

УДК 556.5

МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА В БАССЕЙНЕ КАСПИЯ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ТРИГГЕР ПОЗДНЕЙ ХВАЛЫНСКОЙ ТРАНСГРЕССИИ: ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА¹

© 2021 г. А. Н. Гельфан^{a, b}, А. С. Калугин^{a, *}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва 119333 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, 119333 Россия

*e-mail: andrey.kalugin@iwp.ru

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 05.03.2021 г.

Принята к публикации 30.03.2021 г.

Количественно оценена физическая обоснованность гипотезы, объясняющей палеогеографические данные об экстремально высокой водности рек на водосборе Каспийского моря в период формирования позднихвалынской трансгрессии распространением на этом водосборе послеледниковой многолетней мерзлоты, которая могла способствовать снижению впитывающих свойств почвогрунтов, уменьшению суммарного испарения и росту речного стока. Оценка выполнена путем численных экспериментов с физико-математической моделью формирования стока Волги, разработанной на базе информационно-моделирующего комплекса ЕСОМАГ. Проведено две серии экспериментов, имитирующих глубокое промерзание почвогрунтов на всей территории современного водосбора Волги и отличающихся описанием процесса сезонного оттаивания мерзлых почвогрунтов: с учетом их оттаивания в течение теплого (летне-осеннего) сезона и формирования сезонного слоя (1), в отсутствие сезонного оттаивания путем задания заниженных значений коэффициента теплопроводности почв (2). Если предполагать, что климатические условия на современной территории водосбора Волги в период формирования позднихвалынской трансгрессии Каспия были близки к современным, то повышенная по сравнению с современной водность рек может быть отчасти объяснена распространением на этом водосборе послеледниковой многолетней мерзлоты. Вместе с тем увеличение нормы стока при сезонном оттаивании мерзлых почвогрунтов оказывается порядка 20% (коэффициент стока вырастает с 0.36 до 0.44) и не соответствует огромному притоку (>450 км³/год), оцененному по палеогеографическим данным. Приток, на 85% больший рассчитанного, при современных климатических условиях (рост коэффициента стока до 0.67) может быть сформирован в отсутствие сезонного оттаивания мерзлого водосбора, т.е. при пониженной по сравнению с современной температуре воздуха.

Ключевые слова: Волга, речной сток, позднеледниковье, Хвалынская трансгрессия, мерзлота, Каспийское море.

DOI: 10.31857/S0321059621060067

ВВЕДЕНИЕ

Современные палеогеографические данные дают основания утверждать (монография [18] и содержащиеся в ней ссылки), что в позднеледниковье, как и в течение всей валдайской ледниковой эпохи, амплитуда колебаний уровня Каспия

составляла десятки метров, что в разы превышает колебания уровня моря в голоцене. Раннехвалынская и позднехвалынская трансгрессивные стадии Каспия характеризовались максимальными уровнями моря порядка +50 и 0 м абс. соответственно, что на 80 и 30 м выше современного уровня. Предмет настоящего исследования – причины формирования позднихвалынской трансгрессии.

Физические механизмы, климатические или иные, которые могли стать причиной позднихвалынской трансгрессии моря, не установлены. Тектонические факторы, ввиду отсутствия признаков существенных деформаций дна и берего-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (результаты для современных условий формирования стока в бассейне Волги получены в рамках работ по проекту 20-77-00077, результаты для условий дополнительного промерзания почвогрунтов получены в рамках работ по проекту 19-17-00215) и в рамках темы 0147-2019-0001 Государственного задания ИВП РАН (подготовка данных для модели формирования стока).

вой линии моря в позднем плейстоцене, считаются несущественными [34]. Маловероятным представляется столь высокий подъем уровня моря и за счет собственных колебаний при современных соотношениях составляющих водного баланса [43]. При этом в долинах рек южного склона Русской равнины, в том числе в бассейне Волги, распространены следы древних русел, морфометрические параметры которых на порядок превышают размеры современных русел и которые могли быть сформированы палеореками, значительно большими по водности, чем современные [10–12, 14, 15]. Геоморфологический метод оценки речного стока [12, 15, 38], а также независимые палеогеографические методы реконструкции [13, 36] показали, что годовой сток древних рек Русской равнины мог быть в 2–4 раза больше современного. Эта величина близка к оценке притока речных вод в Каспий, рассчитанной для максимального уровня позднехвалынской трансгрессии моря и составляющей 450–500 км³/год [38, 43], т. е. в 1.6–1.7 раза выше современного речного притока в море, оцениваемого в 288 км³/год [1]. Приведенные оценки показывают, что гипотезы формирования позднехвалынской трансгрессии могут быть сведены к рассмотрению возможных источников, двукратно увеличивающих водность рек на водосборной площади Каспийского моря [13, 14, 16, 43].

Вопрос о возможных источниках столь значительной дополнительной водности рек остается открытым. Так, реконструкции климата с помощью ансамбля моделей PMIP1 (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project 1) [25] показывают, что осадки на Русской равнине в рассматриваемый период палеовремени были не выше современных [39, 43]. Вклад талых ледниковых вод в повышение водности рек бассейна Каспия также оценивается для позднеледниковья как малозначимый [12, 16, 35, 40]. Не находят подтверждения палеогеографическими данными и гипотезы о существенных изменениях площади водосбора Верхней Волги и Оки и переливах ледниково-подпрудных вод из соседних бассейнов (например, [35, 38]).

В работах [28, 38] сделано предположение, что водность рек в бассейне Каспия могла существенно превышать современную из-за распространения в бассейне послеледниковой многолетней мерзлоты, которая способствовала снижению потерь стока на инфильтрацию в мерзлые почвы и испарения с поверхности бассейна. Это предположение пока не подтверждено количественными оценками во многом потому, что существующие модели климата — основной инструмент ретроспективных расчетов водного баланса Каспия и его бассейна — используют упрощенные параметризации процессов гидрологического цикла

суши и не учитывают влияние мерзлых пород на формирование речного стока [28]. Вместе с тем возможности количественной оценки предполагаемого роста стока древних рек бассейна Каспия вследствие распространения в нем многолетней мерзлоты существуют и связаны с использованием физико-математических моделей гидрологического цикла суши. Такие модели, описывающие гидрологические процессы с учетом их многообразия на огромной водосборной площади Каспийского моря, позволяют провести численные эксперименты с заданием разных характеристик подстилающей поверхности и воспроизвести физически осуществимые условия формирования речного стока, отличающиеся от современных. Оценка значимости эффекта гипотетического распространения многолетней мерзлоты с помощью физико-математической модели формирования речного стока с современного водосбора р. Волги составляет цель настоящего исследования.

Статья построена следующим образом. Ниже дан краткий обзор современных подходов к моделированию стока р. Волги и гидрологических изменений в бассейне Каспийского моря. В разделе “Методы исследования” представлена разработанная модель формирования стока р. Волги и описана организация численных экспериментов для воспроизведения условия распространения в бассейне многолетнемерзлых пород в послеледниковый период. В последних разделах описаны результаты испытаний модели и численных экспериментов, предложена интерпретация полученных результатов, представлены основные выводы.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТОКА ВОЛГИ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В БАССЕЙНЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Сток Волги составляет 80% суммарного притока воды в Каспийское море, и его вариации вносят основной вклад в изменения уровня моря на климатических масштабах времени [4, 7, 17, 27]. Основными инструментами оценки современного водного режима Волги, а также возможных изменений речного стока в XXI в. служат модели климата. В ряде публикаций использовались модели климата, включающие в себя модули, которые описывают колебания уровня Каспийского моря за период инструментальных наблюдений, и делается попытка построения траекторий колебаний уровня моря в XXI в. [20, 21, 41]. В серии публикаций [19, 30, 32, 33] реконструируются изменения палеоклимата, гидрологические изменения на водосборе Каспия, колебания уровня моря с раннего голоцена до настоящего времени и прогнозируются гидрологические изменения в XXI в.

