

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 551.51.515,551.583.16,551.588

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ БАССЕЙНОВ КРУПНЕЙШИХ РЕК СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В XX–XXI ВВ.<sup>1</sup>

© 2012 г. В. Ч. Хон, И. И. Мохов

*Институт физики атмосферы Российской академии наук  
119017 Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 19.10.2010 г.

Выполнена оценка способности современных моделей климата воспроизводить среднегодовой режим речного стока и его внутригодовое распределение для крупнейших водосборов Евразии включая бассейны Волги и Амура, а также крупнейших сибирских рек: Оби, Енисея и Лены. Представлены оценки возможных изменений сезонного стока и характеристик ежедневных осадков (количества, интенсивности и вероятности) на водосборах для конца XXI в. Для анализа использовались результаты расчетов с климатическими моделями общей циркуляции, проведенных в рамках международного проекта сравнения Coupled Model Intercomparison Project.

*Ключевые слова:* речной сток, осадки, изменения климата, глобальные модели климата.

Данные наблюдений показывают, что для большинства крупных речных бассейнов сток в течение последнего тридцатилетия был выше среднего многолетнего значения [7]. В том числе отмечен заметный тренд увеличения стока крупнейших рек, впадающих в Северный Ледовитый океан [16, 19]. В частности, выявлено значительное увеличение годового стока Енисея в последнее десятилетие XX в. [9]. При этом отмечено существенное уменьшение стока для верхней части бассейна Оби.

Для оценок возможных гидрологических изменений в будущем, связанных с естественными и антропогенными причинами, используются глобальные модели климата, в том числе наиболее детальные климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана с описанием динамики морского льда и процессов в деятельном слое суши с учетом биосферных эффектов. Согласно результатам численных экспериментов при глобальном потеплении в XXI в. следует ожидать дальнейшего увеличения стока сибирских рек [1, 4–6, 8, 12] и усиления тенденции экстремальности осадков над многими регионами [2, 3, 13, 21, 22].

Исследования гидрологического режима на водосборах крупнейших рек северной Евразии [1, 4–6] показали способность глобальных климатических моделей адекватно воспроизводить среднегодовой режим речного стока, оцениваемый разностью между осадками ( $P$ ) и испарением ( $E$ ) на водосборе. Однако оценка стока  $P-E$  не вос-

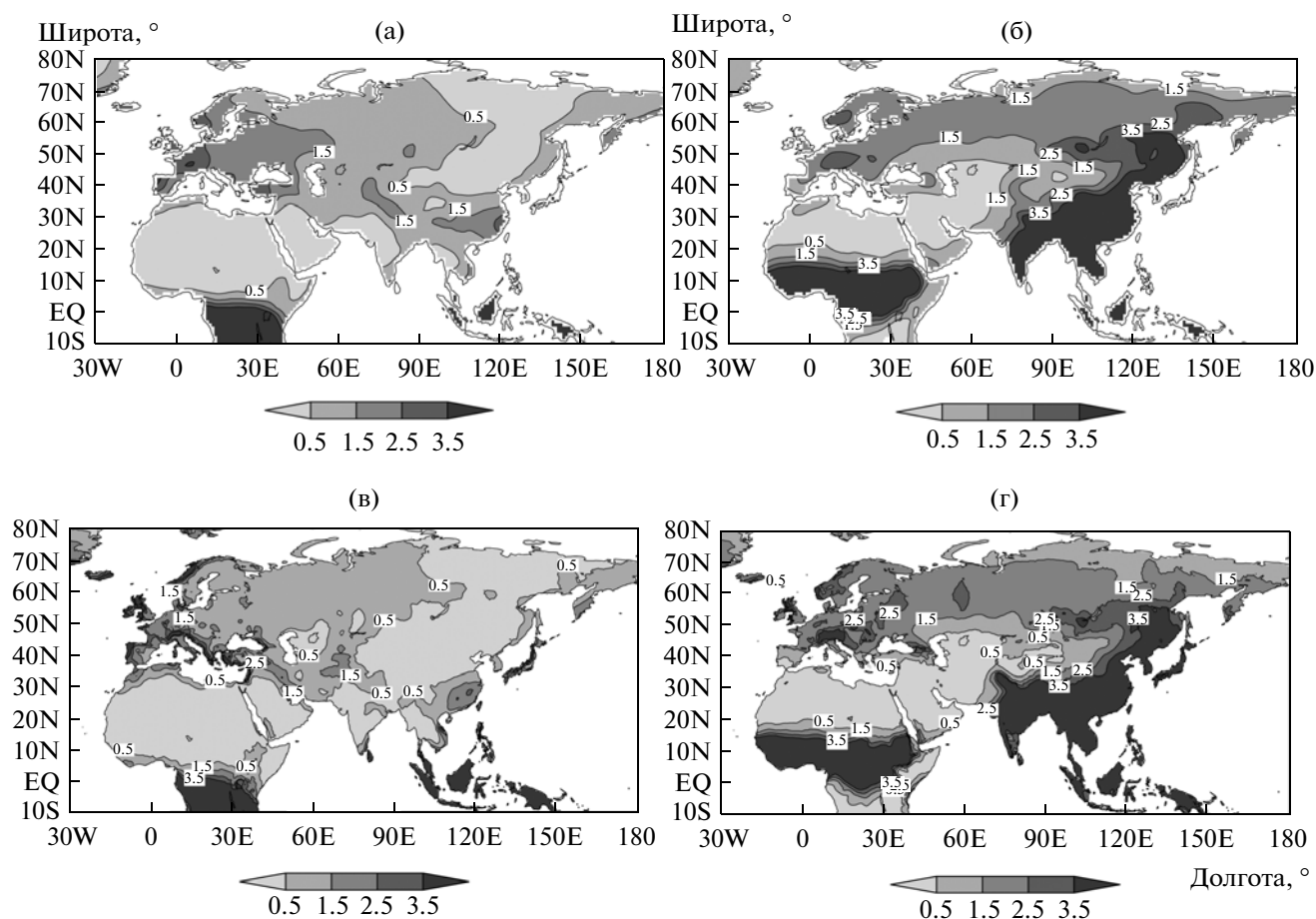
производит сезонные особенности внутригодового распределения стока, связанные с процессами снегонакопления и снеготаяния на водосборе. В данной работе выполнена оценка способности глобальных климатических моделей воспроизводить не только среднегодовой режим стока, но и его внутригодовое распределение. С использованием ансамбля климатических моделей выполнены оценки возможных изменений сезонного стока, а также характеристик ежедневных осадков (количества, интенсивности и вероятности) на крупнейших водосборах Северной Евразии в XXI в.

#### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа использовались результаты расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей, участвующих в программе сравнения Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) [14]. Расчеты с этими моделями использовались при подготовке 4-го Оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по оценке климатических изменений (IPCC) [11]. Дополнительно была включена в анализ недавно разработанная глобальная климатическая модель общей циркуляции Kiel Climate Model (KCM) [18], которая также демонстрирует хорошее соответствие данным наблюдений. Для оценки возможных изменений гидрологических характеристик в XXI в. использовался умеренный сценарий антропогенного воздействия SRES-A1B.

Были использованы поля среднемесячных значений осадков и речного стока для периода 1900–2099 гг. Акцент сделан на исследовании гидроло-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (Госконтракт 14.740.11.1043) и программы РАН (ОНЗ № 11).



**Рис. 1.** Пространственное распределение среднего количества зимних (а, в) и летних (б, г) осадков, мм/сут, в северной Евразии по данным метеонаблюдений CRU (а, б) и мультимодельным расчетам (в, г) для 30-летнего периода 1961–1990 гг.

гического режима крупнейших рек Северной Евразии: Волги, Амура, Оби, Енисея и Лены. Для сравнительного анализа поля осадков и речного стока были предварительно интерполированы на географическую сетку с разрешением  $1 \times 1$ . Для осреднения по речным водосборам использовалась маска водосборов на аналогичной сетке [16, 19]. Для сопоставления с модельными результатами использовалась база данных Global Runoff Data Centre (GRDC) [10] стационарных наблюдений за стоком Волги (1879–2002), Оби (1930–2003), Енисея (1936–2003), Лены (1935–2003) и Амура (1932–2004 гг.), а также данные по осадкам Climatic Research Union (CRU) Университета Восточной Англии [15]. Помимо анализа речного стока, были рассчитаны характеристики ежедневных осадков, такие как среднее количество осадков  $P$ , их интенсивность  $I$  и вероятность дождливых дней  $F$ , связанные соотношением:  $P = FI$  [3, 13, 21].

#### ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ РЕЧНОГО СТОКА И ОСАДКОВ НА ВОДОСБОРЕ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

В данном разделе оценена способность климатических моделей воспроизводить современный среднегодовой режим речного стока, а также его внутригодовое распределение. На рис. 1 приведены распределения среднего количества зимних и летних осадков по данным наблюдений CRU в сопоставлении с мульти-модельными расчетами для базового 30-летнего периода 1961–1990 гг. В целом модельные расчеты реалистично воспроизводят климатологические особенности пространственного распределения сезонных осадков в различных регионах, в частности в бассейнах российских рек. На рис. 2 представлены среднегодовые значения стока Волги, Оби, Енисея, Лены и Амура, полученные по модельным расчетам в сопоставлении с данными наблюдений за 1961–1990 гг. Анализируемые модели (за исключением модели INM3.0 для водосборов Волги и Оби) адекватно

