

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ СУШИ

УДК 556.16

СТОК РЕК ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ НА 1.5 И 2 ГРАДУСА¹

© 2023 г. А. С. Калугин*

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

**e-mail: kalugin-andrei@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.10.2022 г.

После доработки 12.11.2022 г.

Принята к публикации 13.01.2023 г.

С помощью гидрологической модели ECOMAG проведены расчеты характеристик стока в бассейнах основных рек Европейской части России: Волги, Дона, Северной Двины, Печоры и Кубани. На основе данных стационарных метеорологических наблюдений проведены калибровка и верификация моделей формирования стока для различных гидрометрических постов в перечисленных бассейнах. Затем в качестве входных были использованы данные ансамбля глобальных моделей климата для оценки регионального гидрометеорологического режима при реализации сценария глобального потепления на 1.5 и 2°C в XXI в. относительно доиндустриальных значений. Выполнена оценка воспроизведения годового и сезонного стока по данным климатических моделей относительно данных наблюдений. Согласно результатам численных экспериментов, при глобальном потеплении на 1.5 и 2°C величины относительного изменения стока рек Европейской части России возрастают с С на Ю и с В на З, т. е. гидрологические системы в более мягком климате оказались чувствительнее к изменению метеорологических характеристик. Оценка аномалий стока Европейской части России показала следующие общие признаки: увеличение зимнего стока северных рек и в бассейне Волги, уменьшение весеннего талого стока на Северной Двине, Волге и Дону, снижение летне-осеннего стока всех исследуемых рек различной степени интенсивности. При этом годовой сток Печоры будет иметь положительную тенденцию, а сток Северной Двины, Волги, Дона и Кубани – отрицательную.

Ключевые слова: формирование стока, глобальное потепление, гидрологические модели, ЕЧР, Волга, Дон, Северная Двина, Печора и Кубань.

DOI: 10.31857/S0321059623040120, EDN: QJXLZE

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в Европейской части России (ЕЧР) климатические изменения оказывают значительное влияние, в первую очередь на внутригодовое распределение стока. Результаты анализа таких изменений широко представлены в работах кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова [17, 21, 31], ИВП РАН [1, 9], ИГ РАН [4, 5], ГГИ [6, 10] и других организаций. Некоторые обобщения этих и других исследова-

ний отражены в [8] и [16], опубликованных под редакцией ИГ РАН и ГГИ соответственно.

Резюмируя основные выводы приведенных работ, нужно отметить, что за период с 1980-х гг. на реках бассейнов Волги и Дона отмечается увеличение зимнего стока на 30–120% [4, 9, 32]. Установлено, что запасы воды в снежном покрове к началу весны уменьшаются, создавая условия для снижения стока весеннего половодья. Так, на реках центральной части ЕЧР весенний сток уменьшился на 10–30% [17]. За период с 1980-х гг. максимальные расходы весеннего половодья уменьшились на 20–50% на большей части бассейна Волги, за исключением верховьев горных залесенных притоков Камы [6]. Увеличение летне-осеннего стока отмечается в лесостепной и степной зонах ЕЧР, для которого характерна высокая пространственная изменчивость [31]. В целом сезонная изменчивость стока связана с более ранним и распластанным половодьем, увеличением зимнего стока вследствие продолжительных

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты 20-77-00077 (оценка изменений стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры), 22-27-00808 (оценка изменений стока Кубани)); Государственного задания ИВП РАН по теме FMWZ-2022-0001 “Оценка изменений стока и трансформации его генезиса под влиянием климатических изменений в 20–21 вв. в различных природных условиях на основе ансамблевых экспериментов с гидрологическими моделями и данными глобальных моделей климата” (пространственно-временной анализ изменений водного режима рек ЕЧР).

зимних оттепелей за счет вторжения влажного и теплого воздуха и раннего перехода температуры воздуха к положительным значениям. За последние 40 лет естественная зарегулированность стока рек бассейнов Волги и Дона возросла в среднем на 30% [21]. В то же время для рек севера ЕЧР отмечена слабая положительная тенденция для годового стока без статистически значимых изменений внутригодового распределения стока и максимальных расходов воды [18]. На реках с основной долей дождевого стока в бассейне Кубани происходит увеличение повторяемости опасных гидрометеорологических явлений, вызванных ливневыми осадками. Однако за последние десятилетия в бассейне Кубани в целом отмечено снижение стока в июле–августе за счет уменьшения ледниковой составляющей [41].

Ниже приведены существующие оценки будущих изменений стока исследуемых рек, определенные с использованием различных гидрологических моделей и данных ансамбля глобальных климатических моделей (GCMs). Для бассейнов Волги и Дона коллективами научных сотрудников ГГИ и ИГ РАН получены оценки изменения водного режима на основе воднобалансовых гидрологических моделей с декадным и месячным расчетным шагом [4, 5, 7]. Так, в первой трети XXI в. возможный рост годового стока Волги составит 3–10% и Дона не превысит 5% в зависимости от сценария. По результатам расчетов по концептуальной модели STREAM, увеличение стока Волги в XXI в. составит ~7% [40]. Согласно [24] по расчетам с использованием модели TOPMODEL, при сценарии RCP8.5 к середине XXI в. относительно конца XX в. сток увеличится на 14% в бассейне Камы, а для остальной части бассейна Волги в ближайшие 40 лет изменения стока не превысят 5%. На основе региональной климатической модели и упрощенной гидродинамической модели CaMa-Flood по сценарию RCP8.5 к середине XXI в. возможно уменьшение максимального стока рек бассейна Волги в период снеготаяния на 10–30% [42]. По результатам расчетов модели SWIM, сток Северной Двины в XXI в. может увеличиться на 5–15% при реализации различных RCP-сценариев [37]. Схожие результаты получены по модели SWAP – рост стока Северной Двины на 5–10% [39], в то же время согласно модели ECOMAG на основе отечественных баз параметров подстилающей поверхности, изменения годового стока в XXI в. близки к нулю при значительной внутригодовой трансформации [12]. Анализ публикаций показал отсутствие оценок возможных изменений стока Печоры и Кубани в XXI в.

В последние годы все большее распространение получают методы оценки изменений водного режима крупных рек с помощью физико-математических пространственно-распределенных гидрологических моделей, в которых в качестве гра-

ничных условий задаются сценарии гидрометеорологических воздействий на речной водосбор, рассчитанные с помощью GCMs [2, 3, 35]. Применение гидрологических моделей такого класса, работающих на суточном временном интервале, позволяет достаточно детально оценить физические механизмы реакции речных бассейнов на климатические воздействия с учетом региональных особенностей и снизить неопределенности оценок изменений речного стока при решении задач сверхдолгосрочного прогнозирования изменения водного режима.

В 2018 г. опубликован специальный доклад [38], основной задачей которого стало определение негативного влияния глобального потепления (ГП) – на 1.5 и 2°C (цели, представленные в Парижском соглашении об изменении климата) выше доиндустриальных значений – на природные и социальные системы в мировом масштабе. ЕЧР подобными исследованиями практически не охвачена, что подтверждает высокую значимость и актуальность получения новых физически обоснованных результатов оценки гидрологических последствий ГП на 1.5 и 2°C в XXI в. на основе синтеза детальных физико-математических моделей формирования стока и ансамбля GCMs в пределах крупных речных бассейнов ЕЧР: Волги, Дона, Северной Двины, Печоры и Кубани.