на основе системы моделей, которая включает в себя: концептуальную гидрологическую модель STREAM, глобальную модель климата промежуточной сложности ECVilt-CLIOVECODE и воднобалансовую модель колебаний уровня моря. Авторам удалось получить удовлетворительные результаты по воспроизведению уровня Каспия за рассматриваемый период, однако гидрологические блоки используемых моделей не позволяют всесторонне исследовать факторы колебаний уровня моря. Оценки вариаций уровня Каспия по выходным данным глобальных моделей климата о стоке рек его бассейна выполнялись в рамках экспериментов CMIP5 и PMIP3 для периодов позднего плейстоцена и голоцена в работе [27].

Помимо применения моделей климата известны попытки моделирования современного стока Волги с помощью глобальных гидрологических моделей, в структуре которых содержатся модули учета регулирования стока каскадом водохранилищ [23, 24, 37, 42]. Концептуальные гидрологические модели стока р. Волги, предназначенные для расчетов стока с декадным и месячным временным разрешением, предложены в работах [2, 3]. Описание процессов гидрологического цикла в перечисленных гидрологических моделях построено на весьма грубых упрощающих допущениях, а полученные с их помощью оценки водного режима содержат значительную неопределенность.

Перспективы исследования процессов формирования речного стока, построения физически обоснованных сценариев возникновения критических состояний гидрологических систем связаны с использованием физико-математических гидрологических моделей с распределенными параметрами [6, 9]. Значения большинства параметров физико-математических моделей могут быть либо заданы из физических соображений, либо найдены с помощью эмпирически установленных соотношений измеряемых характеристик рельефа, почв, растительности и других свойств речного водосбора. Это обстоятельство в сочетании с физической обоснованностью структуры физико-математических моделей создает принципиальную возможность постановки с их помощью сценарных экспериментов в широком диапазоне изменений внешних по отношению к гидрологической системе условий и ее внутренних свойств, получения на базе этих экспериментов обоснованных оценок водного режима рек в изменившихся условиях. Первый успешный пример построения физико-математической модели формирования речного стока в бассейне Волги содержится в работе [8]. Автору удалось на базе разработанного им геоинформационно-моделирующего комплекса ECOMAG [31] построить модель, описывающую динамику пространственных полей гидрологических переменных (речно-

го стока, снеготранспозитов, влажности почвы) для частных водосборов водохранилищ Волжско-Камского каскада. Эта модель усовершенствована в [5], и ее текущая версия позволяет рассчитывать сток рек и другие гидрологические переменные на всей площади бассейна по метеорологическим данным за многолетний период с единым набором параметров, определенным из открытых глобальных баз данных о характеристиках рельефа, почв, растительного покрова. Указанная версия модели является инструментом настоящего исследования и описана в следующем разделе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ: МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ВОЛГИ И ОРГАНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Использованная в численных экспериментах физико-математическая модель формирования стока в бассейне р. Волги [5, 26] построена на базе геоинформационно-моделирующего комплекса ECOMAG. Модели, построенные на базе этого комплекса, в течение многих лет успешно применяются для решения разнообразных исследовательских и прикладных задач на водосборах площадью от десятков до миллионов квадратных километров, расположенных в разных природных условиях [9].

Модель формирования стока р. Волги позволяет по данным метеорологических наблюдений на сети мониторинга Росгидромета описать пространственное распределение по территории водосбора процессов формирования и таяния снежного покрова, эвапотранспирации, вертикального тепло- и влагопереноса в зоне аэрации почвы, стекание воды по склонам водосбора, подповерхностный (внутрипочвенный) и грунтовый сток, движение воды в речной системе. Характеристики перечисленных процессов рассчитываются с суточным шагом по времени и пространственным разрешением, равным размеру ячейки неравномерной расчетной сетки (775 элементов со средней площадью ячейки 1760 км²). Схематизация бассейна Волги, выполненная по цифровой модели рельефа HYDRO1k с разрешением 1 км, показана на рис. 1.

Большая часть пространственно распределенных параметров модели – измеряемые характеристики речного бассейна, которые задаются из баз данных о рельефе, свойствах почв, растительности, ландшафтов. Для определения параметров модели, распределенных по площади бассейна, использованы открытые глобальные базы данных о характеристиках почв (Harmonized World Soil Database) и ландшафтов (Global Land Cover Characterization). Часть параметров калибруется по данным о расходах воды в гидрометрических

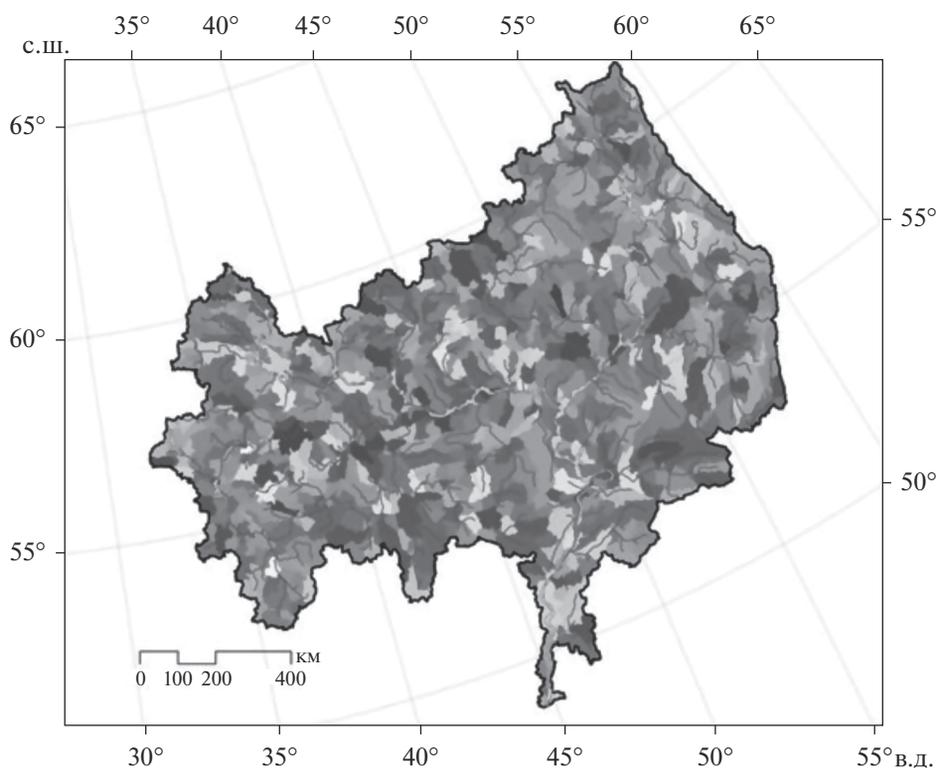


Рис. 1. Схематизация бассейна Волги с выделенными частными водосборами.