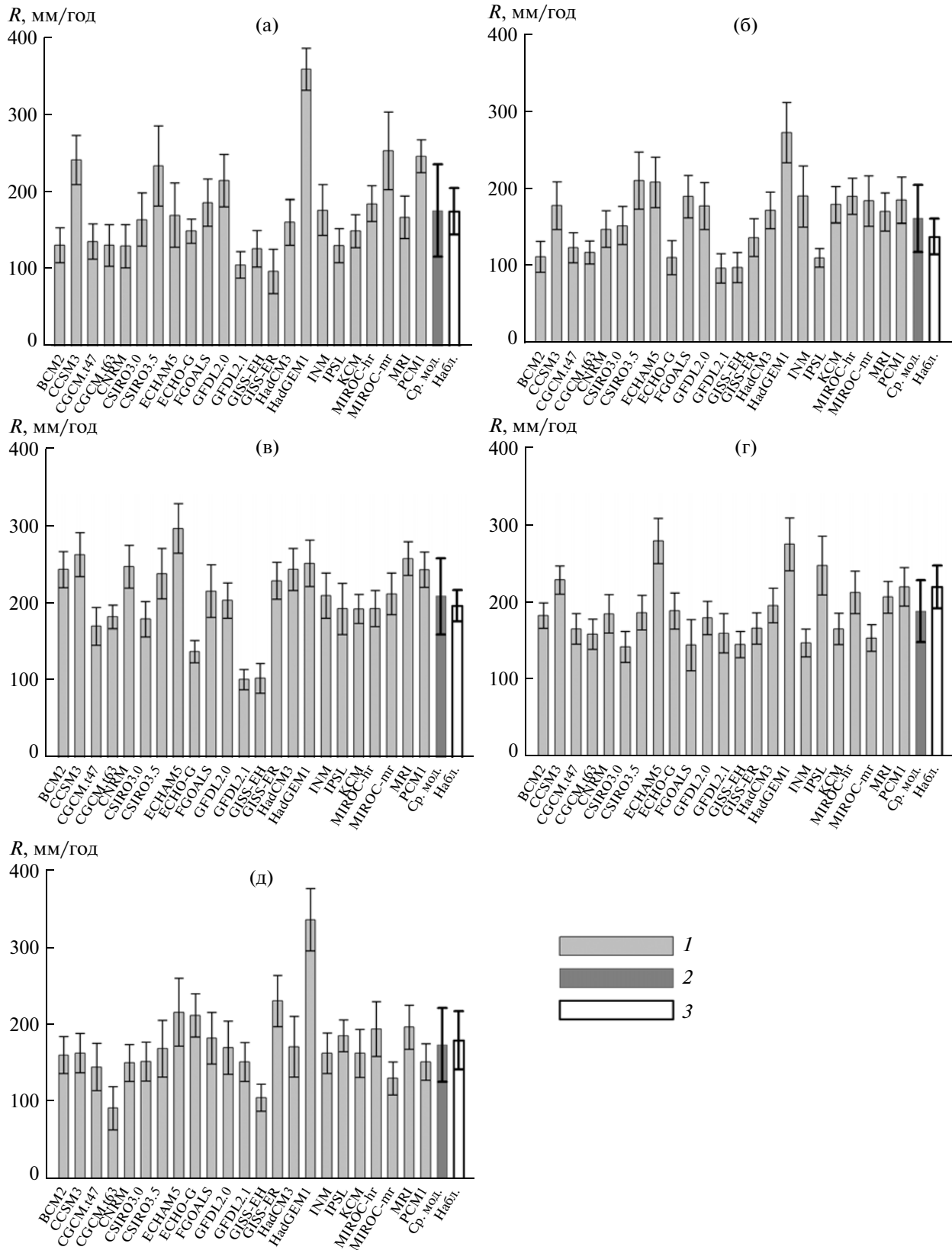


Рис. 2. Среднегодовой сток Волги (а), Оби (б), Енисея (в), Лены (г) и Амура (д). 1 – расчет с ансамблем моделей, 2 – среднее по ансамблю моделей, 3 – данные наблюдений для 1961–1990 гг. (здесь и на рис. 5 вертикальные линии – соответствующие средноквадратические отклонения речного стока по модельным расчетам).

Анализируемые модели (x – модели, использованные для анализа ежедневных осадков; прочерк – неиспользованные модели)

Модель	Страна	Разрешение атмосфера/океан	Сезонный сток*	Ежедневные осадки
BCM2	Норвегия	T63L31/0.5–1.5° × 1.5°L35	V, O, Y, L, A	x
CCSM3	США	T85L26/0.3–1° × 1°L40	V, O	x
CGCM3-T47	Канада	T47L31/1.9° × 1.9°L29	V	x
CGCM3-T63	»	T63L31/0.9° × 1.4°L29	V	x
CNRM	Франция	T63L45/0.5–2° × 2°L31	O	x
CSIRO3.0	Австралия	T63L18/0.8° × 1.9°L31	L	x
CSIRO3.5	»	T63L18/0.8° × 1.9°L31	O, L	x
ECHAM5/MPI-OM	Германия	T63L31/1.5° × 1.5°L40	O	x
ECHO-G	Германия/Корея	T30L19/0.5–2.8° × 2.8°L20	V, O	x
FGOALS	Китай	T42L26/360° × 180°		x
GFDL2.0	США	2.0° × 2.5°L24/0.3–1° × 1°L50		x
GFDL2.1	»	2.0° × 2.5°L24/0.3–1° × 1°L50		x
GISS-AOM	»	3° × 4°L12/3° × 4°L16		x
GISS-ER	»	4° × 5°L20/4° × 5°L13		x
GISS-EH	»	4° × 5°L20/4° × 5°L13	O	
HADCM3	Великобритания	2.5° × 3.8°L19/1.5° × 1.5°L20		—
HADGEM1	»	~1.3° × 1.9°L38/0.3–1.0° × 1.0°L40	O	—
INM3.0	Россия	4° × 5°L21/2° × 2.5°L33	V, O	x
IPSL	Франция	2.5° × 3.75°L19/1–2° × 2°L31	O	x
KCM	Германия	T31L19/0.5–2° × 2°L31		x
MIROC-HR	Япония	T106L56/0.2° × 0.3°L47	O	x
MIROC-MR	»	T42L20/0.5–1.4° × 1.4°L43	V, O	x
MRI	»	T42L30/0.5–2.0° × 2.5°L23		—
PCM1	США	T42L18	Y, L, A	x

\* – модели, исключенные из анализа сезонного стока с водосборов Волги (V), Оби (O), Енисея (Y), Лены (L), Амура (A).

воспроизводят среднегодовой режим речного стока для крупнейших водосборов северной Евразии. Средние по ансамблю моделей значения стока Волги, Амура, Оби, Енисея и Лены достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений (рис. 2).

На рис. 3 приведен годовой ход стока Волги, Оби, Енисея, Лены и Амура по мультимодельному расчету в сопоставлении с данными наблюдений. Модели со значительными отклонениями величин сезонного максимума стока от наблюдаемого внутригодового распределения были исключены из анализа (таблица). При существенном разбросе

оценок модели в среднем качественно воспроизводят основные фазы внутригодового распределения речного стока для анализируемых водосборов. При этом для модельных расчетов сезонный максимум стока (рассчитанного как среднее по водосбору) наступает примерно на 1 мес. (для Оби ~2 мес.) раньше, чем по данным стационарных наблюдений в устьевых областях рек, что можно объяснить отсутствием в климатических моделях блока расчета стекания воды в речном бассейне. В частности, наибольшее расхождение, полученное для бассейна Оби, связано с тем, что значительная доля площади этого бассейна представляет собой