МЕТОДИКА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Построение и тестирование моделей формирования стока

Для исследования физически обоснованных изменений водного режима использованы модели формирования стока бассейнов рек Волги, Дона, Северной Двины, Печоры и Кубани на платформе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG [15], который ранее использовался для крупных рек Европейской и Азиатской частей России [23, 25–27, 29, 30, 34], а также горных рек [19, 28, 33]. Ранее на основе комплекса ECOMAG была построена и впервые успешно протестирована единая модель бассейна Волги для расчетов формирования среднесуточного стока в замыкающих створах основных притоков Волги и Камы за многолетний период вследствие зарегулированности стока Волжско-Камским каскадом водохранилищ [22]. Анализ публикаций показал, что гидрологические пространственно-распределенные модели на среднесуточном временном интервале для бассейнов Дона и Кубани построены и верифицированы впервые. Существуют аналоги моделей формирования стока Северной Двины и Печоры [11, 37, 39] и детальные модели формирования стока для небольшой части водосбора Кубани и Дона на основе методов конечных элементов [13, 14]. Модели для всех пяти

перечисленных речных бассейнов построены на основе единых источников информации о подстилающей поверхности и изменчивости метеорологических характеристик. Такой подход позволяет с большей достоверностью провести сравнительный анализ результатов расчета изменений водного режима рек.

Построение модельной речной сети и схематизация речных бассейнов путем разделения на элементарные водосборы выполнялись на основе цифровой модели рельефа с пространственным разрешением 1 км. Количество построенных элементарных речных водосборов в бассейне Волги – 775, Дона – 129, Северной Двины – 198, Печоры – 174, Кубани – 31. Для определения пространственно-распределенных параметров моделей использованы глобальные базы данных почв Harmonized World Soil Database и ландшафтов Global Land Cover Characterization. В качестве граничных условий в моделях заданы многолетние ряды среднесуточных величин температуры и влажности приземного воздуха, количества атмосферных осадков, измеренных на сети метеостанций. Для бассейна Волги использованы данные наблюдений на 306 метеостанциях, бассейна Дона – 75, Северной Двины – 50, Печоры – 30, Кубани – 21.

Для калибровки моделей были подготовлены многолетние ряды среднесуточных расходов воды на различных гидрометрических постах в бассейнах Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Кубани. В бассейне Волги расчеты выполнены для створа Верхней Волги (Старица) и замыкающих створов основных притоков Волги и Камы: Оки, Белой, Вятки, Ветлуги, Суры, Унжы, а также водосбора Камского водохранилища. Для бассейна Дона калибровка модели выполнялась по створам на Дону, контролирующим верхнюю (Задонск) и среднюю (Казанская) части водосбора, створу Беляевский, который определяет ~95% притока воды в Цимлянское водохранилище и рассмотрен как замыкающий; а также на основных притоках: Хопре, Сосне, Воронеже, Медведице. Для бассейна Северной Двины выбраны три створа на основном русле в среднем течении Абрамково, Звоз и замыкающий створ Усть-Пинега; а также на реках верхней части водосбора и основных притоках: Сухоне, Юге, Лузе, Вычегде, Пинеге. Для бассейна Печоры в качестве калибровочных выбраны три створа на основном русле в верхнем (Усть-Шугор), среднем (Усть-Цильма) течении и замыкающий створ Оксина, а также на основном притоке Печоры – р. Усе. Для бассейна Кубани калибровка модели формирования стока проведена для створов Армавир и Ладожская, расположенных выше Краснодарского водохранилища и определяющих приток воды в него по Кубани, а также на замыкающем створе на главном притоке Кубани – р. Лабе. Кроме того, на этапе калибровки модели Кубани в качестве гра-

ничных условий были заданы среднесуточные сбросы воды по гидроузлу в створе Усть-Джегута, расположенном у начала Большого Ставропольского канала, на водоснабжение которого отводится почти 80% стока Верхней Кубани.

Если для бассейнов Северной Двины, Печоры и Дона замыкающие створы определены, то для бассейна Волги из-за наличия Волжско-Камского каскада водохранилищ и для бассейна Кубани из-за расположения гидропостов возникают трудности. В связи с этим, оценка точности воспроизведения естественного стока Волги за многолетний период была проведена относительно расчета при задании на граничных условиях модели в восьми рассмотренных выше речных створах (речной сток в которых составляет 3/4 стока Волги) фактических среднесуточных расходов. Аналогичным образом определена точность расчета естественного стока Верхней Волги перед впадением Оки, Камы перед впадением в Волгу и Кубани на основе данных среднесуточных расходов в створе Ладожская на Кубани и Догужиев на Лабе, суммарная водосборная площадь которых составляет 93% от водосбора Кубани перед впадением в Краснодарское водохранилище. Замыкающий створ для Оки – Горбатов.

При моделировании применен метод пространственной калибровки моделей по критерию Нэша–Сатклифа NSE, Клингга–Гупты KGE и относительной систематической погрешности расчета BIAS. Качество расчетов тем лучше, чем ближе значения NSE и KGE к единице, а BIAS – к нулю. Для оценки робастности моделей проведена их верификация с использованием независимых данных измерений стока для тех же створов речной сети.

Гидрологическое моделирование по данным GCMs

Для снижения существующих неопределенностей, увеличения точности и пространственно-временной детализации климатических проекций для территории ЕЧР была подготовлена база необходимой для гидрологических моделей среднесуточной метеорологической информации с использованием сеточных данных ансамбля GCMs CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) из проекта ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project). Эти данные представляют собой приземные поля метеохарактеристик, проинтерполированные на регулярную по широте и долготе сетку 0.5° (даунскейлинг), и за период наличия данных наблюдений проведена процедура устранения модельных систематических ошибок внутригодового хода метеоэлементов (“bias-correction”) с привлечением данных реанализов семейства ERA [36]. Выбраны GFDL-ESM2M и MIROC5 как наиболее точно в соответствии с данными наблюдений воспроизводящие динами-

Таблица 1. Годы достижения пороговых значений ГП на 1.5 и 2°С относительно доиндустриальных величин для различных GCMs и RCPs

GCM	RCP	1.5°С	2°С
GFDL-ESM2M	RCP2.6	–	–
GFDL-ESM2M	RCP4.5	2049	–
GFDL-ESM2M	RCP6.0	2056	2076
GFDL-ESM2M	RCP8.5	2036	2053
MIROC5	RCP2.6	2048	–
MIROC5	RCP4.5	2039	2069
MIROC5	RCP6.0	2052	2071
MIROC5	RCP8.5	2033	2048

ку глобальной температуры воздуха за период 1861–2005 гг. [20].

С помощью указанных моделей формирования стока исследованы возможности воспроизведения годового и сезонного стока рек ЕЧР за исторический период при использовании в качестве граничных условий в гидрологических моделях сеточных данных GCMs для расчета соответствующего ансамбля многолетних гидрографов среднесуточного стока. При проведении таких расчетов регулирование стока гидроузлами не учитывалось, поскольку исследовалась реакция естественных гидрологических систем на региональные изменения климата на ЕЧР при ГП на 1.5 и 2°С. В качестве базового исторического периода выбраны 1970–1999 гг. Следующие рассчитанные по данным GCMs характеристики водного режима сравнивались с полученными ранее в результате моделирования по данным наблюдений на метеостанциях: норма годового и сезонного стока, высокий (Q_{10} – вероятность превышения – 10% дней в году) и низкий (Q_{90} – вероятность превышения – 90% дней в году) сток (по кривым продолжительности среднесуточного стока), коэффициент стока. Расчеты проведены для замыкающих створов: в бассейне Северной Двины – Усть-Пинега, Печоры – Оксина, Дона – Беляевский, Кубани – створ перед ее впадением в Краснодарское водохранилище ниже устья р. Лабы, Волги – створ Жигулевской ГЭС с площадью водосбора почти 90% от площади бассейна Волги, Верхней Волги – створ перед впадением Оки, Камы – створ перед впадением в Волгу, Оки – Горбатов. Разделение стока по сезонам было следующим: зимний период на Северной Двине, Дону, Кубани и в бассейне Волги – с ноября по март, на Печоре – с ноября по апрель; половодье на Северной Двине, Каме и в замыкающем створе Волги –

с апреля по июнь, на Печоре – с мая по июнь, на Оке, Верхней Волге, Дону и Кубани – с апреля по май; летне-осенний период на Северной Двине, Печоре, Каме и в замыкающем створе Волги – с июля по октябрь, на Оке, Верхней Волге, Дону и Кубани – с июня по октябрь. Кроме того, по результатам моделирования было проведено сравнение расчетов по данным метеостанций и GCMs таких стокообразующих факторов, как запасы воды в снежном покрове и глубина сезонного промерзания почвогрунтов в среднем по бассейнам. Для оценки пространственной верификации моделирования стока проведено сравнение полей слоя годового стока для элементарных водосборов в исследуемых бассейнах, рассчитанных по данным GCMs и наблюдений на метеостанциях.