створах, расположенных на основном русле реки и ее притоках.

Для задания граничных условий при численном решении уравнений, описывающих гидрологические процессы, использованы данные о среднесуточных величинах интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, измеренных на 306 метеорологических станциях за 29-летний период (с 01.01.1986 по 31.12.2014).

Вследствие зарегулированности стока Волжско-Камским каскадом водохранилищ верификация модели выполнялась путем сравнения фактических и рассчитанных среднесуточных расходов воды в замыкающих створах основных незарегулированных притоков Волги и Камы за многолетний период. Расчеты выполнены для Оки, Белой, Вятки, Ветлуги, Суры, Верхней Волги, Унжи, а также водосбора Камского водохранилища (рис. 2).

Количественная оценка точности моделирования выполнялась путем сравнения многолетних рядов фактических и рассчитанных среднесуточных расходов воды в отдельных точках речной сети с применением критериев Нэша–Сатклифа NSE и относительной систематической погрешности PBIAS.

Калибровка параметров модели проводилась для периода 2000–2014 гг., верификация на независимом материале – для периода 1986–1999 гг.

Сток Волги оценивался по общему притоку воды к Куйбышевскому водохранилищу – крупнейшему в системе Волжско-Камского каскада с суммарной площадью водосбора 1.21 млн км², что составляет почти 90% площади бассейна Волги. Среднегодовое за последние тридцать лет среднесуточный фактический приток воды в Куйбышевское водохранилище составил ~8 тыс. м³/с, что хорошо соотносится со среднегодовой величиной стока Волги в створе Волгограда ~250 км³/год. Этот факт подтверждает правомерность оценки расчетного стока Волги по притоку к Куйбышевскому водохранилищу.

В работе [5] приведены результаты, показывающие, что разработанная модель обладает свойством робастности – устойчивости (по статистическим критериям) результатов расчета гидрографов стока, наблюдавшихся в годы с контрастными климатическими условиями. Соответствие критериям робастности рассматривается (например, в [22]) как необходимое условие применимости гидрологической модели для оценки последствий изменения климата и решения других экстраполяционных задач.

Для оценки влияния гипотетического распространения многолетней мерзлоты на сток Волги в современных климатических условиях проведены следующие численные эксперименты с помощью разработанной модели. Начальная темпера-

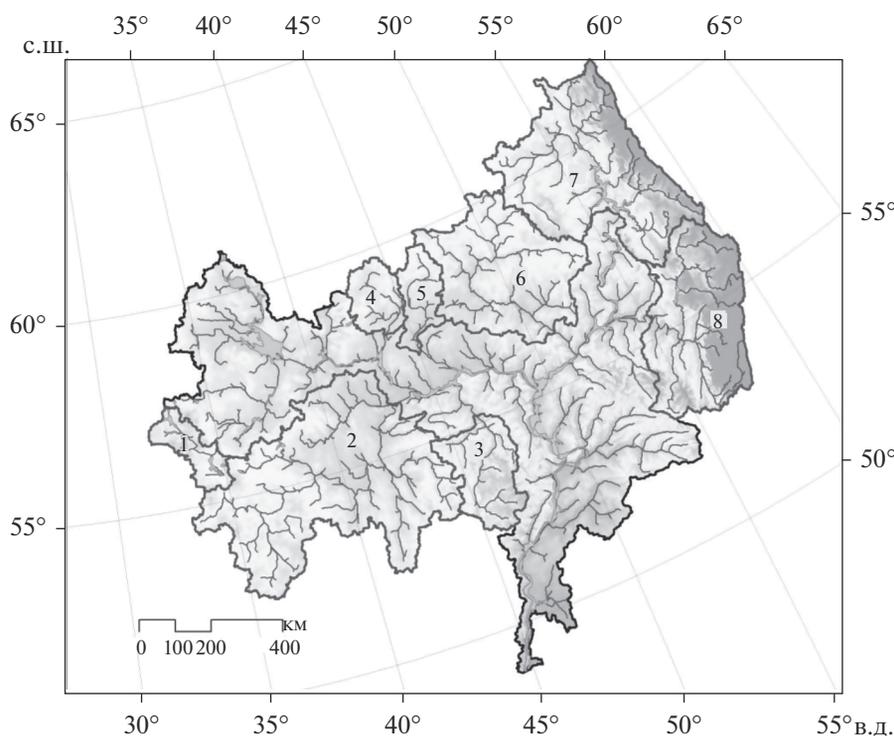


Рис. 2. Водосбор Волги с указанием расчетных створов рек, по которым проводилась калибровка модели: 1 – Волга (Старица), 2 – Ока (Горбатов), 3 – Сура (Порецкое), 4 – Унжа (Макарьев), 5 – Ветлуга (Ветлужский), 6 – Вятка (Вятские Поляны), 7 – Кама (Камская ГЭС), 8 – Белая (Бирск).

тура почвогрунтов по профилю задавалась отрицательной от поверхности до глубины затухания сезонных колебаний температуры (3 м) на всех элементах расчетной области. Затем проводился расчет водного режима бассейна по данным метеорологических наблюдений за отдельный год (например, с 1 января по 31 декабря 1986 г.). Расчет следующего года (в данном примере 1987 г.) вновь начинался с искусственного задания начальных условий глубоко промерзших почвогрунтов и т.д. Было организовано две серии численных экспериментов, которые различались описанием процесса оттаивания мерзлых почвогрунтов.

В первой серии экспериментов процесс оттаивания рассчитывался с параметрами базовой модели, заданными при ее испытаниях по данным наблюдений. В результате, на водосборе Волги, гипотетически покрытом мерзлыми породами, в течение теплого (летне-осеннего) сезона, соответствующего современному климату, почва начинала оттаивать, образовывался и углублялся сезонноталый (деятельный) слой, что приводило к увеличению впитывающей способности почв и росту потерь талых и дождевых вод на испарение.

Во второй серии экспериментов оттаивание почвы в течение летне-осеннего сезона искусственно тормозилось путем задания заниженных

значений коэффициента теплопроводности почв по сравнению с их значениями, задаваемыми в базовом варианте модели по данным о механическом составе почв водосбора. В результате почвогрунты на водосборе оставались глубоко промерзшими в течение всего теплого сезона и деятельный слой не формировался. Второй эксперимент давал возможность оценить предельный стокообразующий эффект сплошного промерзания водосбора Волги в палеовремени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены результаты проверки точности расчета стока в различных речных створах в бассейне Волги за период калибровки и верификации модели, а также за общий период 1986–2014 гг. Значения статистических критериев свидетельствуют об устойчивости модельных расчетов при переходе от одного периода к другому, и для пяти створов из восьми они соответствуют градации хороших ($NSE > 0.7$, $|PBIAS| < 10\%$). Для рек Белой и Суры, а также для Верхней Волги в створе Старицы результаты получились удовлетворительными.