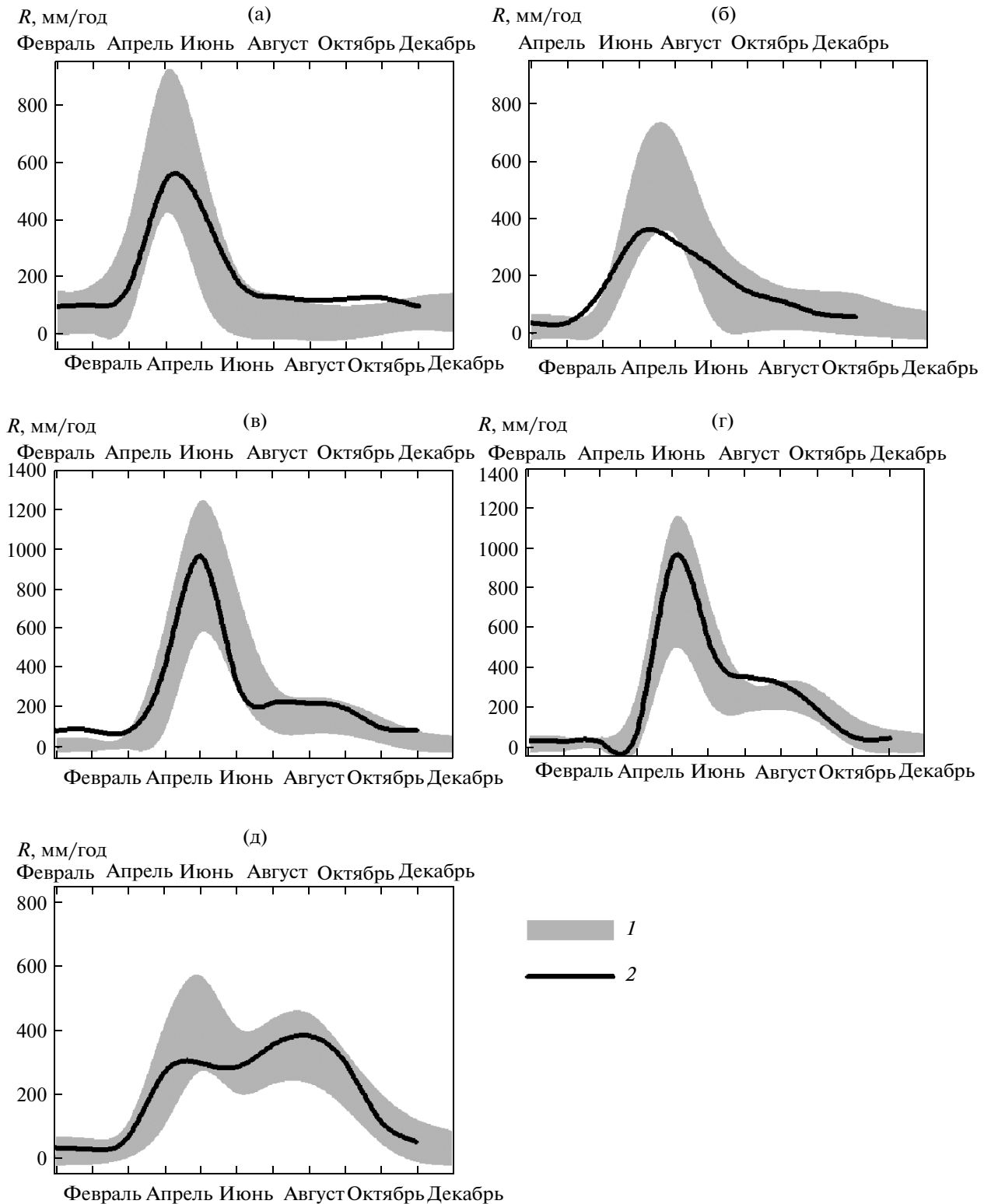
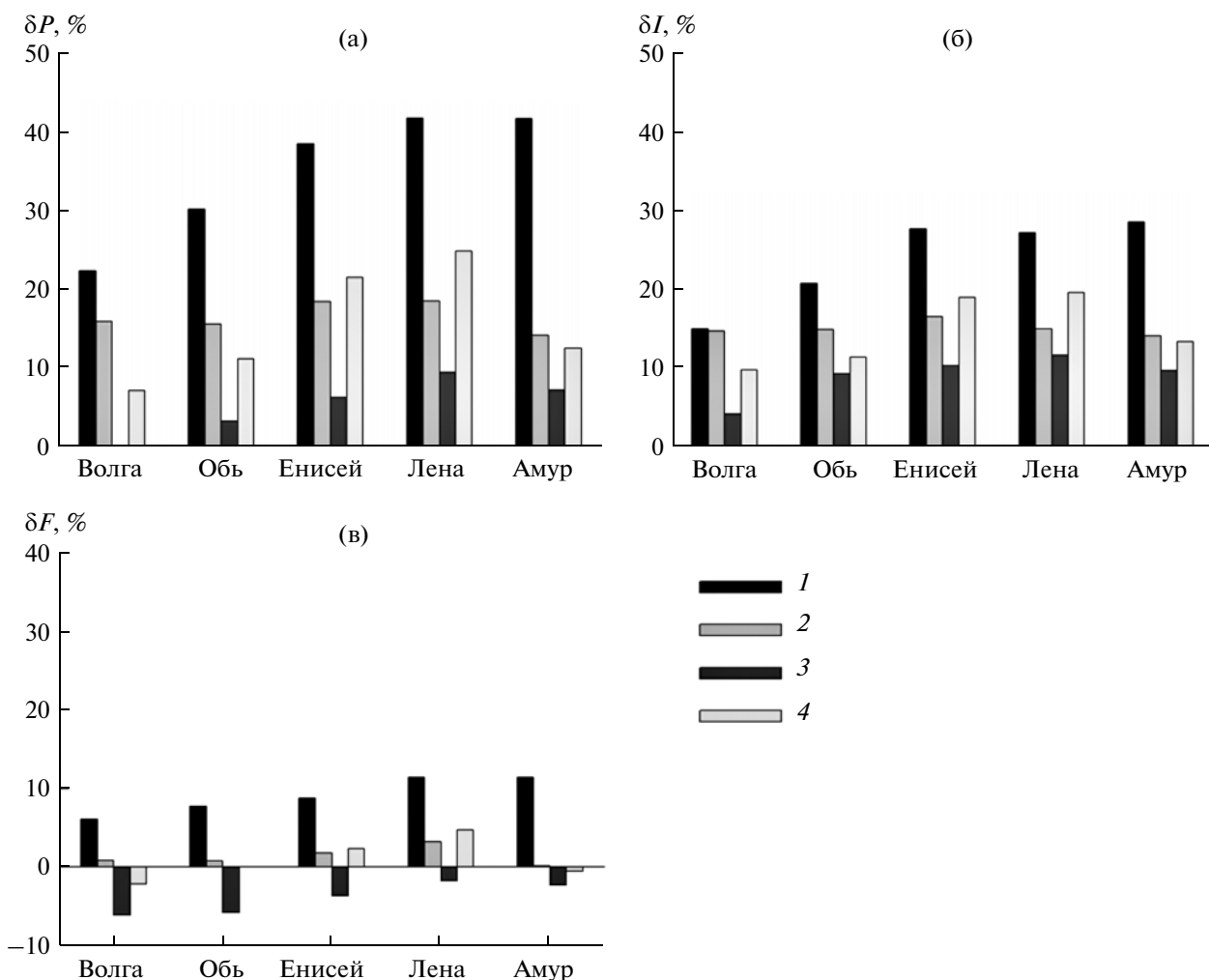