При расчетах на будущий период до конца XXI в. использованы проекции глобальных климатических изменений согласно четырем RCP-сценариям (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5). Сначала были определены периоды достижения пороговых значений ГП на 1.5 и 2°С относительно доиндустриальных величин для каждой GCM и каждого RCP. Это сделано по аномалиям глобальной температуры воздуха по 30-летнему скользящему среднему, т. е., например, 2050 г. соответствует средней величине за период 2036–2065 гг. Затем каждая из семи возможных реализаций ГП на 1.5°С и каждая из пяти возможных реализаций ГП на 2°С относительно доиндустриальных величин задавались в качестве граничных условий в модели формирования стока исследуемых рек, после чего результаты расчетов (с суточным шагом по времени и пространственным разрешением, равным размеру элементарных водосборов) усреднялись для пороговых значений 1.5 и 2°С по семи и пяти наборам соответственно. Расчеты по гидрологической модели на XXI в. проводились с теми же параметрами, что установлены за исторический период. Согласно используемым данным, в среднем ГП на 1.5°С будет достигнуто к 2045 г. и на 2°С – к 2064 г. (табл. 1). Аномалии климатических и гидрологических характеристик исследуемых рек вычислены как отношение рассчитанной величины для условий ГП на 1.5 и 2°С к соответствующему значению, определенному по данным GCM для базового периода 1970–1999 гг.

Для оценки пространственно-временной изменчивости климатических и гидрологических характеристик построены карты среднесуточных полей температуры воздуха и осадков, а также слоя стока по результатам расчетов моделей его формирования по данным GCMs на периоды XXI в., соответствующие ГП на 1.5 и 2°С. Затем эти поля сравнивались с построенными по данным GCMs за базовый период 1970–1999 гг., и было оценено изменение среднегодовой температуры воздуха, годовой суммы осадков и слоя стока. Выявление статистической значимости

климатически обусловленных изменений годового и сезонного речного стока выполнено с применением критерия Манна–Уитни на 5%-м уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Тестирование моделей формирования стока

Калибровка параметров модели в бассейне Волги проводилась за период 1986–1999 гг. на восьми гидропостах, Дона – за период 1985–1999 гг. на восьми гидропостах, Северной Двины – за период 1985–1999 гг. на восьми гидропостах, Печоры – за период 1985–1999 гг. на четырех гидропостах и Кубани за период 1989–1995 гг. (продолжительность определена наличием данных о расходах воды в створе Усть-Джегута) на трех гидропостах (табл. 2). Проверка моделей проводилась для тех же створов на независимых данных измерений за период 2000–2014 гг. и для Кубани 1996–2002 гг., в том числе в створе Волги у Жигулевской ГЭС, Верхней Волги перед впадением Оки, Камы перед впадением в Волгу, Кубани перед впадением в Краснодарское водохранилище.

По критериям NSE, KGE и BIAS за период калибровки и верификации получены хорошие ($0.70 \leq NSE \leq 1$, $0.70 \leq KGE \leq 1$, $|BIAS| \leq 15\%$) или удовлетворительные ($0.50 \leq NSE < 0.70$, $0.50 \leq KGE < 0.70$, $15\% < |BIAS| \leq 25\%$) результаты расчета расходов воды для всех одиннадцати створов в бассейне Волги, пяти створов в бассейне Дона, всех восьми створов в бассейне Северной Двины, всех четырех створов в бассейне Печоры, всех четырех створов в бассейне Кубани. Результаты расчетов попали в категорию неудовлетворительных по NSE для створа Дон–Казанская за период верификации, Воронеж–Липецк по BIAS за период верификации и Медведица–Арчединская по NSE за период калибровки. Ошибки для таких сравнительно небольших по водоносности рек, как Воронеж и Медведица в створах Липецк и Арчединская, вероятно, объясняются недоучетом характерных для этих рек локальных особенностей формирования речного стока как природного, так и антропогенного происхождения, а для створа Казанская, скорее всего, – естественным регулирующим влиянием поймы при прохождении высоких расходов за период половодья. Кроме того, при оценке точности моделирования среднесуточного стока для бассейнов Дона и Кубани, для которых характерна высокая межгодовая и внутригодовая изменчивость стока, критерий KGE имеет преимущество по сравнению с NSE, позволяя нивелировать недостаток критерия NSE, связанный с занижением дисперсии рассчитанных расходов воды. На рис. 1–2 представлены гидрографы рассчитанных и фактических расходов воды в замыкающих створах иссле-

дуемых рек. Кроме того, отмечена робастность моделей при переходе от калибровочного к проверочному периоду.

Оценка изменений гидрометеорологического режима по данным GCMs

На рис. 3 представлены нормы среднемесячного стока Волги, Оки, Верхней Волги, Камы, Северной Двины, Печоры, Дона и Кубани, рассчитанные по модели формирования стока на основе данных ансамбля GCMs и наблюдений на метеостанциях за период 1970–1999 гг. Гидрологические модели по данным GCMs воспроизводят годовой сток в указанных створах с погрешностью 0.2–6% относительно расчета по данным метеостанций. При этом относительные ошибки расчета зимнего стока варьируют от 1% (Кубань) до 17% (Верхняя Волга), стока за период весеннего половодья – от 3% (Северная Двина) до 15% (Кубань), летне-осеннего стока от 1% (Кубань) до 19% (Печора). При оценке точности расчета высокого (Q_{10}) и низкого (Q_{90}) стока по данным GCMs нужно отметить, что погрешность для высокого стока составила 1–10%, а для низкого – 2–16% с наибольшими величинами для Дона и Кубани, что объясняется малыми абсолютными значениями стока в сравнении с северными реками. Коэффициент стока рек воспроизведен достаточно эффективно: погрешность составила 0.01 для Верхней Волги, Оки, Камы, Дона и Печоры; 0.02 для Северной Двины и 0.04 для Кубани. Пространственный коэффициент корреляции слоя годового стока между расчетами по моделям на основе данных GCMs и наблюдений на метеостанциях для элементарных водосборов составил 0.96 для бассейна Волги, 0.75 для Северной Двины, 0.68 для Печоры, 0.98 для Дона, 0.87 для Кубани.

