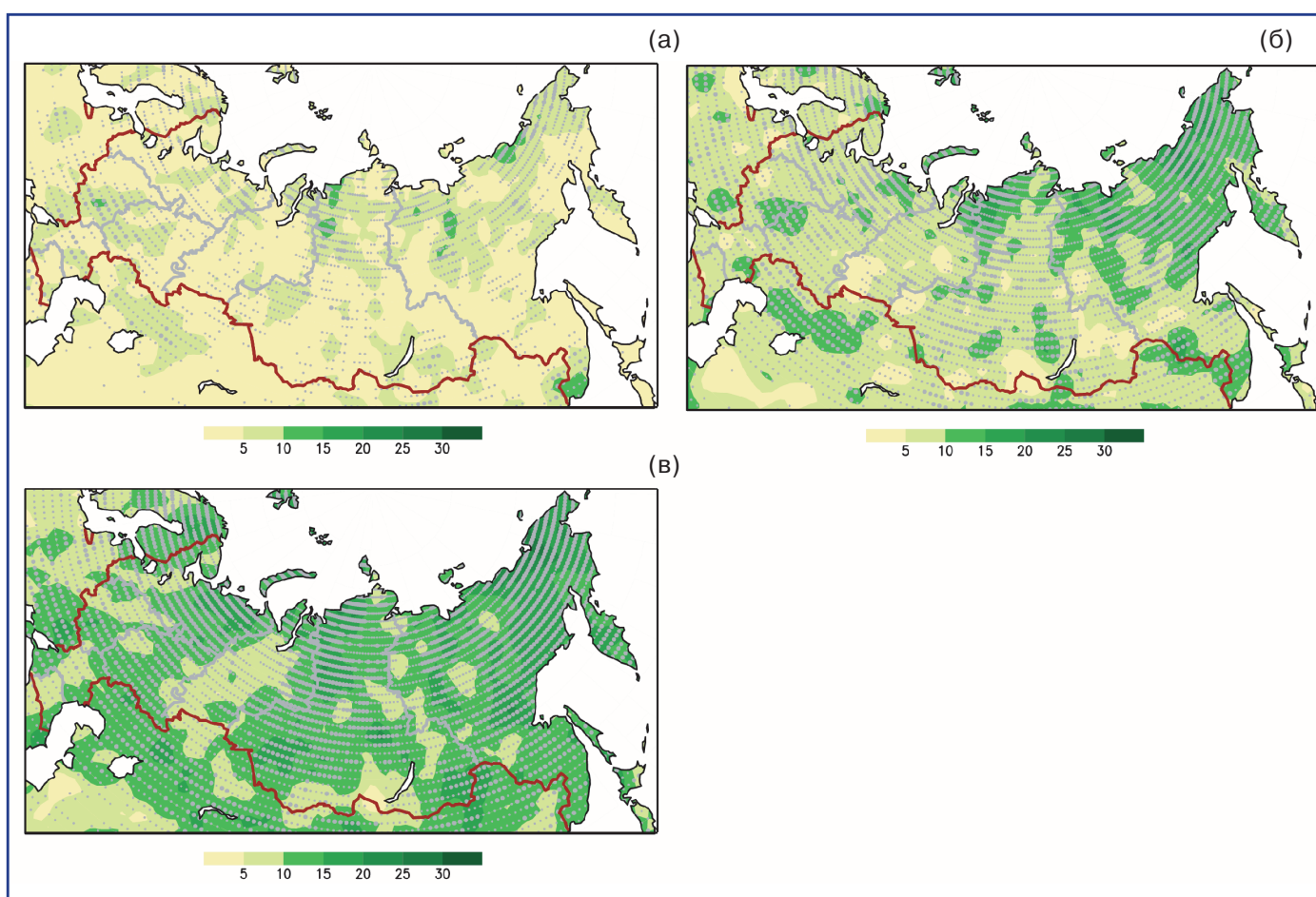


Рис. 3.2.10. Изменения средней за 20 лет максимальной в году суммы осадков за 5 суток (%) в периоды 2011–2030 (а), 2041–2060 (б) и 2080–2099 гг. (в) по оценкам ансамбля 14 моделей CMIP5 согласно сценарию RCP4.5. Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей.