На рис. 3 показаны результаты расчета фактического и модельного годового и среднего месячного стока Волги, оцененного по соответствующим объемам притока воды в Куйбышевское во-

Таблица 1. Критерии Нэша–Сатклифа NSE и относительной систематической погрешности PBIAS соответствия наблюдаемых и рассчитанных гидрографов, оцененные по данным моделирования стока рек бассейна Волги и бокового притока в Камское водохранилище за периоды калибровки (2000–2014 гг.) и верификации (1986–1999 гг.) модели (в соответствии с принятыми в гидрологических исследованиях градациями оценки качества моделирования гидрографов стока (например, [29]), результаты приняты хорошими при сочетании $NSE > 0.7$ и $|PBIAS| < 10\%$, плохими – при $NSE < 0.5$ или $|PBIAS| > 15\%$, а в остальных случаях – удовлетворительные)

Река–створ	Площадь водосбора, тыс. км ²	1986–1999 гг.		2000–2014 гг.		1986–2014 гг.	
		NSE	PBIAS, %	NSE	PBIAS, %	NSE	PBIAS, %
Ока–Горбатов	244	0.73	6.4	0.75	–6.6	0.74	–0.4
Вятка–Вятские Поляны	124	0.84	–3.1	0.89	–1.6	0.86	–2.4
Белая–Бирск	121	0.87	–12.8	0.86	–12.3	0.86	–12.6
Приток в Камское водохранилище	168	0.94	–7.1	0.93	–3.8	0.93	–5.5
Сура–Порецкое	50.1	0.50	9.8	0.59	–14.8	0.57	–4.1
Ветлуга–Ветлужский	27.5	0.86	1.0	0.87	5.7	0.86	3.3
Волга–Старица	21.1	0.66	11.7	0.67	3.7	0.66	7.6
Унжа–Макарьев	18.5	0.74	–0.5	0.72	1.0	0.73	0.2

дохранилище. Средняя погрешность расчета годового стока Волги по модели составила 5.8 км³ (2.3%), стандартная погрешность 6.8 км³. Средние относительные погрешности расчета месячного стока Волги $\leq 28\%$ (февраль). Полученные результаты (табл. 1; рис. 3) в сочетании с успешным прохождением моделью теста на робастность [5] позволяют использовать модель для оценки возможных изменений речного стока в гипотетических условиях распространения в бассейне многолетнемерзлых пород. Ниже описаны результаты численных экспериментов.

Эксперимент 1. Расчет стока с учетом оттаивания многолетнемерзлых пород в теплый период

На рис. 4 показаны относительные отклонения величин годового стока, рассчитанных при заданных гипотетических изменениях условий стокообразования, от соответствующих величин,

рассчитанных при неизменных (современных) условиях.

Из рис. 4 видно, что гипотетическое глубокое промерзание почвогрунтов приводит к росту среднееголетнего годового стока на 21%, при этом в зависимости от метеорологических условий конкретного года увеличение стока может достигать без малого 30%. Средний многолетний коэффициент стока вырос с 0.36 до 0.44 в первую очередь из-за снижения потерь стока на впитывание в теплый период года, когда, согласно расчетам при неизменных условиях стокообразования, почвогрунты становились полностью оттаившими на всем водосборе Волги.

На рис. 5 показаны изменения среднего за 1986–2014 гг. месячного стока Волги, рассчитанного в условиях описываемого эксперимента. Рис. 5 подтверждает вывод о чувствительности сезонного стока Волги к гипотетическому изменению условий стокоформирования. Наиболь-

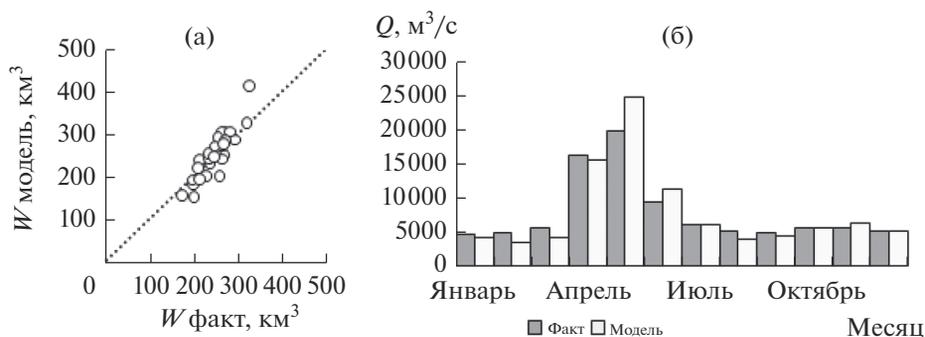


Рис. 3. Соответствие фактических и рассчитанных данных о годовом (а), среднееголетнем месячном притоке воды (б) в Куйбышевское водохранилище за период 1986–2014 гг.

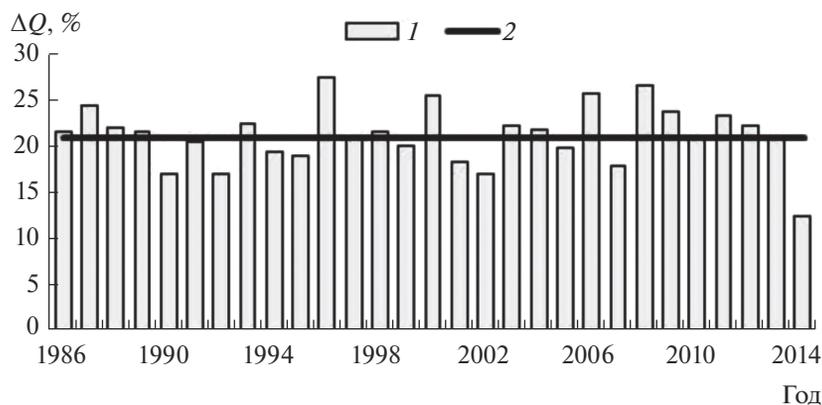


Рис. 4. Относительные изменения (%) годового стока Волги при гипотетических условиях глубокого промерзания почвогрунтов перед началом снеготаяния с их последующим оттаиванием в течение теплого сезона (1) и их среднее значение за 1986–2014 гг. (2).

ший относительный рост речного стока происходит в период с июля по сентябрь. При этом максимальный сток в период весеннего снеготаяния на глубоко промерзшей почве оказался лишь незначительно (на 6%) выше рассчитанного по базовому варианту модели.

Выводы о влиянии гипотетического распространения многолетнемерзлых пород в бассейне Волги на речной сток, полученные из анализа нормы годового (рис. 4) и среднемесячного (рис. 5) стока, подтверждает, в целом, рис. 6, на котором показана чувствительность гидрографов стока к заданному изменению условий стокообразования.

Вместе с тем, как видно из рис. 6, эти изменения могут по-разному влиять на внутригодовой водный режим реки в зависимости от метеорологических условий. Сток реки в зимние месяцы малочувствителен к глубокому промерзанию, за исключением лет с выраженными зимними оттепелями. В начале снеготаяния подъем волны половодья начинается раньше и сток на глубоко промерзшей почве растет быстрее по сравнению с таковым по базовому расчету из-за большего вклада в половодье южных частей бассейна. При базовом расчете уже в начале апреля почвы на этих территориях полностью оттаивают и потери стока на впитывание резко возрастают, чего не происходит при завышенном промерзании почвогрунтов. В зависимости от метеорологических условий отдельного года максимальный сток на глубоко промерзшей почве может формироваться намного раньше и быть заметно выше (как, например, в 1996, 1999, 2012 гг.), а может мало отличаться от рассчитанного по базовому варианту модели (как, например, в 1997, 2003, 2014 гг.). На май приходится ветвь спада половодья, и обычно она практически совпадает для двух вариантов расчета. Глубокое промерзание начиная с

середины июня приводит к росту стока по сравнению с базовым вариантом расчета, однако роль этого фактора может быть разной в зависимости от метеорологических условий конкретного года.