Рис. 3. Годовой ход стока Волги (а), Оби (б), Енисея (в), Лены (г) и Амура (д) по мультимодельному расчету (1, нижняя шкала) и данным наблюдений (2, верхняя шкала).

заболоченную равнину с малыми гидравлическими уклонами и очень низкими скоростями стекания в речную сеть.

Большинство моделей завышает весенний сток Волги и Оби, что может быть связано с завышенными оценками массы снежного покрова, а также



**Рис. 4.** Изменения характеристик сезонных осадков, %, для последнего 20-летия XXI в. (относительно 1981–2000 гг.) при сценарии SRES-A1B для бассейнов Волги, Оби, Енисея, Лены и Амура: количества (а), интенсивности (б) и вероятности (в). 1 – зима, 2 – весна, 3 – лето, 4 – осень.

с более интенсивным снеготаянием в период весеннего половодья. Стоит также отметить, что на анализируемых реках имеются крупные водохранилища сезонного регулирования, существенно искажающие естественный гидрологический режим этих рек и, в первую очередь, внутригодовое распределение стока.

#### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В XXI в.

##### *Изменения осадков*

На рис. 4 приведены изменения среднего количества сезонных осадков, их интенсивности и вероятности дней с осадками для анализируемых водосборов к концу XXI в. согласно мультимодельному расчету при сценарии SRES-A1B. Согласно модельным расчетам (рис. 4) наибольшее

увеличение среднего количества осадков можно ожидать в зимний период для всех водосборов с наибольшим ростом в северо-восточной части Евразии (~40% для Енисея, Лены и Амура). В летний период изменения среднего количества осадков незначительны. В переходные периоды (весной и осенью) также в целом проявляются положительные тенденции, но они менее значимы, чем для зимнего сезона.

Интенсивность осадков на водосборах Волги, Оби, Енисея, Лены и Амура растет для всех сезонов с максимальным усилением в зимний период (рис. 4). При этом зимой наибольшее увеличение отмечено и для вероятности осадков на всех водосборах. Принципиально отличаются от зимних летние тренды для вероятности осадков – они отрицательны для всех четырех речных бассейнов. Таким образом, зимой осадков становится больше, они более интенсивны и чаще выпадают (с