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

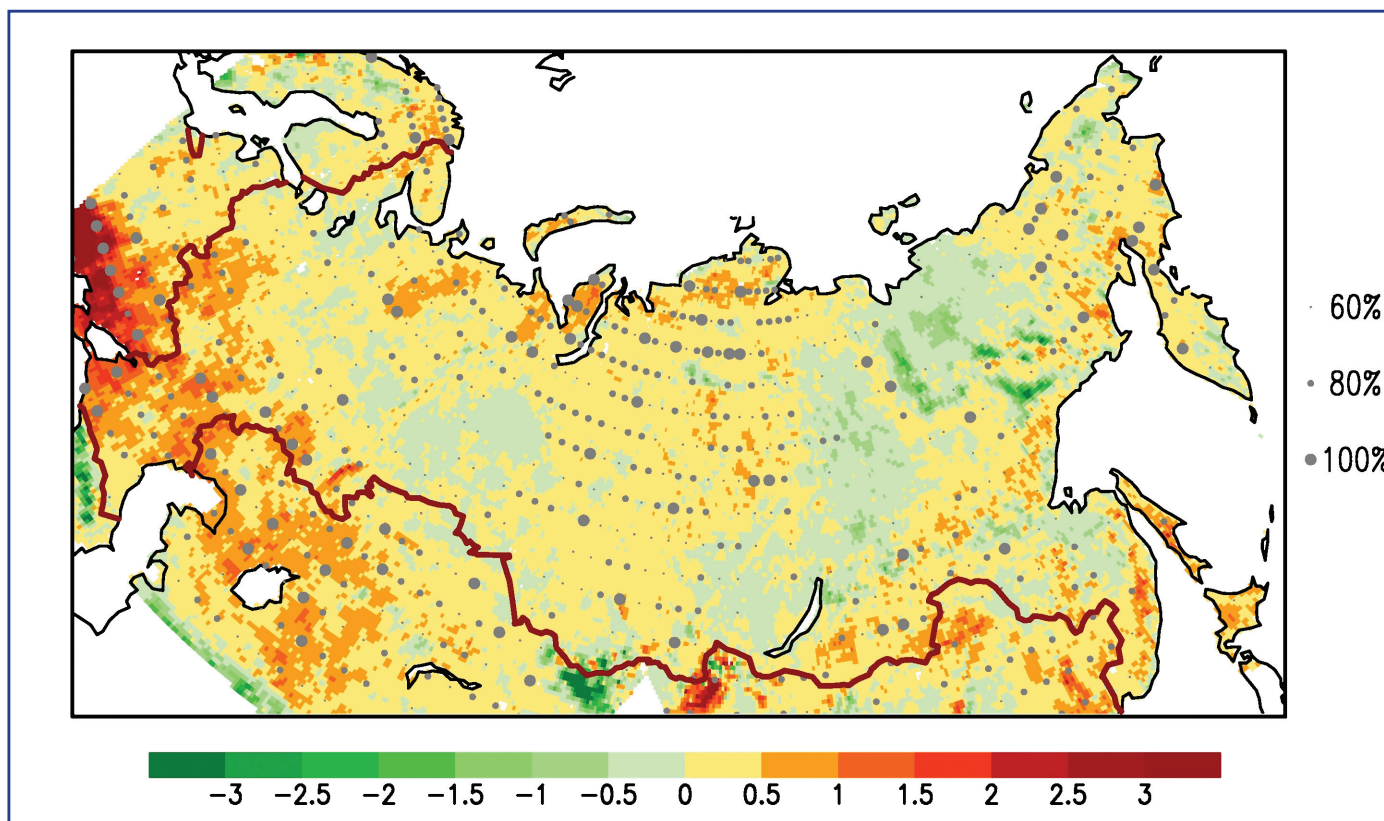


Рис. 3.2.11. Изменение непрерывной длительности периодов (сутки) без осадков летом в период 2041–2060 гг. по отношению к концу XX в. по ансамблю из 5 расчетов региональной модели ГГО. Сценарий SPRES A2, близкий RCP4.5. Точками обозначены регионы, где 60, 80 и 100% от числа членов ансамбля РКМ (соответственно 3, 4 и 5 членов) дает знак изменений, совпадающий со знаком средних по ансамблю изменений.

на фоне уменьшения общей влагообеспеченности южных регионов. Что касается длительности периодов без осадков, то, как показал анализ ансамблевых расчетов СМIP5, ее заметных изменений на территории России в течение XXI века не ожидается: изменения длительности будут находиться на территориях большинства федеральных округов преимущественно в диапазоне ± 1 сутки вплоть до конца века. Заметим, что из-за недостаточного разрешения глобальных моделей СМIP5, полученная по ним картина изменений периодов без осадков (как и ряда других показателей экстремальности, обладающих большой пространственной изменчивостью) может не отражать изменений вклад мезомасштабной атмосферной циркуляции в формирование региональных экстремальных явлений (см. раздел 3.1.5). Для детализации расчетов СМIP5, призванной дать более реалистичное описание амплитуды и пространственной структуры экстремальных явлений (см. раздел 3.1.5), принято использовать региональные

климатические модели (РКМ) высокого разрешения, использующие на границах своих областей результаты расчетов глобальных моделей. Так, рассчитанные по ансамблю РКМ ГГО (шаг сетки 25 км) будущие изменения периодов без осадков в ряде регионов (рис. 3.2.11) могут оказаться уже к середине XXI века в 2–3 раза большими по сравнению с оценками глобальных моделей.

В качестве характеристики стока на территории России использованы средние многолетние значения разности осадков и испарения, рассчитанные по ансамблю из 26 моделей СМIP5. В табл. 3.2.6 приведены прогнозируемые изменения среднего за 20 лет годового стока на речных водосборах, полностью или частично расположенных на территории России. Наряду с водосборами отдельных крупных рек (Волга, Енисей, Лена, Обь и Амур) рассмотрены водосборы Балтийского моря и укрупненные области стока, включающие водосборы рек севера (Мезень, Сев. Двина, Онега и Печора), юга (Днепр, Дон, Днестр и Кубань) и

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Таблица 3.2.6. Средние за год изменения годового стока (%) и межмодельные стандартные отклонения, полученные по ансамблю из 26 модели CMIP5 по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг. по сценариям RCP4.5 и RCP8.5. Жирным шрифтом выделены изменения, которые превышают по абсолютной величине стандартные отклонения (межмодельный разброс).

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

Чукотки (Индигирка, Яна, Колыма, и Анадырь). Из таблицы видно, что на большинстве водосборов изменения стока не превышают модельный разброс. Однако на трех водосборах – это крупные водосборы Лены и Енисея, а также Чукотка – ожидаемые изменения стока превышают ансамблевый разброс, что свидетельствует о большей степени определенности в оценках роста избыточных водных ресурсов в этих районах при потеплении климата по сравнению с другими водосборами. Основной причиной увеличения стока на водосборах является отмеченное выше увеличение зимних осадков (рис. 3.2.9), приводящее, в первую очередь на севере умеренных широт, к большему, по сравнению с базовым периодом, накоплению снега весной.