Таким образом, первый численный эксперимент показал, что гипотетическое глубокое промерзание почвогрунтов на всем водосборе Волги перед началом снеготаяния в сочетании с их последующим оттаиванием в течение теплого сезона может привести к росту среднемноголетнего стока Волги на 21% по сравнению с современными условиями стокообразования. Основной механизм роста речного стока – снижение потерь на впитывание воды в мерзлую почву и, как следствие, уменьшение суммарного испарения в период с июня по сентябрь, когда в современных

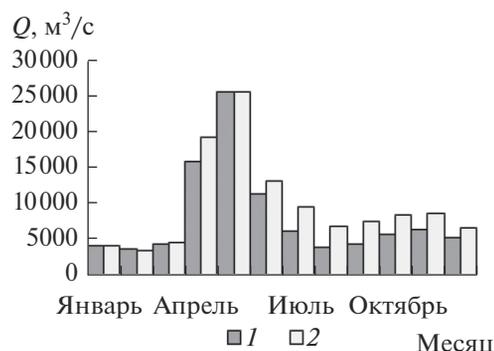


Рис. 5. Изменения многолетней нормы среднемесячного стока Волги, рассчитанного в условиях современного климата за период 1986–2014 гг.: базовый расчет при фактическом промерзании почвогрунтов перед началом снеготаяния (1); численный эксперимент 1 при гипотетических условиях глубокого промерзания почвогрунтов перед началом снеготаяния с их последующим оттаиванием в течение теплого сезона (2).

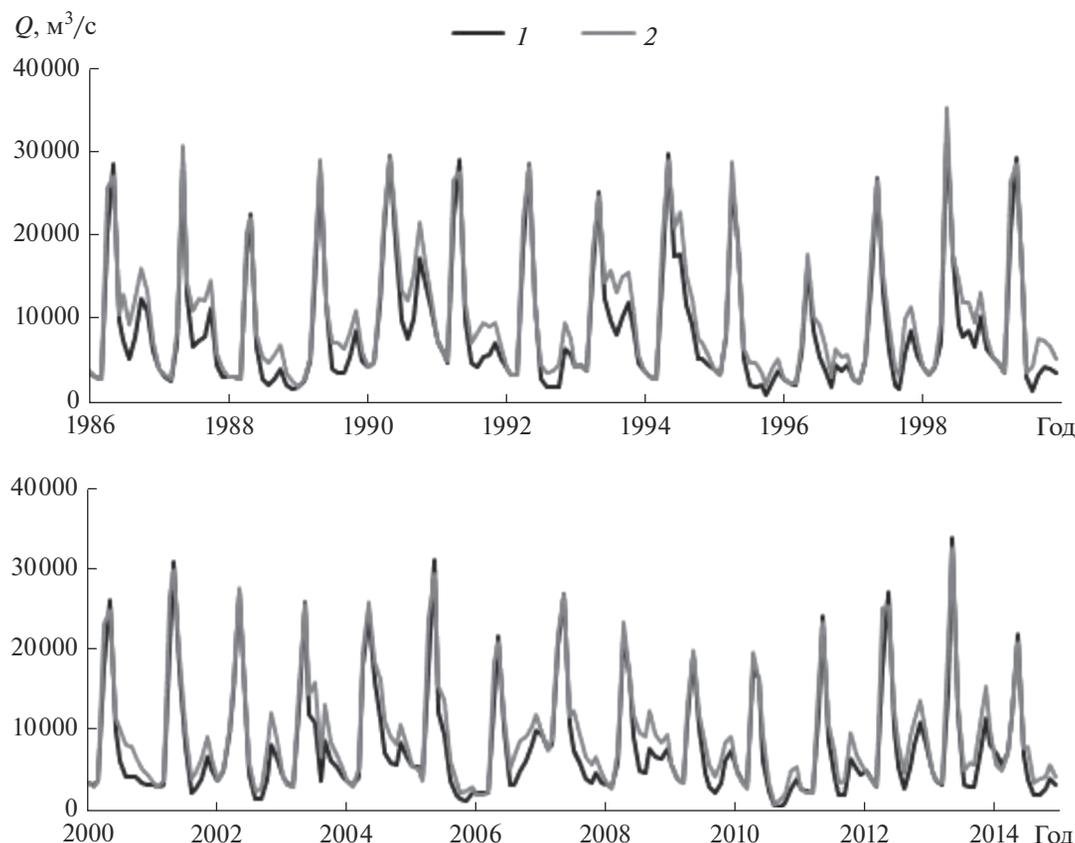


Рис. 6. Изменения среднемесячных гидрографов стока Волги: базовый расчет при фактическом промерзании почвогрунтов перед началом снеготаяния (1); численный эксперимент 1 при гипотетических условиях глубокого промерзания почвогрунтов перед началом снеготаяния с их последующим оттаиванием в течение теплого сезона (2).

метеорологических условиях почвы на всем водосборе полностью оттаивают.

Эксперимент 2. Расчет стока без учета оттаивания многолетнемерзлых пород в теплый период

Условия данного эксперимента дают возможность оценить предельно возможную величину стока Волги за счет эффекта сплошного глубокого промерзания почвогрунтов на всем водосборе при отсутствии их оттаивания, т.е. дать ответ на вопрос: в какой степени гипотетически может вырасти сток с современного водосбора Волги, покрытого многолетнемерзлыми породами, при режиме поступления на его поверхность талых и дождевых вод, соответствующем современному климату?

На рис. 7 показаны изменения среднего за период 1986–2014 гг. месячного стока Волги и стока в разных частях водосбора по сравнению с базовым расчетом. Эффект глубокого промерзания почвогрунтов на водосборе Волги в течение всего многолетнего периода оказался значительным: соответствующий этим условиям рассчитанный

объем стока Волги равен $476 \text{ км}^3/\text{год}$, что на 85% выше рассчитанного при современных условиях. Коэффициент рассчитанного годового стока вырос с 0.36 в современных условиях до 0.67 в условиях глубокого промерзания почвогрунтов, т.е. две трети объема осадков, поступающих на поверхность водосбора, который покрыт многолетнемерзлыми и не оттаивающими породами, могут сформировать речной сток. Наибольшие относительные изменения стока происходят в таких условиях с июля по ноябрь, когда почвы в неизменных условиях полностью оттаивают на всем водосборе. При этом, как видно из рис. 7, разные части водосбора одинаково реагируют на изменение условий его формирования, хотя относительные изменения стока различаются: годовой сток в бассейне Верхней Волги вырос на 77, в бассейне Оки — на 119, в бассейне Камы — на 68%.