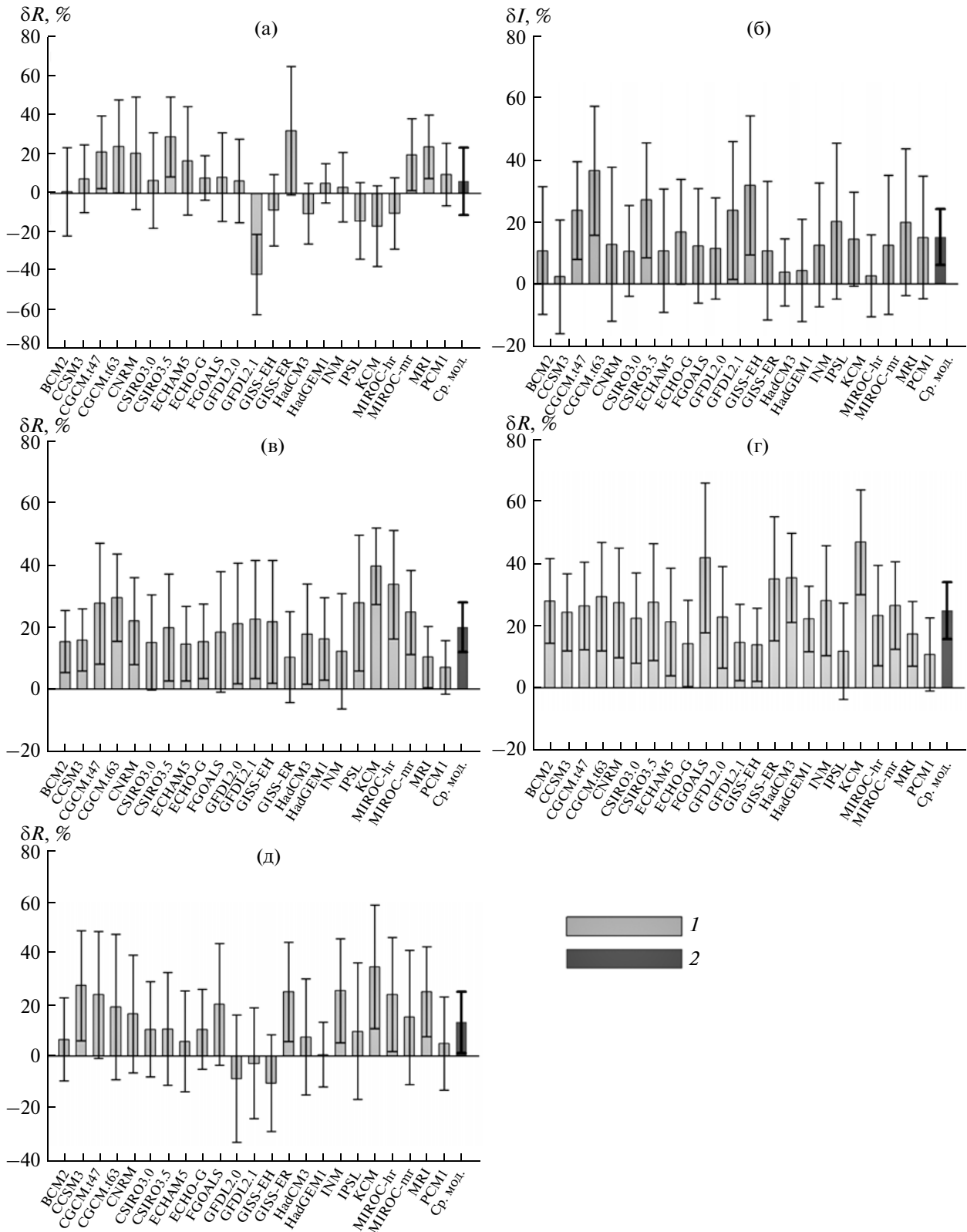
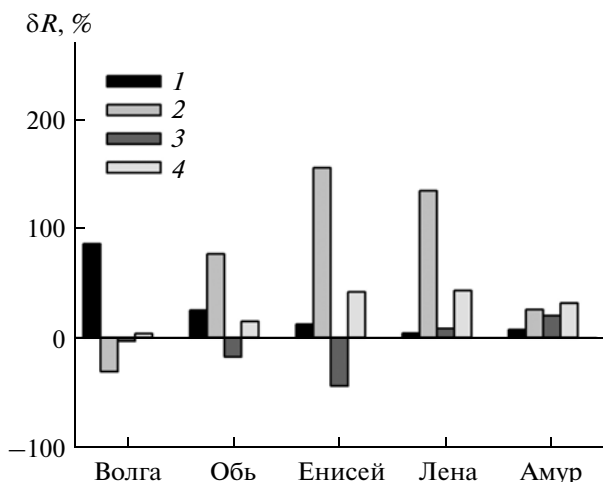


Рис. 5. Изменения среднегодового стока Волги (а), Оби (б), Енисея (в), Лены (г) и Амура (д) к концу XXI в. при сценарии SRES-A1B. 1 – расчет с ансамблем моделей; 2 – среднее по ансамблю моделей.



**Рис. 6.** Изменения сезонного стока Волги, Оби, Енисея, Лены и Амура к концу XXI в. при сценарии SRES-A1B по мультимодельному расчету. 1 – зима, 2 – весна, 3 – лето, 4 – осень.

наибольшими значениями для Лены и Амура). Летом общее количество осадков изменяется слабо, но при этом они становятся более интенсивными и редкими.

#### Изменения речного стока

Рост общего количества осадков, который может наблюдаться при потеплении климата, должен приводить к увеличению речного стока с большинства водосборов. Рис. 5 демонстрирует возможные изменения среднегодового стока Волги, Оби, Енисея, Лены и Амура к концу XXI в. по ансамблю моделей со сценарием антропогенного воздействия SRES-A1B. Вертикальными линиями обозначены среднеквадратические отклонения (СКО) речного стока по данным наблюдений. Следует отметить, что все модели показывают рост среднегодового стока сибирских рек к концу этого столетия. Согласно модельным оценкам рост среднегодового стока Оби, Енисея и Лены может составить ~15, 20 и 25% соответственно. При этом для стока Енисея и Лены эти изменения превышают диапазон СКО наблюдаемого речного стока (рис. 5в, г). Таким образом, тенденция усиливается с увеличением доли бассейна в высоких широтах, что подтверждает полученные ранее модельные оценки [4–6].

Для стока Амура выявлен менее значимый рост, чем для Енисея и Лены, при этом три модели демонстрируют незначительное уменьшение стока к концу этого столетия (рис. 5д). Тенденции изменения стока Волги в XXI в. более противоречивы. В целом изменения стока Волги и Амура к концу XXI в. статистически незначительны (рис. 5а, д).

На рис. 6 приведены средние (по ансамблю моделей) изменения сезонного стока, мм/год, Вол-

ги, Оби, Енисея, Лены и Амура к концу XXI в. Согласно мульти-модельным оценкам основной вклад в рост годового стока в XXI в. при умеренном антропогенном сценарии для трех сибирских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, связан с весенним сезоном. Особенно сильно проявляется рост весеннего стока Енисея и Лены. Для Оби отмечается также заметный рост зимнего стока. Для Волги получена общая тенденция ослабления весеннего речного стока при наибольшем росте зимой. Результаты расчетов показывают уменьшение весеннего максимума стока Волги и его более раннее наступление к концу XXI в., связанное с уменьшением накопленной массы снега зимой. Совершенно иная ситуация складывается в центральной и восточной Сибири. Так, при потеплении климата на водосборах Оби, Енисея и Лены происходит накопление дополнительной массы снега зимой, что, в свою очередь, приводит к существенному росту стока за счет его таяния с апреля по май.