Полученные оценки изменений стока подтверждают выполненные ранее в рамках ОД_РФ-1 оценки по моделям предыдущего поколения для отмеченных в табл. 3.2.6 водосборов. Оценки в ОД1 базировались на 13 моделях CMIP3 и сценарии SRES A2. Здесь же используются модельные оценки по новым сценариям RCP. Сравнение модельных прогнозов разного поколения показало, что оценки изменений стока по сценарию A2, одному из наиболее “агрессивных” сценариев семейства SRES, занимают промежуточное положение между оценками двух использованных в настоящем Докладе сценариев (RCP4.5 и

RCP8.5). Необходимо добавить, что неопределенность оценок будущих изменений стока на территории России с помощью современных моделей климата несколько возросла по сравнению с оценками CMIP3. Так, если для периода 2080–2099 гг. согласно сценарию SRES A2 практически на всех рассматриваемых водосборах среднее по моделям изменение стока было больше межмодельного разброса, то в ансамбле CMIP5 согласно сценарию более сильного радиационного воздействия (RCP8.5) отношение сигнал/шум превосходит единицу только для трех указанных выше водосборов.

3.2.3.4. Снежный покров суши и многолетняя мерзлота

Расчеты будущих изменений снежного покрова суши (СПС) указывают на сокращение его площади с различной скоростью, в зависимости от рассматриваемого сценария. Скорость сокращения площади снежного покрова до середины XXI века по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 примерно одинакова, во второй половине XXI века сокращение площади СПС происходит практически в два раза быстрее для сценария RCP8.5. Так, по сценарию RCP4.5 сокращение СПС в Северном полушарии к концу века составит для среднегодовой площади $16 \pm 5\%$ по отношению к среднего-

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

довой площади СПС за период 1980–1999 гг., при реализации сценария RCP8.5 среднегодовая площадь СПС сократится на $30 \pm 7\%$. Изменения площади СПС в марте составят $12 \pm 4\%$ и $24 \pm 5\%$, в апреле – $17 \pm 7\%$ и $31 \pm 8\%$ для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно (Павлова и др., 2013). Следует отметить значительный межмодельный разброс в изменениях весенней площади СПС (рис. 3.2.12). Изменения накопленной за зиму массы снега носят более сложный характер, поскольку являются результатом воздействия двух факторов: температуры воздуха и количества осадков в холодный период. Полученный в расчетах CMIP5 рост зимней температуры (см. раздел 3.2.3.1) и связанное с глобальным потеплением увеличение количества зимних осадков (см. раздел 3.2.3.3) приведут к тому, что зимой в холодных регионах, где осадки выпадают в основном в твердой форме, снегонакопление будет увеличиваться. На рис. 3.2.13 показана двух-

вековая (в XX в. и для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 в XXI в.) эволюция массы снега, тающего весной (разность интегральной массы снега на водосборе между мартом и маем, Гт), для водосборов рек Лены, Енисея и Оби. Кривыми представлены средние по ансамблю моделей CMIP5 изменения массы снега по отношению к базовому периоду 1910–1959 гг., интервал изменчивости для которого обозначен двумя фиолетовыми линиями. В этот интервал (при сохранении статистической структуры базового климата) теоретически должны попадать 95% ежегодных значений. Таким образом, если кривая выходит за границы этого интервала, то рассматриваемые изменения в среднем по ансамблю статистически значимы на 5%-м уровне. Серым цветом на рисунке показан разброс модельных оценок – область, в которую попадает 75% средних модельных значений (зона между 12.5 и 87.5 процентилями).