Согласно расчетам, при ГП темпы увеличения температуры воздуха в целом возрастают с Ю на С ЕЧР. При ГП на 1.5°C рост среднегодовой температуры воздуха в бассейнах Северной Двины, Печоры, Оки и Верхней Волги составит 2.7–2.8, Дона и остальной части бассейна Волги – 2.5, Кубани – 1.9°C относительно базового периода 1970–1999 гг. При ГП на 2°C увеличение среднегодовой температуры воздуха в бассейне Печоры составит 4.1, Северной Двины, Оки и Верхней Волги – 3.7, Дона и остальной части бассейна Волги – 3.4, Кубани – 2.7°C. При этом для обоих сценариев наибольший темп потепления в бассейнах Северной Двины и Печоры отмечен для зимы на 3.1–4.3 и 3.8–5.5°C соответственно, Дона и Оки – для весны на 3–4 и 3.6–4.8°C, Кубани – для лета-осени на 2.3–3.2°C. Рост глобальной температуры воздуха с 1.5 до 2°C приводит к эффекту дополнительного потепления в исследуе-

Таблица 2. Значения статистических критериев рассчитанного среднесуточного стока в бассейнах Волги, Дона, Северной Двины, Печоры и Кубани за период калибровки и верификации моделей

Река–гидропост	F, тыс. км ²	NSE	KGE	BIAS, %	NSE	KGE	BIAS, %
Бассейн Волги		1986–1999 гг.			2000–2014 гг.		
Ока–Горбатов	244	0.73	0.83	6.4	0.75	0.80	–6.6
Вятка–Вятские Поляны	124	0.84	0.85	–3.1	0.89	0.93	–1.6
Белая–Бирск	121	0.87	0.82	–13	0.86	0.70	–12
Водосбор Камского вдхр	168	0.94	0.92	–7.1	0.93	0.91	–3.8
Сура–Порецкое	50.1	0.51	0.77	9.8	0.59	0.70	–15
Ветлуга–Ветлужский	27.5	0.86	0.81	1	0.87	0.83	5.7
Волга–Старица	21.1	0.66	0.72	12	0.67	0.77	3.7
Унжа–Макарьев	18.5	0.74	0.74	–0.5	0.72	0.78	1
Верхняя Волга	239	0.99	0.98	1	0.99	0.99	0.5
Кама	516	0.95	0.93	–6.4	0.96	0.90	–4.5
Волга в целом	1210	0.96	0.96	–1.7	0.97	0.93	–3.4
Бассейн Дона		1985–1999 гг.			2000–2014 гг.		
Дон–Беляевский	204	0.66	0.75	2.1	0.62	0.68	–12
Дон–Казанская	102	0.59	0.65	–8.5	0.43	0.56	–23
Дон–Задонск	31.1	0.55	0.52	4.4	0.52	0.67	–19.2
Хопер–Поворино	19.1	0.51	0.57	–5.3	0.64	0.68	–11.5
Хопер–Барминский	57.3	0.62	0.76	–3.7	0.58	0.66	–18
Сосна–Елец	16.3	0.52	0.48	3.2	0.61	0.73	–13
Воронеж–Липецк	15.3	0.54	0.61	–1.4	0.56	0.64	–29
Медведица–Арчединская	33.7	0.43	0.55	–0.9	0.51	0.63	–7.3
Бассейн Северной Двины		1985–1999 гг.			2000–2014 гг.		
Северная Двина–Усть-Пинега	348	0.91	0.94	–3.3	0.89	0.94	0.1
Северная Двина–Звоз	285	0.91	0.94	0.7	0.90	0.95	1.6
Северная Двина–Абрамково	220	0.90	0.94	0.7	0.90	0.94	3.5
Сухона–Каликино	49.2	0.78	0.75	–14	0.77	0.79	–13
Юг–Подосиновец	15.2	0.70	0.72	8.9	0.71	0.78	3.9
Вычегда–Федяково	112	0.80	0.87	8.7	0.87	0.89	9.5
Луза–Красавино	16.3	0.77	0.85	3.5	0.78	0.85	–8.6
Пинега–Кулогоры	36.7	0.74	0.84	–1.6	0.68	0.84	1.3
Бассейн Печоры		1985–1999 гг.			2000–2014 гг.		
Печора–Оксино	312	0.84	0.87	–6.1	0.88	0.92	–2.6
Печора–Усть-Цильма	248	0.89	0.88	2.7	0.88	0.89	5.8
Печора–Усть-Щугор	67.5	0.80	0.88	1.7	0.80	0.90	–1.9
Уса–Петрунь	27.5	0.76	0.70	–25	0.82	0.78	–21
Бассейн Кубани		1989–1995 гг.			1996–2002 гг.		
Кубань–Армавир	16.9	0.64	0.81	–4.1	0.62	0.78	–4
Кубань–Ладожская	19.8	0.67	0.83	4.4	0.63	0.72	0.6
Лаба–Догужиев	12	0.59	0.66	–9.8	0.58	0.72	–16
Кубань выше Краснодарского вдхр.	34.1	0.73	0.83	–2.7	0.70	0.81	–7.3

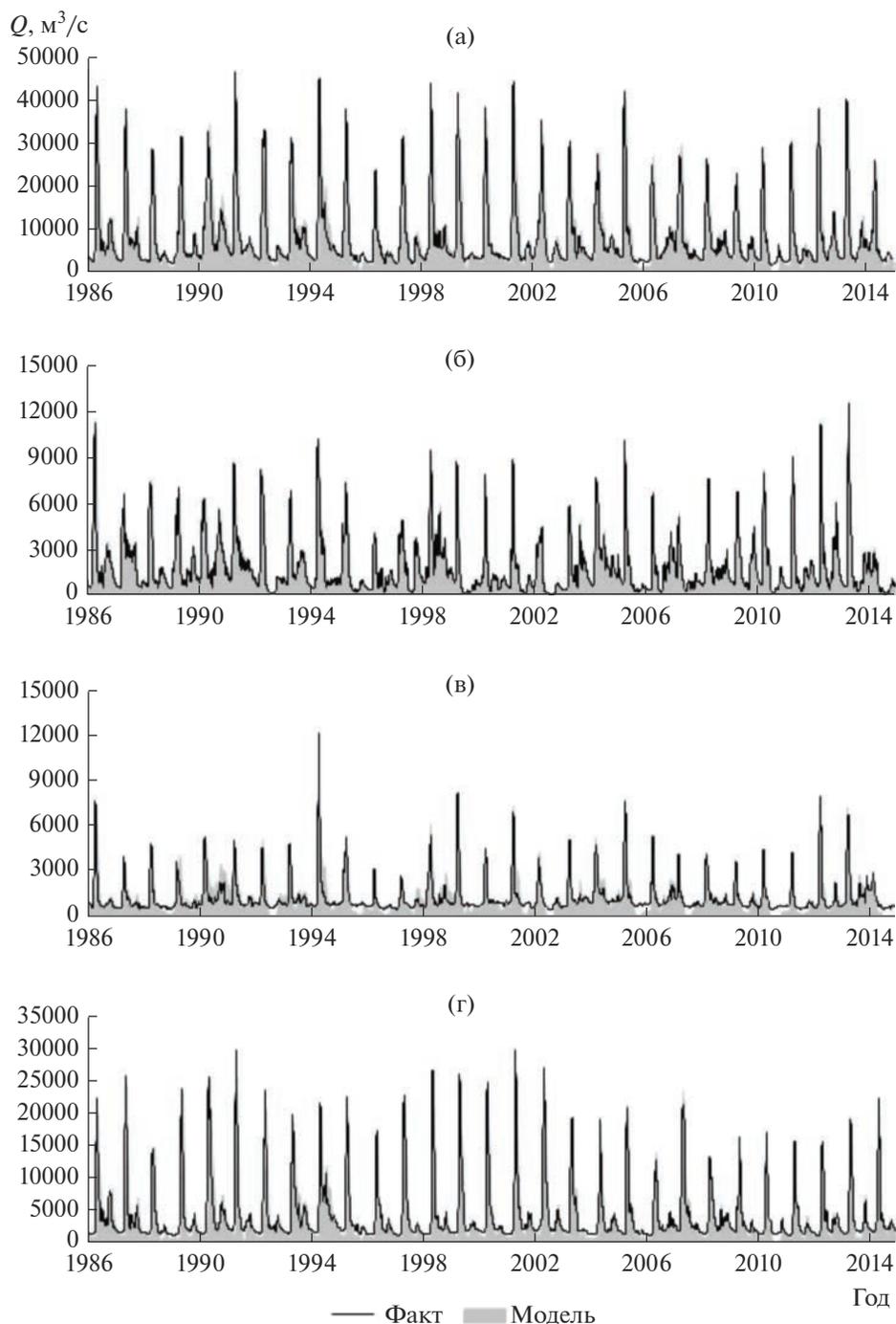


Рис. 1. Гидрографы смоделированных и фактических среднесуточных расходов воды в замыкающих створах Волги (а), Верхней Волги (б), Оки (в) и Камы (г).