Использованная для численных экспериментов физико-математическая модель с распределенными параметрами позволяет проанализировать пространственное распределение отклика гидрологической системы речного бассейна Волги на заданное в эксперименте изменение условий формирования речного стока. На рис. 8, 9 по-

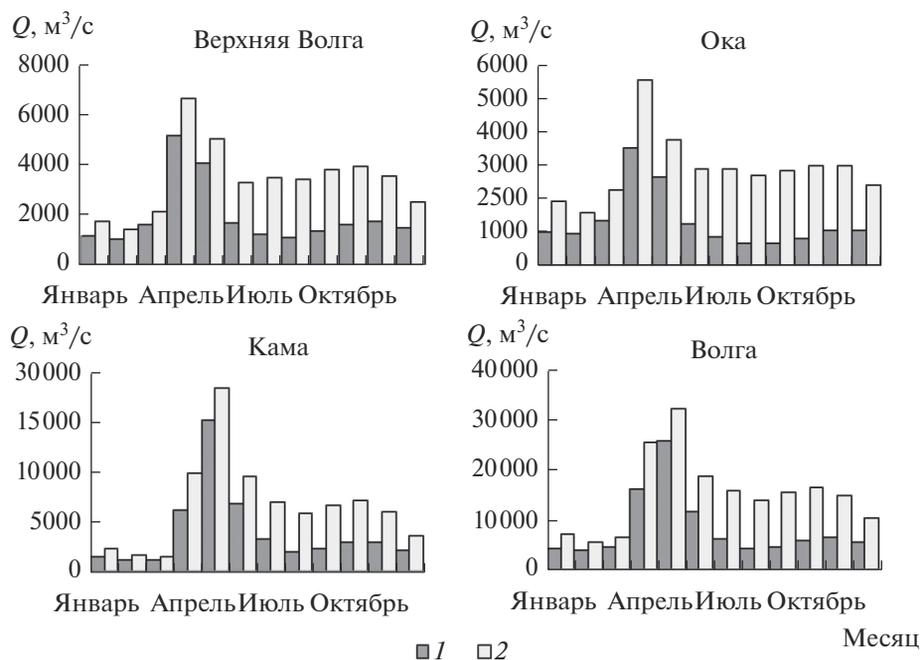


Рис. 7. Изменения многолетней нормы среднемесячного стока Волги за период 1986–2014 гг.: базовый расчет при фактическом промерзании почвогрунтов перед началом снеготаяния (1); численный эксперимент 2 при гипотетических условиях глубокого промерзания почвогрунтов перед началом снеготаяния при отсутствии их оттаивания в течение теплого сезона (2).

казаны карты изменений среднемноголетнего (за период 1986–2014 гг.) слоя стока и суммарного испарения по территории водосбора, рассчитанные при современных и гипотетических условиях формирования речного стока. Как видно из рисунков, наиболее высокий речной сток (до 600 мм/год) в бассейне Волги при наличии многолетнемерзлых и не оттаивающих пород формируется в северо-восточной части бассейна (реки Вишера, Чусовая и верховья Камы) и на других частных водосборах Верхней Волги.

Небольшие потери стока на инфильтрацию в глубоко промерзшую почву на водосборах Верхней Волги приводят к снижению влажности почвы и росту ее льдистости на этой территории. Как результат, суммарное испарение с территории водосборов Верхней Волги, покрытой многолетнемерзлыми породами, падает до ~100 мм/год, а средняя по площади водосбора Волги норма суммарного испарения при глубоком промерзании территории ≤ 200 мм/год, т.е. почти вдвое меньше суммарного испарения при неизменных условиях.

ВЫВОДЫ

Гипотетическое глубокое промерзание почвогрунтов на всей площади современного волжского бассейна приводит к росту рассчитанных величин среднемноголетнего стока Волги вследствие

уменьшения интенсивности инфильтрации воды в почву, снижения запасов почвенной влаги и суммарного испарения. Искусственное изменение условий стокоформирования по сравнению с современными приводит также к изменению внутригодового водного режима рек волжского бассейна: относительный рост дождевого стока в теплый период года оказывается больше, чем рост талого стока в зимний период и в период весеннего снеготаяния.

Глубокое промерзание почвогрунтов в сочетании с их сезонным оттаиванием в условиях современного климата увеличивает средний годовой сток Волги на ~20% (коэффициент стока вырастает с 0.36 до 0.44). Наибольший относительный рост речного стока происходит в период с июля по сентябрь, в то время как максимальный сток в период весеннего снеготаяния на глубоко промерзшей почве вырастает в среднем лишь на 6%.

Максимальный среднемноголетний сток Волги, возможный при отсутствии сезонного оттаивания многолетнемерзлых почвогрунтов и при режиме поступления на поверхность водосбора талых и дождевых вод, соответствующем современному климату, составил $476 \text{ км}^3/\text{год}$, т.е. коэффициент годового стока оказался равным 0.67, что на 85% выше рассчитанного при современных условиях. Эта величина близка к оценке притока речных вод в Каспий, рассчитанной для максимального уровня позднехвалынской трансгрес-