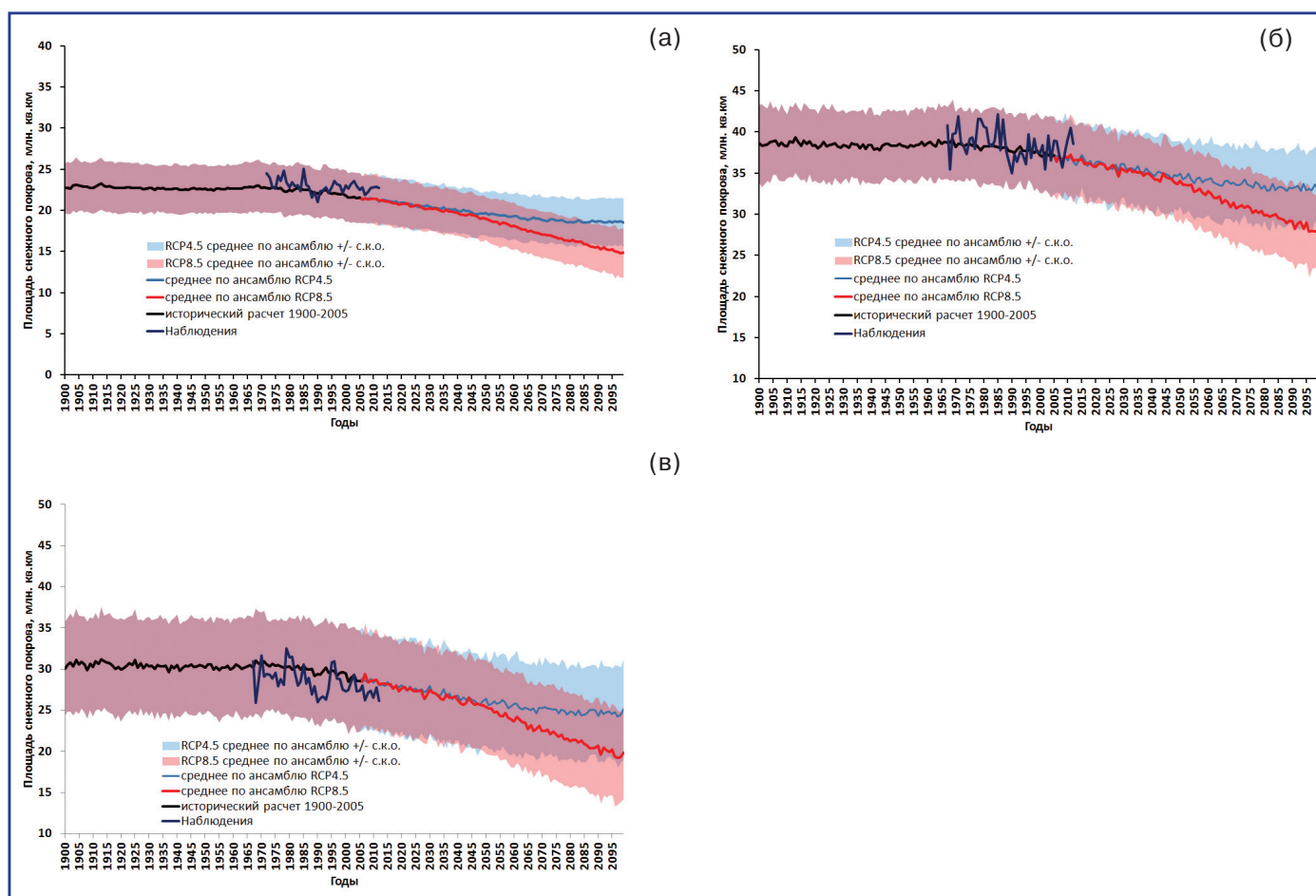


Рис. 3.2.12. Эволюция площади снега (млн км²) в XX–XXI вв. (сценарии RCP4.5 RCP8.5). а) среднегодовая площадь снега; б) площадь снега в марте; в) площадь снега в апреле.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

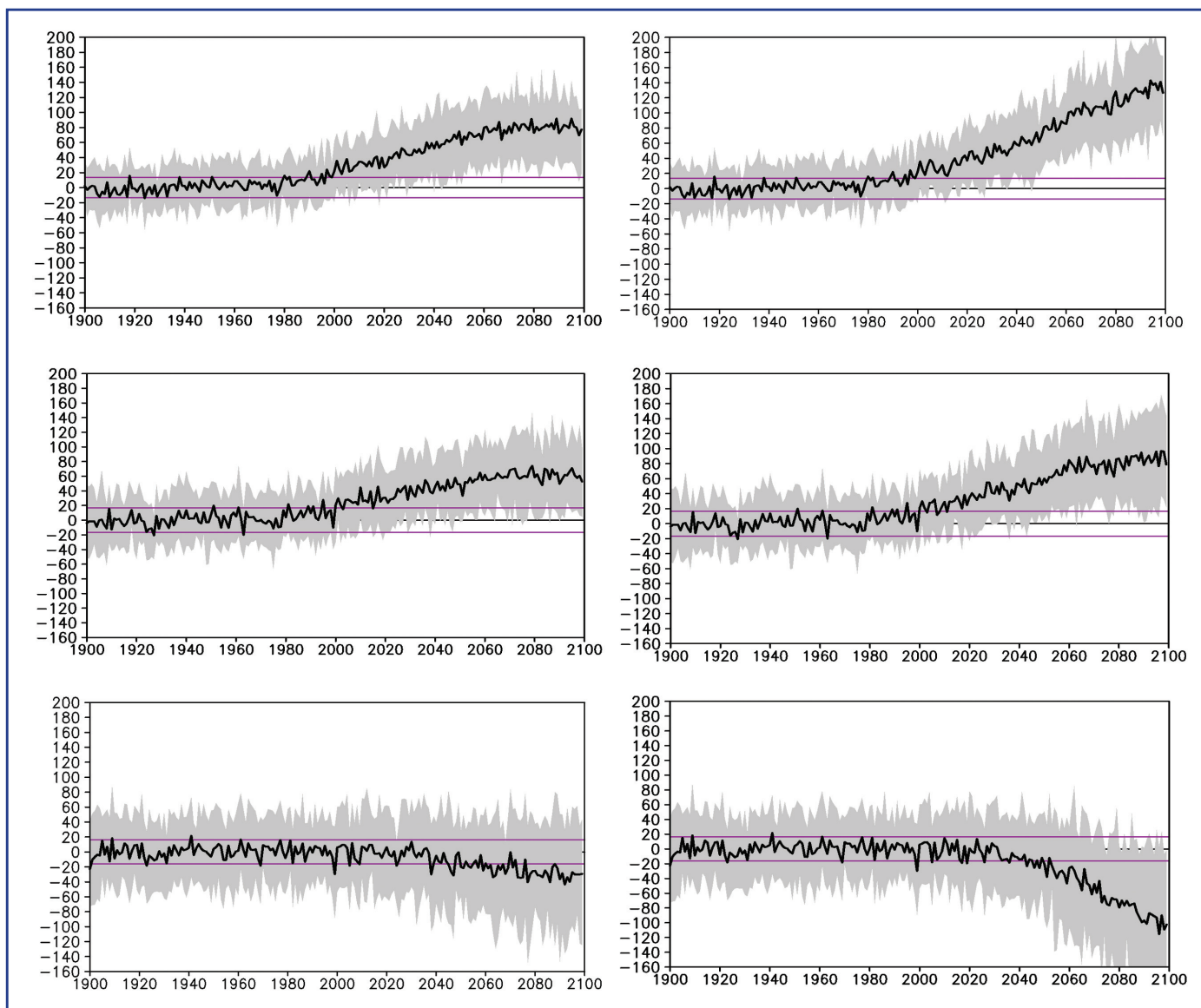


Рис. 3.2.13. Изменение риска весенних паводков на водосборах сибирских рек в XX–XXI вв. по ансамблю моделей СМIP5: разность интегральной массы снега на водосборе между мартом и маем, (Гт) для сценариев RCP4.5 (слева) и RCP8.5 (справа) на водосборах рек Лена (вверху), Енисей (в середине), Обь (внизу).