мых речных бассейнах в годовом выражении на 0.8–1.3, в сезонном – на 0.6–1.7°C.

При ГП на 1.5 и 2°C увеличение годовой суммы осадков оказалось наибольшим для Печоры – 11 и 15%, на Дону, Северной Двине и в бассейне Волги – на 4–8% и на Кубани изменения близки к нулю. Наибольший рост увлажнения характе-

рен для зимнего периода в каждом из речных бассейнов и изменяется от 6–9% на Дону до 15–19% на Печоре при ГП на 1.5 и 2°C. Относительное увеличение летне-осенних осадков в бассейне Печоры составило 9 и 13% при ГП на 1.5 и 2°C, 5–8% – в бассейне Волги, до 4% в бассейнах Северной Двины и Дона, а для бассейна Кубани характерно их снижение на 8 и 16% соответственно.

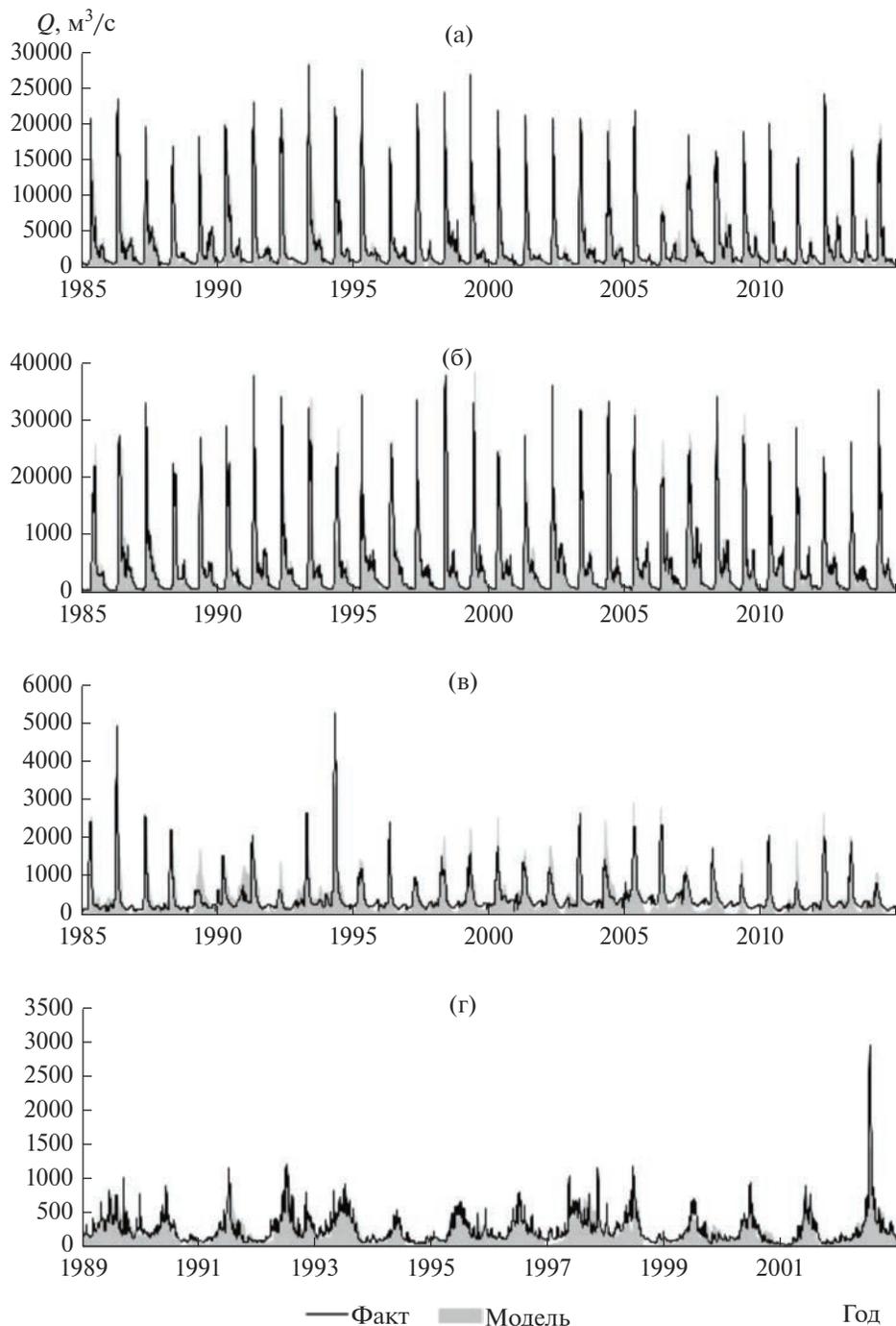


Рис. 2. Гидрографы смоделированных и фактических среднесуточных расходов воды в замыкающих створах Северной Двины (а), Печоры (б), Дона (в) и Кубани (г).

Рост глобальной температуры воздуха с 1.5 до 2°С приводит к эффекту дополнительного увлажнения водосборов Северной Двины, Печоры, Камы и Верхней Волги на 3–4.5, Оки – на 1.5%, но к снижению увлажнения водосбора Кубани на 4% за счет теплого периода года при почти неизменной величине годовой суммы осадков в бассейне Дона.

Продолжительность периода года с отрицательной температурой воздуха уменьшится в бассейнах Северной Двины и Печоры на 2.5 и 4 недели, Камы – на 2 и 3 недели, Оки и Верхней Волги – на 3 и 4.5 недели, Дона и Кубани – на 3 и 5 недель при ГП на 1.5 и 2°С соответственно. При этом количество твердых осадков в среднем по бассейну Северной Двины, Печоры и Волги почти не изме-