Следует отметить, что летом для бассейнов Енисея, Оби и Волги проявляется общая тенденция уменьшения стока. Эта тенденция усиливается с запада на восток с максимальным уменьшением летнего стока в бассейне Енисея. Далее на восток для бассейнов Лены и Амура в целом характерен рост летнего стока.

Наиболее однородное распределение по сезонам общих изменений речного стока, с несколько меньшими изменениями зимой, получено для бассейна Амура. Как и для Амура, для Лены также отмечена общая тенденция роста стока во все сезоны.

На рис. 7 изображены возможные изменения среднегодового стока с водосбора Оби, а также отдельно для его южной (верховье) и северной (низовье) частей к 2020 г. при антропогенном сценарии SRES-A1B. В целом на фоне общего (по всему ансамблю моделей) увеличения стока Оби к концу XXI в. в ближайшем 20-летию возможно уменьшение стока Оби (на это указывает треть моделей), причем почти половина моделей указывает на уменьшение к 2020 г. стока в верховьях Оби (рис. 7б). Некоторые модели также демонстрируют незначительное уменьшение стока в низовьях Оби (рис. 7б). В целом, осредненные по всему водосбору Оби изменения стока к 2020 г. могут быть незначительными из-за различных тенденций для южных и северных районов водосбора Оби.

#### ВЫВОДЫ

Оценена способность климатических моделей воспроизводить не только среднегодовой режим речного стока, но и особенности его внутригодового распределения. При значительном разбросе оценок средние мульти-модельные расчеты качественно воспроизводят основные фазы годового



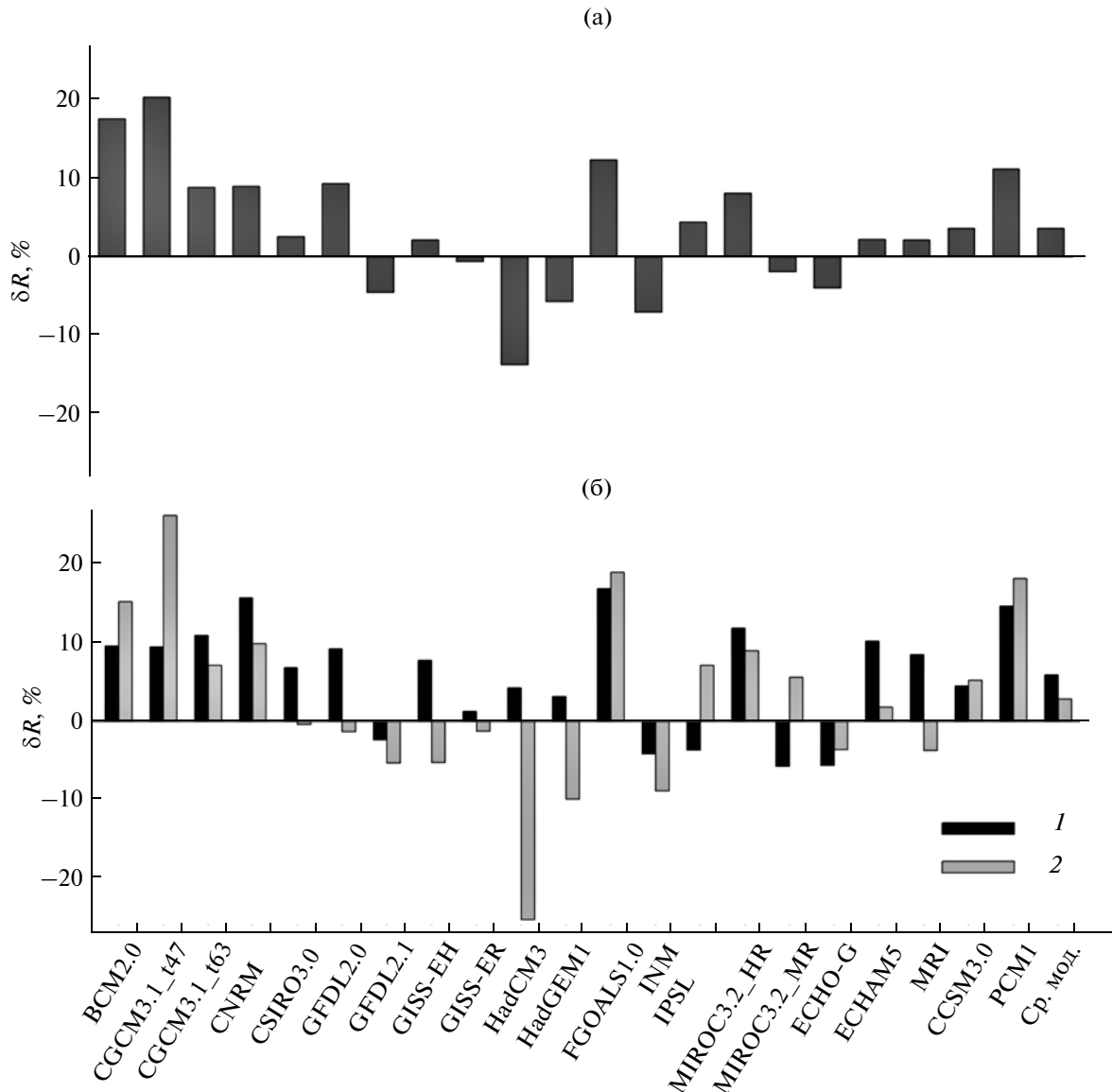


Рис. 7. Изменения среднегодового стока Оби для первого 20-летия XXI в. (относительно 1981–2000 гг.) при сценарии SRES-A1B: для всего водосбора (а), низовье (1) и верховье (2) (б).