Как видно из модельных расчетов, на водосборе Лены и в меньшей степени на водосборе Енисея с конца XX века значительно увеличивается масса тающего снега, что способствует возникновению высоких паводков и увеличению риска наводнений. Этого не происходит на водосборе Оби. Подобный результат был получен и в моделях СМIP3 (Kattsov et al., 2008).

Как уже было отмечено выше в разделе 3.1.4.4, анализ современного состояния и эволюции площади многолетней мерзлоты, полученных непосредственно по модельным данным о температуре почвы, затруднителен в связи с тем, что в климатических моделях для описания процессов

на поверхности и в глубине почвы используются сильно различающиеся (как по числу уровней и глубине почвы, так и по физическим процессам) почвенные модели.

Расчеты эволюции площади многолетней мерзлоты и термического состояния грунтов в XXI веке, выполненные с помощью модели теплопереноса в грунтах, разработанной в ГГО (Malevsky-Malevich et al., 2001; Малевский-Малевич и др., 2005), включали в качестве входной информации данные о температуре поверхности и высоте снежного покрова, полученные в расчетах с 28 моделями СМIP5. Расчеты показали, что положение условной границы зоны многолетней мерзлоты (рис.

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

3.2.14) зависит от выбранного сценария радиационного воздействия, преимущественно, для конца XXI века. К концу века, в случае реализации сценария RCP8.5, граница зоны значительно смещается к северу, более того, практически не остается таких ячеек модельной сетки, в которых мерзлота была бы получена во всех моделях. Площадь, занятая приповерхностной многолетней мерзлотой на территории РФ, сократится к середине XXI века по сравнению с базовым периодом на $20 \pm 7\%$ при сценарии RCP4.5 и на $25 \pm 8\%$ при сценарии RCP8.5, в конце XXI века сокращение составит $31 \pm 12\%$ и $56 \pm 18\%$ для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно, в Северном полушарии сокращение к середине XXI века составит $24 \pm 7\%$ и $30 \pm 8\%$, в конце XXI века – $34 \pm 11\%$ и

$60 \pm 14\%$ для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно (Павлова и др., 2013). Относительное уменьшение площади приповерхностной многолетней мерзлоты в Северном полушарии к концу XXI века, рассчитанное непосредственно по оценкам 18 моделей CMIP5 для сценариев RCP4.5 и RCP8.5, составило 15–87% и 30–99% соответственно (Koven et al., 2013). Расчеты почвенно-мерзлотного индекса для конца XXI века показывают, что при реализации сценария RCP4.5 сохранение приповерхностной мерзлоты в границах современной зоны прерывистой мерзлоты маловероятно, а при реализации сценария RCP8.5 условия, благоприятные для существования многолетней мерзлоты, сохранятся на территории России только в Арктике и на Восточно-Сибирском нагорье (Slater,