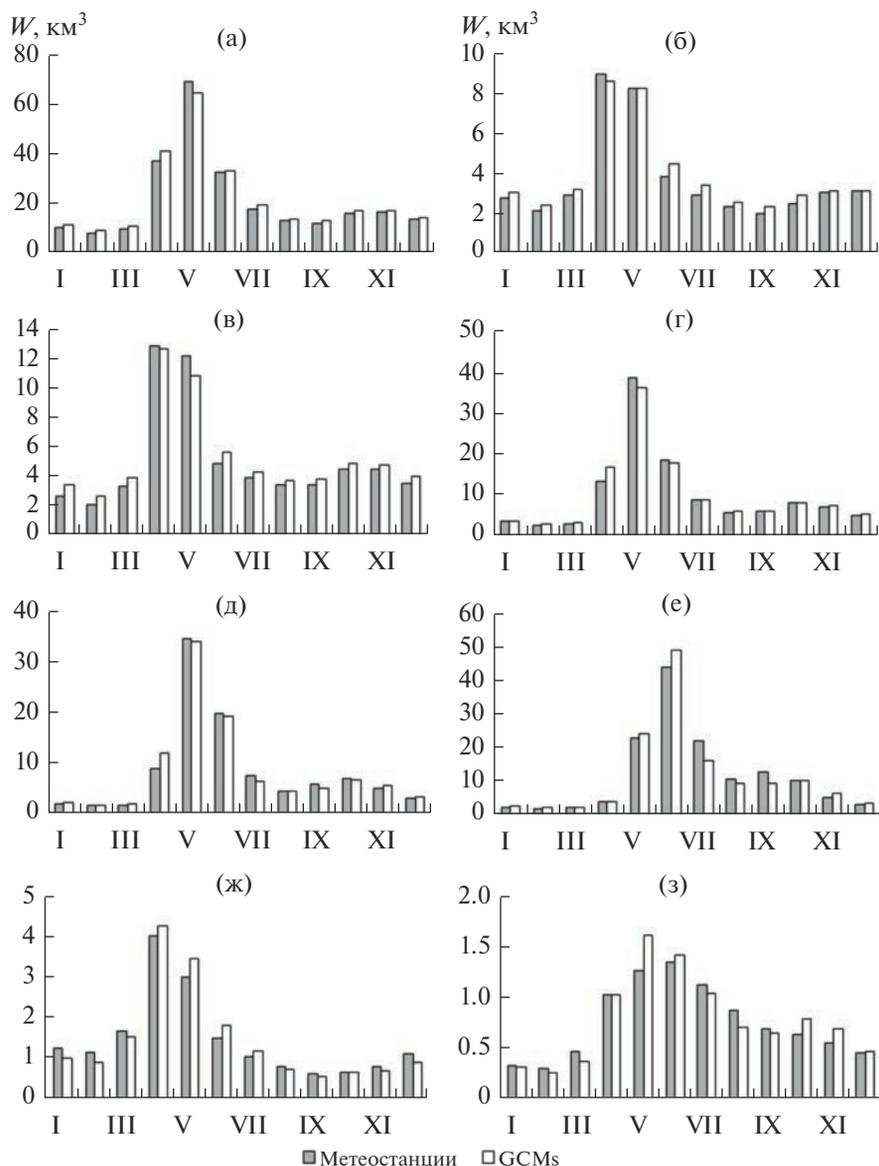


Рис. 3. Нормы среднемесячного стока Волги (а), Оки (б), Верхней Волги (в), Камы (г), Северной Двины (д), Печоры (е), Дона (ж) и Кубани (з), рассчитанные по моделям формирования стока на основе данных GCMs и наблюдений на метеостанциях за период 1970–1999 гг.

няется, хотя на Верхней Волге и Оке отмечено их снижение на 4 и 7% при ГП на 2°C, а на Каме, наоборот, увеличение на 3%, на Дону отмечено их снижение на 7 и 14%, на Кубани на 17 и 29% при ГП на 1.5 и 2°C соответственно. Увеличение количества жидких осадков в бассейне Кубани <5%, в бассейне Дона составляет ~10%, Северной Двины – 8 и 15%, Волги – 11 и 16%, Печоры – 18 и 29% при ГП на 1.5 и 2°C соответственно.

При ГП на 1.5 и 2°C годовой сток Северной Двины сократится на 11%, Волги – на 10–11% (снижение на 17–20% отмечено для Оки и Верхней Волги, в то время как для Камы – только на 1–5%), Дона – на 21 и 24%, Кубани – на 9 и 22%,

а Печоры, наоборот, – увеличится на 5 и 7% соответственно (рис. 4). При этом по изменениям сезонного стока картина достаточно пестрая: значительный рост зимнего стока Северной Двины (30–50%), Печоры (50–80%), Верхней Волги (30–40%), меньший рост на Оке (12–19%) и Каме (17–29%) при слабой изменчивости для Дона и Кубани, снижение стока за период весеннего половодья на Северной Двине (10–15%), Верхней Волге, Оке и Дону (30–40%), Каме (8–10%) при слабой изменчивости для Печоры и Кубани, снижение летне-осеннего стока Северной Двины, Верхней Волги, Оки и Дона (35–40%), Печоры и Камы (8–13%) и Кубани (25–45%). ГП с 1.5 до 2°C наиболее

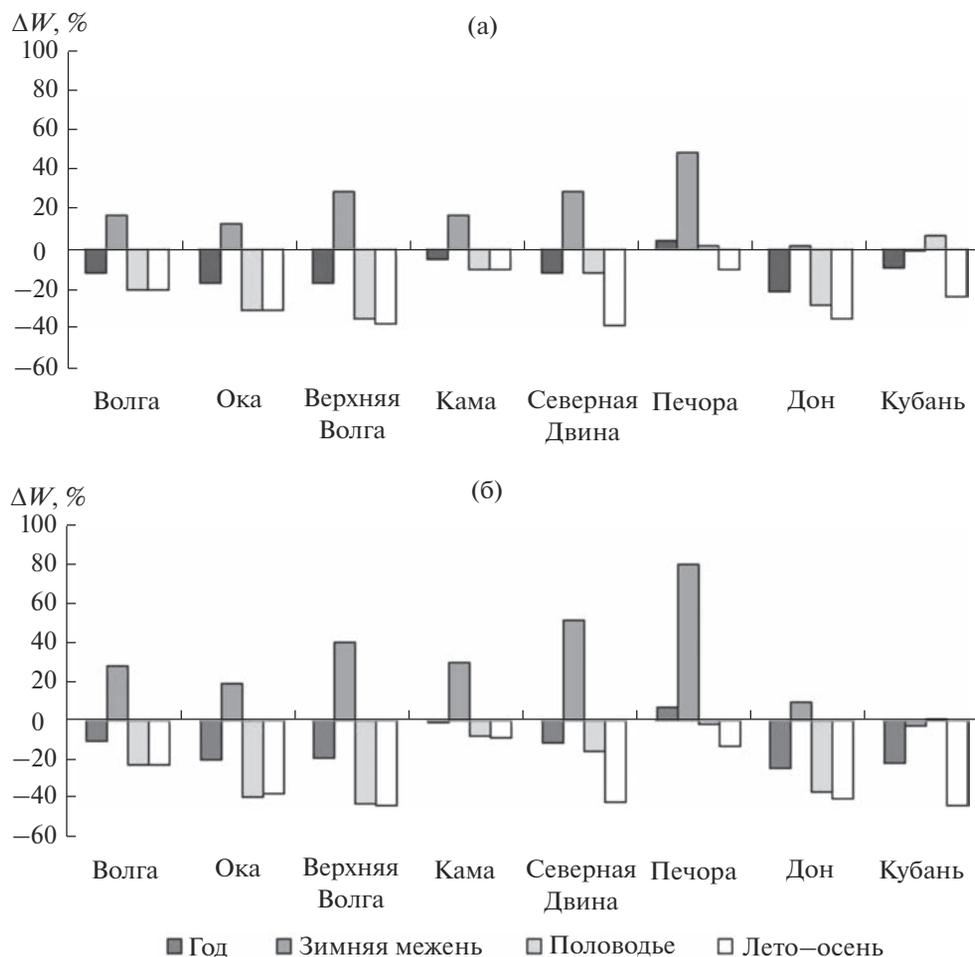


Рис. 4. Аномалии годового и сезонного стока Волги, Оки, Верхней Волги, Камы, Северной Двины, Печоры, Дона и Кубани при ГП на 1.5°C (а) и 2°C (б) в XXI в. относительно периода 1970–1999 гг.

сильно влияет на темп сокращения годового стока Кубани за счет летне-осеннего периода, что объясняется значительным уменьшением осадков и доли ледникового питания реки, и стока Оки, Дона и Верхней Волги – за период весеннего половодья; а также – на темп увеличения зимнего стока Северной Двины, Печоры и в бассейне Волги за счет увеличения периода оттепелей. При ГП на 1.5 и 2°C средние максимальные запасы воды в снежном покрове уменьшатся в бассейне Дона на 24–32%, Волги и Кубани – на 14–20%, а в бассейнах северных рек – Северной Двины и Печоры – на 7–14 и 2–7% соответственно. В связи с потеплением уменьшение средней глубины сезонного промерзания почвогрунтов оказалось в пределах 10 см в бассейнах Северной Двины, Волги и Кубани, в диапазоне 10–20 см – в бассейнах Печоры и Дона.