цикла речного стока. При этом наилучшее совпадение между рассчитанным (осредненным по речным водосборам) и наблюдаемым стоком в дельте рек получено при сдвиге на месяц (для Оби на 2 мес.) вперед, что объясняется отсутствием в климатических моделях блока расчета стекания воды в речном бассейне. Завышение моделями весеннего стока может быть связано с переоценкой моделями массы снежного покрова на водосборе и интенсивности снеготаяния в период весеннего половодья. С другой стороны, фактический речной сток подвержен влиянию сезонного регулирования искусственными водохранилищами, что существенно искажает естественный гидрологический режим этих рек, в первую очередь – внутригодовое распределение стока.

Согласно мультимодельным расчетам следует ожидать увеличения среднегодового стока сибирских рек к концу XXI в. Это в основном связано с ростом весеннего стока за счет увеличения зимних осадков и, соответственно, массы снега и более интенсивного снеготаяния в весенний период. Изменения среднегодового стока с водосборов Волги и Амура в XXI в. более противоречивы и в целом статистически незначительны.

Следует отметить общую тенденцию роста зимнего стока, которая уменьшается для анализируемых речных бассейнов с запада на восток. Это можно связать с более холодным климатом в бассейнах сибирских рек (в частности в бассейне Лены). Согласно модельным расчетам наиболее

сильный температурный рост в XXI в. ожидается зимой, и эта тенденция в меньшей степени должна проявляться в увеличении речного стока за счет таяния снежного покрова при очень низких отрицательных температурах. Соотношение сезонных тенденций изменения речного стока должно изменяться также в зависимости от степени агрессивности антропогенного сценария и временного горизонта, для которого делаются оценки.

Летом для бассейнов Енисея, Оби и Волги проявляется общая тенденция уменьшения стока. Отмеченные изменения летнего стока связаны с соответствующими изменениями осадков и испарения для различных бассейнов. В отличие от температурных изменений зимой, с общим усилением потепления с ростом широты температурное увеличение летом к концу XXI в. при сценарии SRES-A1B максимально – в центре Евразии. В Северной Евразии это проявляется в более сильном летнем потеплении в долготных поясах, где расположены бассейны Енисея и Оби, с соответствующими более сильным испарением и уменьшением стока.

В целом на фоне общего увеличения стока Оби к концу XXI в. некоторые модели демонстрируют его возможное уменьшение к 2020 г. в основном за счет уменьшения стока в южной части водосбора (верховьях) Оби.

Анализ характеристик ежедневных осадков демонстрирует рост среднего количества осадков и их интенсивности для всех анализируемых водосборов с наибольшим увеличением в зимний период. В зимний период также отмечено увеличение частоты выпадения осадков для анализируемых водосборов, в то время как тренды вероятности летних осадков отрицательны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в 21-м веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 38–49.
2. Мохов И.И., Рекнер Э., Семенов В.А., Хон В.Ч. Экстремальные режимы осадков в регионах северной Евразии в XX веке и их возможные изменения в XXI веке // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 6. С. 818–821.
3. Мохов И.И., Рекнер Э., Семенов В.А., Хон В.Ч. Возможные региональные изменения режимов осадков в Северной Евразии в XXI в. // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 754–762.
4. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 150–165.
5. Мохов И.И., Хон В.Ч. Гидрологический режим в бассейнах сибирских рек: модельные сценарии изменений в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 77–93.
6. Мохов И.И., Хон В.Ч. Модельные сценарии изменений стока сибирских рек // Докл. РАН. 2002. Т. 383. № 5. С. 684–687.
7. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т I. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.
8. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т II. М.: Росгидромет, 2008. 288 с.
9. Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Изменение климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 6. С. 645–654.
10. GRDC, Global Runoff Data Centre. Second Interim report on the Arctic river database for Arctic Climate System Study (ACSYS). Tech. Rep.12. Koblenz: FHO, 1996. 48 p.
11. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Ed. Solomon S. Cambridge: Cambridge Univer. Press, 2007. 940 p.
12. Kattsov V.M., Walsh J.E., Chapman W.L. et al. Simulation and projection of Arctic freshwater budget components by the IPCC AR4 global climate models // J. Hydrometeorol. 2007. V. 8. № 3. P. 571–589.
13. Khon V.C., Mokhov I.I., Roeckner E., Semenov V.A. Regional changes of precipitation characteristics in Northern Eurasia from simulations with global climate model // Global Planetary Change. 2007. V. 57. № 1–2. P. 118–123.
14. Meehl G.A., Covey C., Delworth T. et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset – A new era in climate change research // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2007. V. 88. № 9. P. 1383–1394.
15. New M., Hulme M., Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate // J. Clim. 2000. V. 13. № 13. P. 2217–2238.
16. Oki T., Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources // Science. 2006. V. 313. № 5790. P. 1068–1072.
17. Pavelsky T.M., Smith L.C. Intercomparison of four global precipitation data sets and their correlation with increased Eurasian river discharge to the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D21112. doi:10.1029/2006JD007230
18. Park W., Keenlyside N., Latif M. et al. Tropical Pacific Climate and its Response to Global Warming in the Kiel Climate Model // J. Climate. 2009. V. 22. № 1. P. 71–92.
19. Perry G.D., Duffy P.B., Miller N.L. An extended data set of river discharges for validation of general circulation models // J. Geophys. Res. 2006. V. 101. № D16. P. 21339–21349.
20. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W. et al. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // Science. 2002. V. 298. № 2171. P. 2171–2173.
21. Semenov V., Bengtsson L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // Climate Dynamics. 2002. V. 19. № 2. P. 123–140.
22. Voss R., May W., Roeckner E. Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: Changes in extremes of the hydrological cycle // Intern. J. Climatology. 2002. V. 22. № 7. P. 755–777.