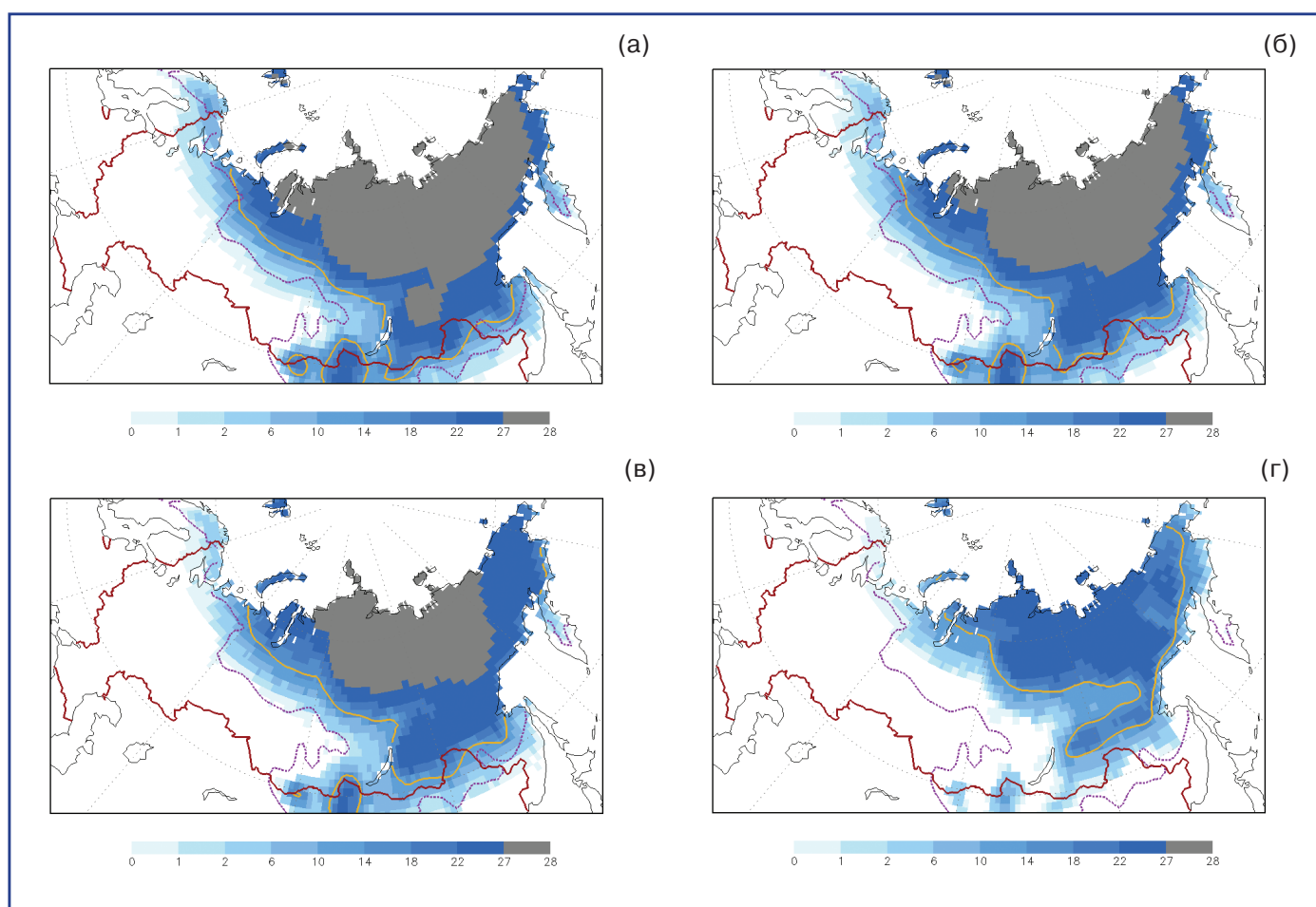


Рис. 3.2.14. Площадь, занятая мерзлотой в верхнем (3.3 м) слое почвы для середины и конца XXI века по данным расчетов на базе 28 климатических моделей по двум сценариям RCP4.5 (а, в) и RCP8.5 (б, г). В каждой ячейке сетки $1^\circ \times 1^\circ$ различными цветами показано количество моделей, в которых для этой ячейки осредненная за период 2041–2060 (а, б) и 2080–2099 гг. (в, г) среднегодовая температура грунта на глубине 3.3 м не превышает 0°C . Желтая линия показывает условную расчетную границу зоны многолетней мерзлоты, определяемую по положению среднегодовой изотермы 0°C на глубине 3.3 м, полученной по ансамблю моделей, фиолетовая линия – современная наблюдаемая граница многолетней мерзлоты (Brown et al., 1997; 1998).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Lawrence, 2013). Качественно этот результат согласуется с результатом, полученным в описанных выше расчетах с моделью теплопереноса в грунтах ГГО, поскольку именно в указанных областях большинство расчетов показывают наличие мерзлоты в верхнем слое грунта.

3.2.3.5 Морской лед в Арктике

Модели CMIP5 так же, как и модели CMIP3, расчеты которых лежали в основе ОД1, однозначно указывают на сокращение площади морского льда в Арктике на протяжении XXI века. По сравнению с CMIP3, в среднем по ансамблю CMIP5 скорость сокращения площади льда в Северном полушарии летом в XXI веке возросла, что позволило ряду исследователей (Stroeve et al., 2012; Wang, Overland, 2012) говорить о возможности исчезновения многолетнего льда в Арктике уже в первой половине этого века, тогда как в ансамбле CMIP3 лишь несколько моделей давали исчезновение морского льда в Арктике в конце XXI в. для одного из “агрессивных” сценариев SRES – A2. Интенсивность сокращения площади льда зависит от сценария радиационного воздей-

ствия. Наиболее значительное сокращение площади льда, особенно в теплый период, отмечается для сценария RCP8.5 (рис. 3.2.15). Для относительно “мягкого” сценария RCP2.6 площадь морского льда в Арктике практически стабилизируется, хотя и для этого сценария некоторые модели дают превращение ледяного покрова Северного Ледовитого океана в сезонный – начиная с середины XXI века. Используя в качестве ориентировочного критерия освобождения Арктики от многолетнего морского льда в теплый период величину площади льда 1 млн км², можно в первом приближении оценить перспективу “безледного” океана для трех рассматриваемых сценариев (рис. 3.2.16). К концу XXI века в Арктике площадь льда в годовом минимуме (сентябрь) становится меньше 1 млн км² по оценкам большинства моделей CMIP5 для сценария RCP8.5 и по оценкам менее половины моделей при условии реализации сценария RCP4.5; при сценарии RCP2.6 менее трети моделей дают сентябрьскую площадь льда ниже указанного порогового значения (Павлова, Катцов, 2013).

Следует отметить, что речь идет не о полном исчезновении морского льда в Северном Ледови-