Описанные выше аномалии сезонного перераспределения стока приводят к снижению высокого стока Q_{10} , %: Камы на 7–9, Северной Двины – на 11–13, Кубани – на 10–20, Дона – на 23–27,

Оки и Верхней Волги – на 30 – при неизменной величине для Печоры при реализации обоих сценариев ГП (рис. 5). Наибольший контраст между сценариями ГП отмечен для Кубани. При этом низкий сток Q_{90} Северной Двины увеличится на 15–20, Печоры – на 10–30, Волги – на 14–15% в основном за счет роста стока Камы на 38–42%; и, наоборот, уменьшится на Дону на 15–25% с ростом величин при интенсификации потепления (рис. 5). Для низкого стока Кубани отмечен противоположный эффект: рост на 12% при ГП на 1.5°C и снижение на 12% при ГП на 2°C. При ГП на 1.5 и 2°C коэффициент стока Северной Двины уменьшится на 0.09–0.1, Печоры – на 0.05–0.06, Дона – на 0.03–0.04, Кубани – на 0.03–0.06, Волги – на 0.07, при этом на Верхней Волге – на 0.1, на Каме – на 0.05 (рис. 6). Это говорит о том, что несмотря на увеличение количества осадков, роль испарения в водном балансе исследуемых речных бассейнов будет только возрастать.

Расчеты с использованием критерия Манна-Уитни показали статистически значимые (на

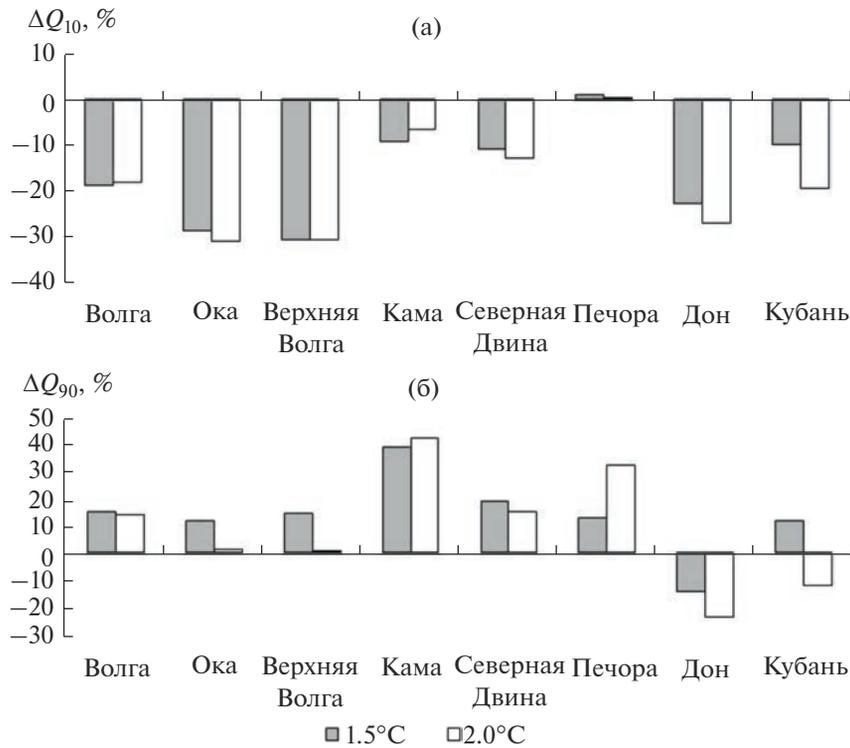


Рис. 5. Аномалии высокого (а) и низкого (б) стока Волги, Оки, Верхней Волги, Камы, Северной Двины, Печоры, Дона и Кубани при ГП на 1.5 и 2°C в XXI в. относительно периода 1970–1999 гг.

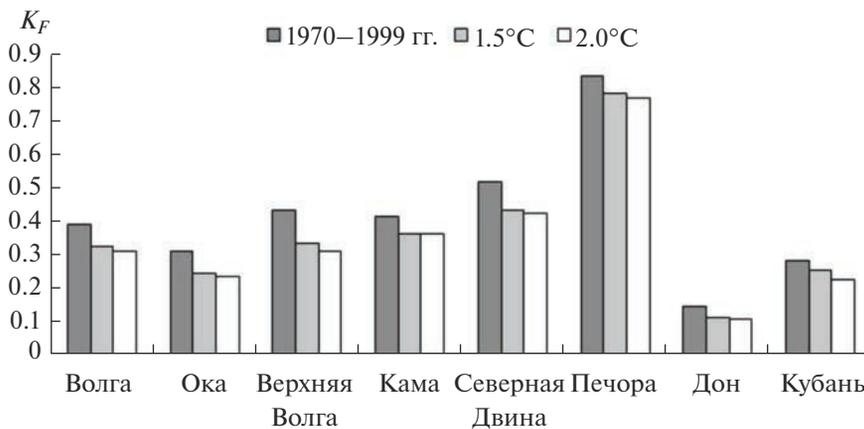


Рис. 6. Коэффициент стока Волги, Оки, Верхней Волги, Камы, Северной Двины, Печоры, Дона и Кубани за базовый период 1970–1999 гг. и при ГП на 1.5 и 2°C в XXI в.

5%-м уровне) изменения годового стока Северной Двины, Дона, Волги в целом, Оки и Верхней Волги при ГП на 1.5 и 2°C, а также Печоры и Кубани при ГП на 2°C. Статистически незначимыми стали аномалии зимнего стока Дона и Оки при сценарии потепления на 1.5°C, зимнего стока Кубани и летне-осеннего стока Камы при обоих сценариях, а также стока за период весеннего половодья на Кубани и Каме при ГП на 1.5 и 2°C соответственно.

При оценке пространственно-временной изменчивости годового слоя стока по сценариям ГП на 1.5 и 2°C в бассейне Северной Двины наибольшее снижение стока отмечено для верховьев Сухоны и Ваги на 25 и 30% соответственно при почти отсутствии изменений для верховьев Вычегды. Для большей части бассейна Печоры отмечена положительная аномалия стока – в основном на 5–10% – с наибольшими величинами для р. Усы и верховьев Печоры и наименьшими – для рек

Цильмы и Ижмы. Изменения слоя стока в бассейне Дона весьма контрастные: наибольшее (30–60%) сокращение стока соответствует р. Битюг, среднему течению Хопра и левобережным притокам Цимлянского водохранилища, а наименьшие величины (до 10–20%) – на р. Чир и Дону от гидророста Казанская до Цимлянского водохранилища. Темп относительного снижения слоя стока в бассейне Кубани возрастает от горной территории к равнинной с наибольшими величинами в среднем и нижнем течении р. Лабы и в среднем течении Кубани. При ГП на 1.5°C на большей части бассейна Волги до впадения Камы отмечены отрицательные аномалии – на 10–20%, в бассейне Камы – в основном до 10%, а наибольшие величины – до 40% – в среднем и нижнем течении Оки. Увеличение слоя стока на величину до 10% характерно для верховьев р. Самары и горных водосборов: Вишеры, Чусовой, верховьев рек Уфы и Белой. При реализации сценария ГП на 2°C по сравнению с 1.5°C в бассейне Волги отмечается схожее распределение изменения слоя стока и увеличение контраста аномалий. Так, увеличивается площадь территории с положительными аномалиями стока, включая весь бассейн Самары, почти весь водосбор Камского водохранилища и большую часть бассейна р. Белой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что модели формирования стока настраивались для каждого из пяти бассейнов целиком с единым набором параметров, показано, что они адекватно описывают пространственную неоднородность климатических условий и разнообразие физических механизмов стокообразования на огромной территории ЕЧР. В целом при ГП на 1.5 и 2°C величины относительного изменения годового стока рек ЕЧР возрастают с С на Ю и с В на З, т. е. гидрологические системы в более мягком климате оказались чувствительнее к изменению метеорологических характеристик. Наибольшие отрицательные аномалии слоя стока отмечены в юго-западной части бассейна Северной Двины, средней части бассейна Дона, относительно равнинной части бассейна Кубани и на р. Мокше в бассейне Волги, в том время как для северной и восточной частей бассейна Печоры и рек бассейна Волги, стекающих со склонов Урала, характерна положительная аномалия стока.