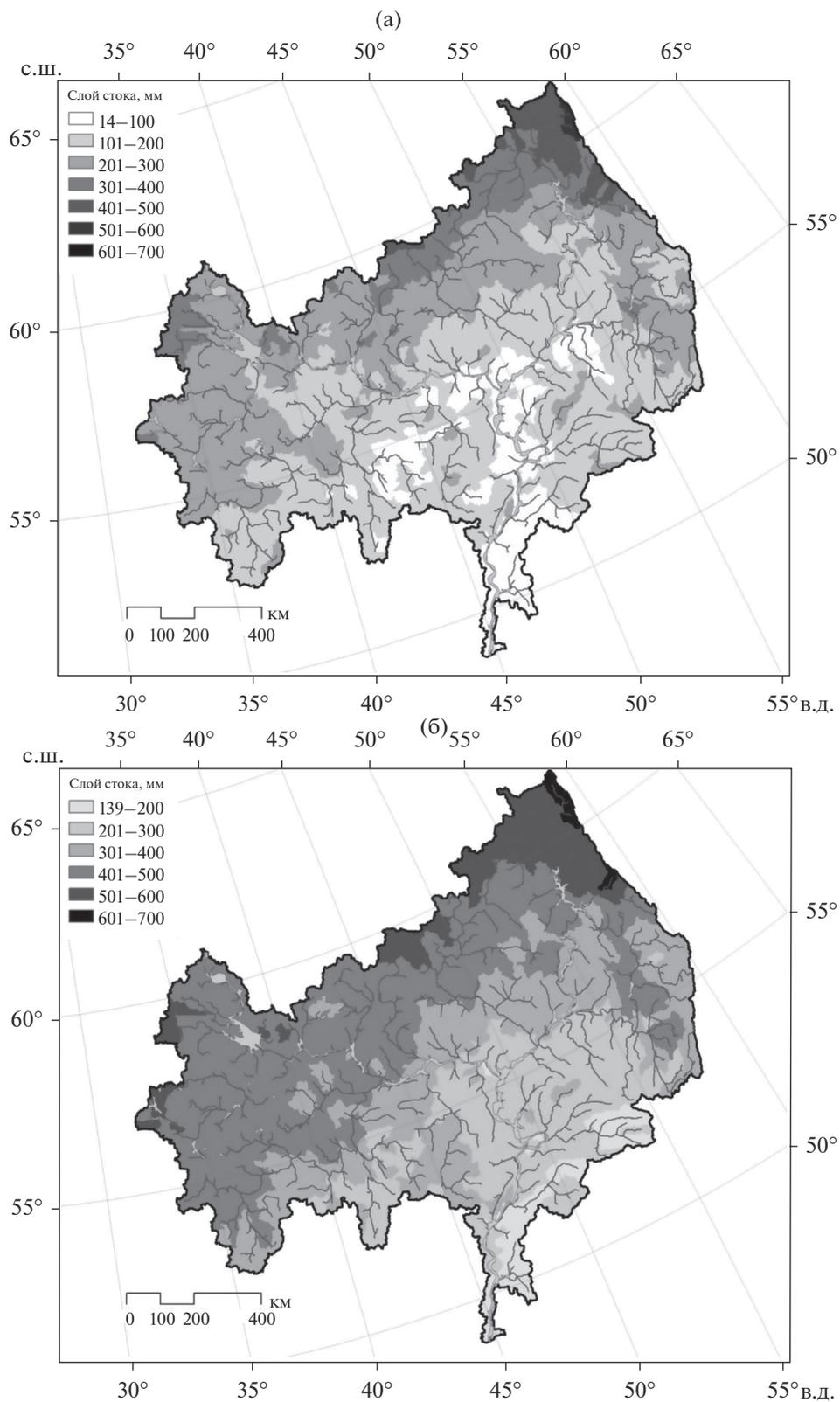


Рис. 8. Пространственное распределение среднегогодежного слоя речного стока, рассчитанного при современных условиях (а) и в гипотетических условиях глубокого промерзания водосбора р. Волги (б).

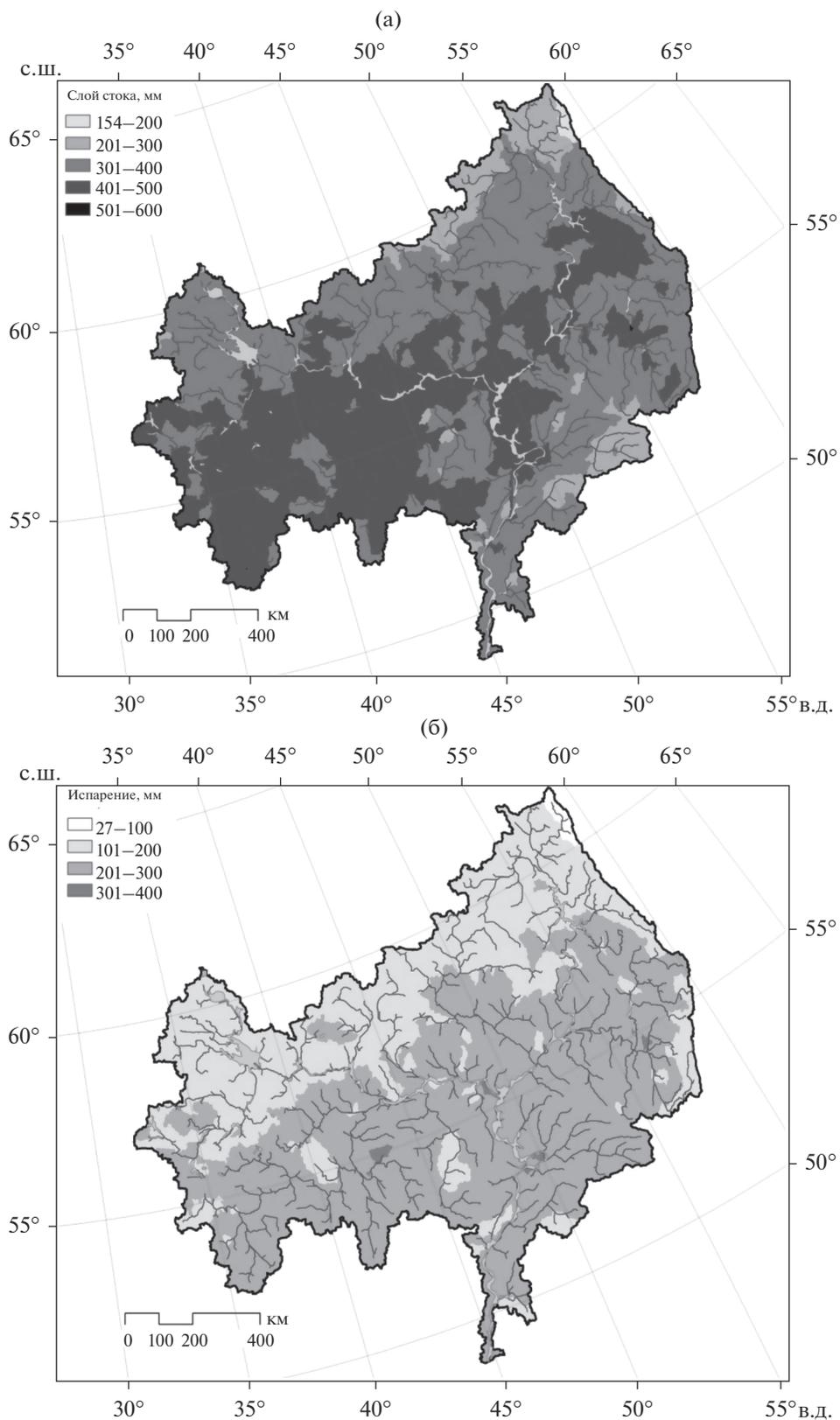


Рис. 9. Пространственное распределение среднемноголетнего слоя суммарного испарения, рассчитанного при современных условиях (а) и в гипотетических условиях глубокого промерзания водосбора р. Волги (б).

сии моря [38, 43]. При этом возможный средний слой суммарного испарения с поверхности промерзшего водосбора Волги составил 190 мм/год, т.е. вдвое ниже рассчитанного в современных климатических условиях и при отсутствии на водосборе многолетнемерзлых пород.

Слой максимально возможного речного стока, который может сформироваться в условиях глубокого промерзания современного водосбора Волги, неравномерно распределен по его площади. Наибольший возможный слой стока (до 600 мм/год) формируется в северо-восточной части бассейна (реки Вишера, Чусовая и верховья Камы) и на других частных водосборах Верхней Волги, т.е. в 2.5–3 раза выше среднего слоя стока за период 1986–2014 гг., определенного для всего водосбора Волги при современных климатических условиях.