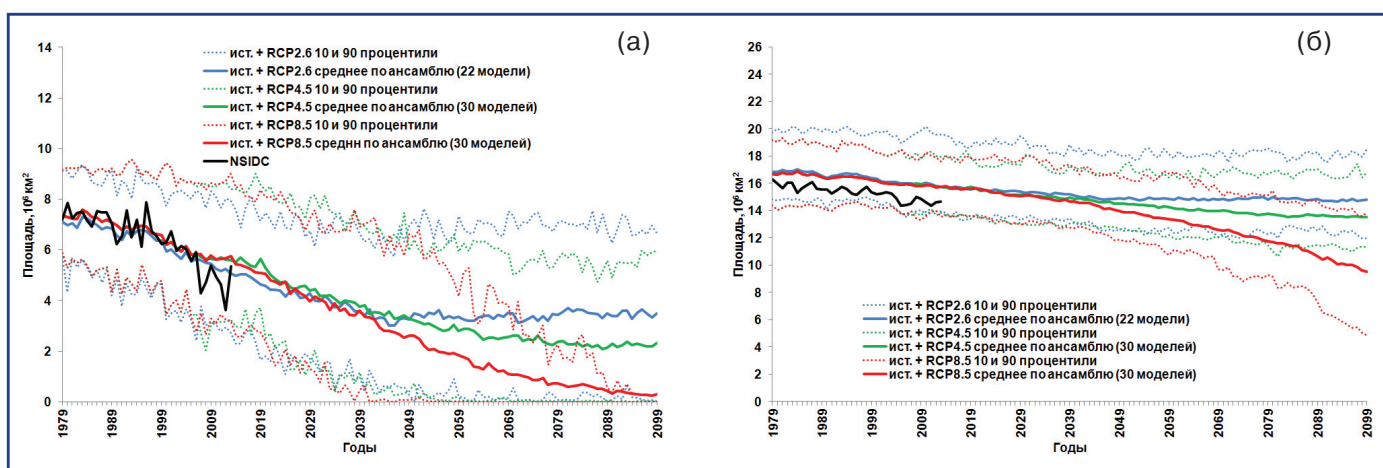


Рис. 3.2.15. Эволюция площади морского льда в период 1979–2099 гг. в Северном полушарии в сентябре (а) и феврале (б) по данным моделей CMIP5 для трех сценариев RCP: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 (голубая, зеленая и красная сплошные линии, соответственно), а также межмодельный разброс в пределах 10-й и 90-й перцентилей (голубая, зеленая и красная пунктирные линии, соответственно). Для периода 1979–2005 гг. в каждом ансамбле сценарному расчету предшествует ретроспективный (“ист.”) расчет*. Для периода 1979–2012 гг. приводится наблюдаемая площадь льда, по данным NSIDC (Fetterer et al., 2002) (черная линия).

* Несовпадение ансамблей в период 1979–2005 гг. как в средних значениях, так и в границах межпроцентильного разброса объясняется различием количества членов ансамблей. Это несовпадение в известной мере характеризует зависимость полученных в настоящем исследовании результатов от количества членов рассматриваемых ансамблей моделей.

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

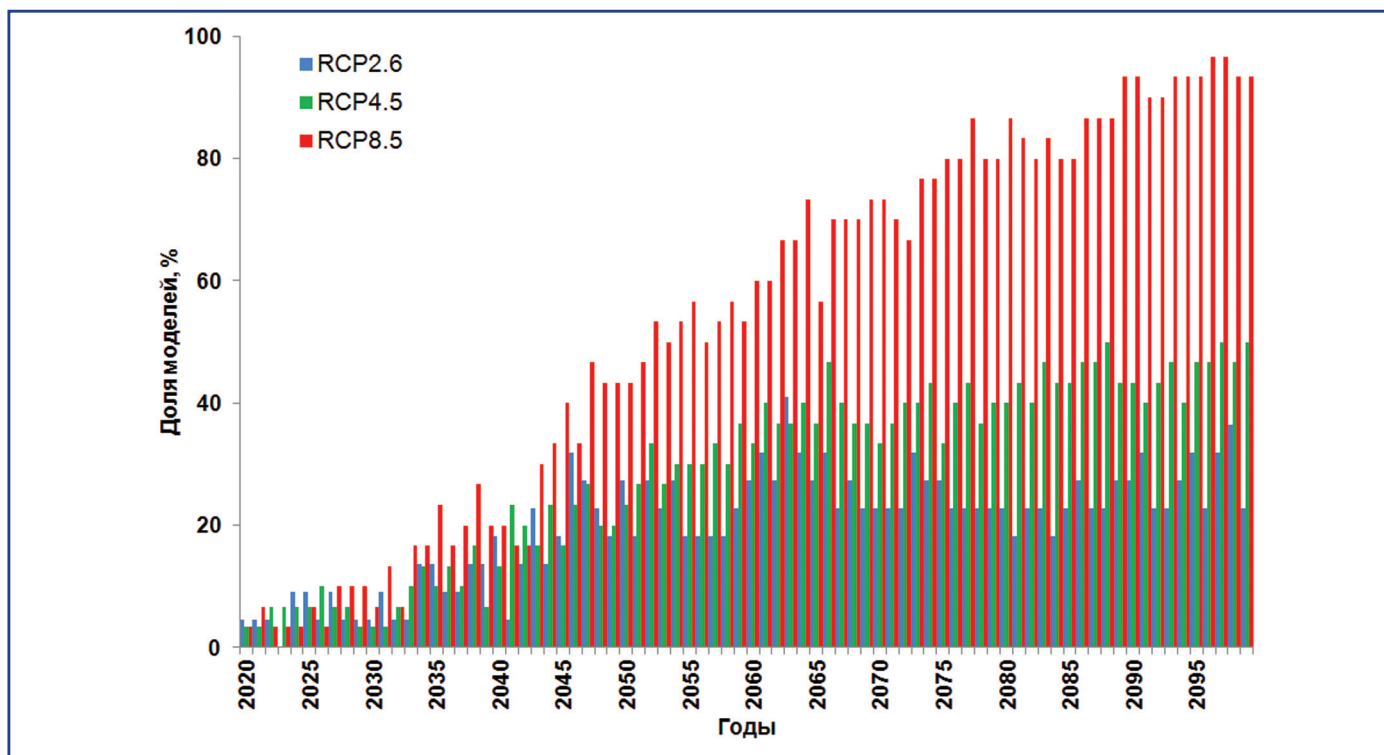


Рис. 3.2.16. Доля моделей (в процентах от общего числа моделей в ансамбле) CMIP5, в которых площадь морского льда в Северном полушарии в сентябре в период 2020–2099 гг. сократилась до 1 млн км² и менее, по данным 22 моделей для сценария RCP2.6 (синие столбцы), 30 моделей для сценария RCP4.5 (зеленые столбцы) и 30 моделей RCP8.5 (красные столбцы).