При ГП на 1.5 и 2°C оценка аномалий стока ЕЧР показала следующие общие признаки: увеличение зимнего стока северных рек и в бассейне Волги, уменьшение весеннего талого стока на Северной Двине, Волге и Дону, снижение летне-осеннего стока всех исследуемых рек различной степени интенсивности. Годовой сток Печоры будет иметь положительную тенденцию, а сток

Северной Двины, Волги, Дона и Кубани – отрицательную. При текущем процессе естественного зарегулирования стока рек бассейна Волги [21] и его спрогнозированное усиление в будущем для всех исследованных рек, за исключением Печоры, очевидно, возникнет дополнительная необходимость адаптации действующих правил регулирования стока Волжско-Камским каскадом ГЭС, а также Цимлянским и Краснодарским гидроузлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
2. Гельфан А.Н., Гусев Е.М., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г., Насонова О.Н., Миллионщикова Т.Д., Фролова Н.Л. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. Ч. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в XXI веке // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 270–285.
3. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. О проблеме тестирования гидрологической модели для оценки влияния изменений климата на речной сток // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 77–85.
4. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Миллюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 214 с.
5. Георгиади А.Г., Миллюкова И.П., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 651–662.
6. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Пространственно-временные изменения характеристик экстремального стока рек бассейна Волги // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 8–16.
7. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С.М. Семенова М.: НИЦ Планета, 2012. С. 53–87.
8. Гидрологические изменения / Под ред. В.М. Котлякова, Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабановой // Вопросы географии. Т. 145. М.: ИД Кодекс, 2018. 432 с.
9. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 581–588.
10. Калужный И.Л., Лавров С.А. Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата // Метеорология и Гидрология. 2012. № 1. С. 68–81.

11. Крыленко И.Н., Голосной Д.А., Григорьев В.Ю., Захарова Е.А., Фролова Н.Л. Оценка суммарных влагозапасов в бассейнах рек севера ЕТР на основе модели формирования стока и спутниковых данных // Тр. VIII науч.-практ. конф. MARESEDU. Т. I. Тверь: ПолиПРЕСС, 2020. С. 253–255.
12. Крыленко И.Н., Голосной Д.А., Жук В.А. Оценка притока воды в Белое море с территории бассейнов рек Онеги и Северной Двины на основе модели формирования стока // Тр. VII науч.-практ. конф. MARESEDU. Т. I. Тверь: ПолиПРЕСС, 2019. С. 163–171.
13. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Пространственная модель формирования тало-дождевого стока горной реки (на примере верхней Кубани) // Метеорология и гидрология. 2010. № 12. С. 76–87.
14. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н., Романов П.Ю. Использование спутниковой информации для предвычисления гидрографа талого стока // Метеорология и гидрология. 2011. № 9. С. 86–96.
15. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
16. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги, Камы, Нижней Волги / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ГГИ, 2015.
17. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Поваляшников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20.
18. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек по данным наблюдений // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.
19. Bugaets A., Gartsman B., Gelfan A., Motovilov Y., Sokolov O., Gonchukov L., Kalugin A., Moreido V., Suchilina Z., Fingert E. The integrated system of hydrological forecasting in the Ussuri River basin based on the ECOMAG Model // Geosci. 2018. V. 8. № 5. P. 1–12.
20. Frieler K., Lange S., Piontek F., Reyher C., Schewe J., Warszawski L., Zhao F., Chini L., Denvil S., Emanuel K. Assessing the impacts of 1.5°C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) // Geosci. Model Dev. 2017. V. 10. P. 4321–4345.
21. Frolova N.L., Agafonova S.A., Kireeva M.B., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.M. Recent changes of annual flow distribution of the Volga basin rivers // Geogr. Environ. Sustainability. 2017. V. 10. № 2. P. 28–39.
22. Gelfan A., Kalugin A. Permafrost in the Caspian basin as a possible trigger of the late khvalynian transgression: testing hypothesis using a hydrological model // Water Resour. 2021. V. 48. P. 831–843.
23. Gelfan A., Kalugin A., Krylenko I., Nasonova O., Gusev Y., Kovalev E. Does a successful comprehensive evaluation increase confidence in a hydrological model intended for climate impact assessment? // Climate Change. 2020. V. 163. P. 1165–1185.
24. Georgievsky M., Golovanov O., Balonishnikova Z., Timofeeva L. Changes in river water resources of the Russian Federation's economic regions forecasted based on the CMIP5 runoff data // Ecohydrol. Hydrobiol. 2021. V. 21. P. 669–682.
25. Kalugin A. Climate change attribution in the Lena and Selenga River runoff: an evaluation based on the Earth system and regional hydrological models // Water. 2022. V. 14 (1). № 118. P. 1–18.
26. Kalugin A. Future climate-driven runoff change in the large river basins in Eastern Siberia and the Far East using process-based hydrological models // Water. 2022. V. 14 (4). № 609. P. 1–22.
27. Kalugin A. Hydrological and meteorological variability in the Volga River basin under global warming by 1.5 and 2 degrees // Climate. 2022. V. 10 (7). № 107. P. 1–23.
28. Kalugin A. Process-based modeling of the high flow of a semi-mountain river under current and future climatic conditions: a case study of the Iya River (Eastern Siberia) // Water. 2021. V. 13. № 1042. P. 1–19.
29. Kalugin A. The impact of climate change on surface, subsurface and groundwater flow: a case study of the Oka River (European Russia) // Water Resour. 2019. V. 46. P. S31–S39.
30. Kalugin A., Motovilov Y. Runoff formation model for the Amur River basin // Water Resour. 2018. V. 45. P. 149–159.
31. Kireeva M., Frolova N., Rets E., Samsonov T., Entin A., Kharlamov M., Telegina E., Povalishnikova E. Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period // Int. J. River Basin Manag. 2020. V. 18. P. 491–502.
32. Kireeva M.B., Frolova N.L., Winde F., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.M. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards // Geography, environment, sustainability. 2016. V. 9. № 4. P. 33–47.
33. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. Modeling of extreme hydrological events in the Baksan River basin, the Central Caucasus, Russia // Hydrology. 2021. V. 8. № 24. P. 1–24.
34. Krylenko I., Alabyan A., Aleksyuk A., Belikov V., Sazonov A., Zavyalova E., Pimanov I., Potryasaev S., Zelenkov V. Modeling ice-jam floods in the frameworks of an intelligent system for river monitoring // Water Resour. 2020. V. 47. P. 387–398.
35. Krysanova V., Hattermann F. Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results // Clim. Change. 2017. V. 141. P. 363–379.
36. Lange S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) // Geosci. Model Dev. 2019. V. 12. P. 3055–3070.
37. Lobanova A., Liersch S., Nunes J.P., Didovets I., Stagl J., Huang S., Koch H., Rivas Lopez M.D.R., Maule C.F., Hattermann F., Krysanova V. Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across Europe-

- an river basins // *J. Hydrol. Regional Studies*. 2018. V. 18. P. 15–30.
38. *Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H., Roberts D., Skea J., Shukla P., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R.* Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2018. 616 p.
39. *Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev E.E., Ayzel G.V., Panysheva K.M.* Projecting changes in Russian northern river runoff due to possible climate change during the 21st century: a case study of the Northern Dvina, Taz and Indigirka rivers // *Water Resour.* 2019. V. 46. № S1. P. S145–S154.
40. *Renssen H., Lougheed B., Aerts J., de Moel H., Ward P., Kwadijk J.* Simulating long-term Caspian Sea level changes: the impact of Holocene and future climate conditions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 261. P. 685–693.
41. *Rets E.P., Durmanov I.N., Kireeva M.B., Smirnov A.M., Popovnin V.V.* Past ‘peak water’ in the North Caucasus: deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges // *Climate Change*. 2020. V. 163. P. 2135–2151.
42. *Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S.* Future changes in peak river flows across Northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // *Clim. Dyn.* 2018. V. 50. P. 215–230.