Таким образом, если предполагать, что климатические условия на современной территории водосбора Волги в период формирования позднечувальской трансгрессии Каспия были близки к современным, то повышенная по сравнению с современной водность рек может быть отчасти объяснена распространением на этом водосборе послеледниковой многолетней мерзлоты. Вместе с тем увеличение нормы стока оказывается незначительным (~20%) и не соответствует огромному притоку (>450 км³/год), оцененному по палеогеографическим данным. Такой приток может быть сформирован при современной величине осадков в отсутствие сезонного оттаивания мерзлого водосбора, т.е. при пониженной по сравнению с современной температуре воздуха. Возможность такого сочетания климатических факторов и условий формирования стока в бассейне Каспия — предмет дальнейших исследований, требующих привлечения палеоклиматических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря: моделирование и прогноз / Под ред. *Е.С. Нестерова*. М.: Триада, 2016. 378 с.
2. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Кашутина Е.А., Барбанова 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.
3. *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.
4. *Голицын Г.С., Панин Г.Н.* О водном балансе и современных изменениях уровня Каспия // Метеорология и гидрология. 1989. № 1. С. 57–64.
5. *Калугин А.С.* Единая гидрологическая модель Волжского бассейна // Труды Всерос. науч. конф. “Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения”. М.: Студия Ф1, 2019. С. 155–160.
6. *Кучмент Л.С.* Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М., 2008. 394 с.
7. *Михайлов В.Н., Повалишников Е.С.* Еще раз о причинах изменений уровня Каспийского моря в XX веке // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 1998. № 3. С. 35–38.
8. *Мотовилов Ю.Г.* Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах // Вод. ресурсы. 2016. № 5. С. 467–475.
9. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
10. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В.* Макроизлучины рек ЕТС и проблемы палеогидрологических реконструкций // Вод. ресурсы. 1992. № 4. С. 93–97.
11. *Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Панин А.В.* Поздневалдайские палеорула рек Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2000. № 6. С. 73–78.
12. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В.* Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом. Ст. 2. Гидравлические методы реконструкции расходов палеорек // Геоморфология. 2017. № 2. С. 3–13.
13. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом. Ст. 5. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами // Геоморфология. 2019. № 1. С. 66–79.
14. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Климатические изменения стока воды рек на южном мегаклоне Восточно-Европейской равнины в позднеледниковье // Древние и современные долины и реки: история формирования, эрозионные и русловые процессы / Под ред. *Р.С. Чалова*. Волгоград: ВГПУ, 2010. С. 118–140.
15. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К., Еременко Е.А.* Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом. Ст. 3. Анализ структуры сети водотоков // Геоморфология. 2018. № 1. С. 18–32.
16. *Торопов П.А., Кислов А.В.* Моделирование вариаций стока рек Восточно-Европейской равнины в разных климатических условиях прошлого // Вод. ресурсы. 2006. № 5. С. 515–526.
17. *Фролов А.В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 171 с.
18. *Янина Т.А.* Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: МГУ, 2012. 264 с.
19. *Aerts J.C.J.H., Renssen H., Ward P.J., de Moel H., Oda-da E., Bouwer L.M., Goosse H.* Sensitivity of global river discharges under Holocene and future climate conditions // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L19401.
20. *Arpe K., Leroy S.A.G.* The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation as observed and modeled // Quat. Int. 2007. V. 173–174. P. 144–152.
21. *Elguindi N., Giorgi F.* Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional cli-

- mate model outputs // *Clim. Dyn.* 2005. V. 26. P. 167–181.
22. *Gelfan A., Kalugin A., Krylenko I., Nasonova O., Gusev Ye., Kovalev E.* Does a successful comprehensive evaluation increase confidence in a hydrological model intended for climate impact assessment? // *Clim. Change.* 2020. V. 163. P. 1165–1185.
 23. *Gosling S.N., Arnell N.W.* Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation and sensitivity analysis // *Hydrol. Proc.* 2010. V. 25. № 7. P. 1129–1145.
 24. *Haddeland I., Heinke J., Voß F., Eisner S., Chen C., Hagemann S., Ludwig F.* Effects of climate model radiation, humidity and wind estimates on hydrological simulations // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 305–318.
 25. *Joussaume S., Taylor K.* Status of the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP) // *Proc. First Int. AMIP Sci. Conf. Geneva, 1995.* P. 425–430.
 26. *Kalugin A.S.* 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. № S2. P. S31–S39.
 27. *Kislov A.V., Panin A., Toropov P.* Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations // *Quat. Int.* 2014. V. 345. P. 48–55.
 28. *Kislov A., Toropov P.* East European river runoff and Black Sea and Caspian Sea level changes as simulated within the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project // *Quat. Int.* 2007. V. 167–168. P. 40–48.
 29. *Krysanova V., Donnelly C., Gelfan A., Gerten D., Arheimer B., Hattermann F., Kundzewicz Z.W.* How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change // *Hydrol. Sci. J.* 2018. V. 63. № 5. P. 696–720.
 30. *Lougheed B.C.* Holocene climate and the Caspian Sea: a coupled climate, hydrological and sea level model approach. MSc Thesis. Amsterdam: Vrije Univ. Amsterdam, 2006. 67 p.
 31. *Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland L., Rodhe A.* Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // *Agricult. For. Meteorol.* 1999. V. 98–99. P. 257–277.
 32. *Renssen H., Goosse H., Fichefet T., Brovkin V., Driesschaert E., Wöl F.* Simulating the Holocene climate evolution at northern high latitudes using a coupled atmosphere–sea ice–ocean–vegetation model // *Clim. Dyn.* 2005. V. 24. P. 23–43.
 33. *Renssen H., Lougheed B.C., Aerts J.C.J.H., de Moel H., Ward P.J., Kwadijk J.C.J.* Simulating long-term Caspi-
an Sea level changes: The impact of Holocene and future climate conditions // *Earth Planetary Sci. Lett.* 2007. V. 261. P. 685–693.
 34. *Rychagov G.I.* Holocene oscillations of the Caspian Sea and forecasts based on palaeogeographical reconstructions // *Quat. Int.* 1997. V. 41–42. P. 167–172.
 35. *Panin A.V., Astakhov V.I., Lotsari E., Komatsu G., Lang J., Winsemann J.* Middle and Late Quaternary glacial lake-outburst floods, drainage diversions and reorganization of fluvial systems in northwestern Eurasia // *Earth-Sci. Rev.* 2020. V. 201. P. 103069.
 36. *Panin A., Matlakhova E.* Fluvial chronology in the East European plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // *Catena.* 2015. V. 130. P. 46–61.
 37. *Schmied H.M., Eisner S., Franz D., Wattenbach M., Portmann F.T., Flörke M., Döll P.* Sensitivity of simulated global-scale freshwater fluxes and storages to input data, hydrological model structure, human water use and calibration // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2014. V. 18. P. 3511–3538.
 38. *Sidorchuk A., Panin A., Borisova O.* Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period // *Geomorphol.* 2009. V. 113. № 3–4. P. 137–157.
 39. *Sima A., Kageyama M., Rousseau D.D., Ramstein G., Balkanski Y., Antoine P., Hatt C.* Modeling dust emission response to North Atlantic millennial scale climate variations from the perspective of East European MIS 3 loess deposits // *Clim. Past.* 2013. V. 9. P. 1385–1402.
 40. *Tudryn A., Leroy S.A.G., Toucanne S., Gibert-Brunet G., Tucholka P., Lavrushin Y.A., Dufaure O., Miska S., Bayon G.* The Ponto-Caspian basin as a final trap for southeastern Scandinavian ice-Sheet meltwater // *Quat. Sci. Rev.* 2016. V. 148. P. 29–43.
 41. *Turuncoglu U.U., Giuliani G., Elguindi N., Giorgi F.* Modelling the Caspian Sea and its catchment area using a coupled regional atmosphere-ocean model (RegCM4-ROMS): model design and preliminary results // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6. P. 283–299.
 42. *Veldkamp E., Zhao F., Ward P.J., de Moel H., Aerts J.C.J.H., Portmann H.M., Masaki Y., Pokhrel Y., Liu X., Satoh Y., Gerten D., Gosling S.N., Zaherpour J., Wada Y.* Human impact parameterizations in global hydrological models improve estimates of monthly discharges and hydrological extremes: a multimodel validation study // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. P. 055008.
 43. *Yanko-Hombach V., Kislov A.* Late Pleistocene and Holocene sea-level dynamics in the Caspian and Black seas: Data synthesis and paradoxical interpretations // *Quat. Int.* 2018. V. 465. P. 63–71.