том океане, а лишь о превращении многолетнего ледяного покрова океана в сезонный. Сокращение зимней площади морского льда в Арктике в XXI веке не столь велико. Межмодельный разброс оценок площади льда в моделях CMIP5 остается, как и по оценкам CMIP3, весьма значительным. Он обусловлен как собственной изменчивостью климатической системы, так и систематическими погрешностями отдельно взятых моделей. В научном сообществе предпринимаются попытки уточнить оценки будущих изменений климата и, в частности, изменений ледяного покрова Мирового океана с помощью дискриминации климатических моделей, формирующих ансамбль. Однако консенсус в отношении пригодных для этого подходов и критериев в настоящее время отсутствует.

3.2.4. Заключение

Изменения характеристик климата на территории России, полученные по ансамблю наиболее продвинутых сейчас климатических моделей, ка-

чественно согласуются с оценками моделей предыдущего поколения. Небольшие количественные различия между оценками моделей из ансамблей разного поколения обусловлены, преимущественно, расхождениями между сценариями SRES и пришедшими им на смену новыми сценариями RCP. В то же время, с новыми моделями климата сделан значительный шаг в направлении оценки неопределенностей будущих изменений климатических характеристик. Это стало возможным благодаря тому, что в проекте CMIP5 представлено большее, чем в CMIP3, число моделей, включающих более детальное описание климатообразующих процессов (см. раздел 3.1). Непротиворечивая картина эволюции климата России, полученная в рамках двух последовательных оценочных докладов Росгидромета по двум разным поколениям климатических моделей и разным сценариям, в целом свидетельствует о преемственности подходов к моделированию климата, выработанных за последние 30 лет, и неизменности научных представлений о роли антропогенного вклада в глобальное потепление.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Влияние глобального потепления на климат России будет выражаться, главным образом, в формировании в большинстве федеральных округов более мягкого и влажного климата по сравнению с последними десятилетиями. Смягчение зимнего термического режима и рост осадков в традиционно “холодных” районах страны (северный Урал, Центральная и Восточная Сибирь) повлекут за собой увеличение весеннего снеговозраста и, как следствие, осложнят паводковую обстановку на крупнейших реках России в период снеготаяния. При сохранении глобальных тенденций, все большее число регионов расположенных на юге умеренных широт начнут подвергаться засухам и будут страдать от экстремально высоких температур в летний период. Если до конца XXI века такие условия могут коснуться лишь сравнительно небольших по площади территорий на юге России, включая северный Кавказ и юг Сибири, то на рубеже текущего и следующего веков засушливость климата может создать целую серию новых угроз развитию многих регионов страны.

3.2.5. Литература

- Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2012.** Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск, ФБГУ “ВНИГМИ-МЦД”, 194 с.
- Кароль И. Л., 1988.** Введение в динамику климата Земли. Л., Гидрометеиздат, 224 с.
- Катцов В. М., Говоркова В. А., 2013.** Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5), Труды ГГО, вып. 569, с. 76–98.
- Малевский-Малевич С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Павлова Т. В., 2005.** Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород, Криосфера Земли, т. IX, № 3, с. 36–44.
- ОД_РФ-1, 2008.** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, т. 1. Изменения климата. М., Росгидромет, 225 с.

Павлова Т. В., Катцов В. М., 2013. Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5, Труды ГГО, вып. 568, с. 7–25.

Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013. Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений, Труды ГГО, вып. 569, с. 38–61.

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

Bengtsson L., Hodges K. I., Keenlyside N., 2009. Will extratropical storms intensify in a warmer climate, *Journal of Climate*, vol. 22, pp. 2276–2301.

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

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

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

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

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

3.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

- Kattsov V., Govorkova V., Pavlova T., Sporyshev P., 2008.** Arctic river runoff in the context of global warming – Projections with the state-of-the-art-global climate models, WCRP/SCAR/IASC/Climate and Cryosphere Newsletter, Ice and Climate News, no. 11. pp. 8–10.
- Koven C. D., Riley W. J., Stern A., 2013.** Analysis of Permafrost Thermal Dynamics and Response to Climate Change in the CMIP5 Earth System Models, *Journal of Climate*, vol. 26, pp. 1877–1900. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00228.1>.
- Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., Shklyarevich O. B., 2001.** Numerical simulation of permafrost parameters distribution, *Cold Regions Sci. and Technol.*, no. 32, pp. 1–11.
- Meinshausen M., Smith S. J., Calvin K. V., Daniel J. S., Kainuma M. L. T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S. A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A. M., Velders G. J. M., van Vuuren D., 2011.** The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their Extension from 1765 to 2300, *Climatic Change (Special Issue)*, vol. 109, pp. 213–241. doi:10.1007/s10584-011-0156-z.
- Pinto J. G., Ulbrich U., Leckebusch C., Spanghel T., Meyers M., Zacharias S., 2007.** Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM, *Clim. Dyn.* vol. 29, pp. 195–210, doi:10.1007/s00382-007-0230-4.
- Randalls S., 2010.** History of the 2 degrees C climate target. *Wiley Interdisciplinary Reviews, Climate Change*, vol. 1 no. 4, pp. 598–605. doi:10.1002/wcc.62.
- Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R., 2012.** Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates, *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 248–253.
- Sillmann J., Kharin V. V., Zhang X., Zwiers F. W., Bronaugh D., 2013.** Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 1716–1733, doi:10.1002/jgrd.50203.
- Slater A. G., Lawrence D. M., 2013.** Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models, *Journal of Climate*, vol. 26, pp. 5608–5623, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00341.1>
- Stroeve J. C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W. N., 2012.** Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L16502, doi:10.1029/2012GL052676.
- Van Vuuren D., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S.K., 2011.** The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, vol. 109, pp. 5–31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Wang M., Overland J. E., 2012.** Summer Arctic sea ice will be gone sooner or later – an update from CMIP5 models, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L18501, doi:10.1029/2012GL052868.
- Wild M., 2009.** Global dimming and brightening: A review, *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.