

ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВОЛГИ

УДК 556.5.01

СТОК ВОЛГИ В ЭПОХИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2023 г. А. Г. Георгиади^а, *, И. П. Милюкова^а

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: georgiadi@igras.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Выявлены сходства и различия климатических условий (температуры воздуха и атмосферных осадков), годового и сезонного стока, а также гидрографов стока Волги у Волгограда в эпохи глобального потепления геологического прошлого, периода современного (начиная с 1981 г.) и сценарного глобального потепления в XXI в. Изменения стока геологического прошлого и сценарного будущего были оценены на основе модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН, и уравнения среднего многолетнего водного баланса. В качестве климатических условий для оценки изменений стока использованы результаты традиционных и модельных палеоклиматических реконструкций и климатических сценариев глобального потепления в XXI в. Современные многолетние изменения стока Волги проанализированы на основе представлений о долговременных контрастных фазах. В результате проведенного анализа показано, что годовой сток Волги в условиях теплых эпох микулинского межледниковья и атлантического оптимума голоцена (если исходить из палеоклиматических реконструкций, основанных на ископаемой пыльце растений) был ниже современного. Тогда как согласно модельным палеоклиматическим реконструкциям теплых эпох голоцена, климатическим сценариям антропогенного потепления, а также в условиях современного глобального потепления годовой сток Волги оказывается выше, чем в базовый период. Выявлены значительные различия в изменениях сезонного распределения стока Волги между всеми рассмотренными теплыми эпохами. При этом изменения сезонного распределения при современном глобальном потеплении сходны с теми, что можно ожидать при сценарном потеплении в первой трети и в середине текущего столетия (за исключением стока половодья). Выявлена тесная корреляция между аномалиями изменений годовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков во все рассмотренные теплые эпохи. В период инструментальных наблюдений долговременные фазы повышенного/пониженного стока Волги синхронны с соответствующими фазами индекса Северо-Атлантического колебания и периодами повышения и понижения годовых уровней Каспийского моря.

Ключевые слова: глобальное потепление, теплые геологические эпохи, сценарное потепление, изменения годового и сезонного стока, долговременные фазы, методы оценки изменений стока

DOI: 10.31857/S2587556623060079, **EDN:** ECSJKJF

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1970–1980-х годов (Будыко, 1980) все более заметный акцент в исследованиях делался на оценке изменений климата и их последствий (в том числе гидрологических), которые со временем все в большей мере ассоциировались с преобладающим влиянием антропогенных факторов, приводивших к росту содержания парниковых газов в атмосфере в результате хозяйственной деятельности. Примерно к тому же времени относятся и первые исследования теплых эпох геологического прошлого и связанных с ними гидрологических условий (Величко и др., 1988, 1992; Георгиади, 1992; Кислов, 1993; Atlas..., 1992; Georgiadi, 1990). Тогда же появились первые оценки возможных изменений климата в будущем в рамках

парадигмы антропогенного глобального потепления, а также попытки использования для этого геологических аналогов потепления. Представление об антропогенном характере потепления, начиная с 1990-х годов, стало господствующим. И только в последние 10–15 лет (особенно после “перерывов” в потеплении — warming hiatus) и по мере получения результатов исследований изменений климата разного масштаба, вызванных механизмами не связанными с деятельностью человека, выдвигаются идеи об учете долгопериодной цикличности в оценках современных и возможных в будущем изменениях климата, в том числе возможного похолодания, вызванного, например, изменениями океанической циркуляции

(Панин и др., 2017; Шерстюков, 2021; Caesar et al., 2021).

В эти же годы были проведены исследования стока рек в теплые геологические эпохи (Величко и др., 1988, 1992; Atlas ..., 1992). Одним из авторов статьи был предложен подход для реконструкций палеостока, который был основан на зональных связях среднего многолетнего годового стока с годовой суммой атмосферных осадков, среднегодовой температурой воздуха и годовой испаряемостью (Георгиади, 1980-е годы, личное сообщение). Впервые такой подход для этих целей, видимо, был использован С.А. Шуммом (1968). Аналогичный подход широко использовался в нашей стране начиная с 1970-х годов для исследования географических закономерностей распределения стока и других составляющих водного баланса на глобальном и региональном уровнях (Львович, 1974; Мировой ..., 1974).

Активно развивался подход к реконструкции речного стока, основанный на характеристиках палеомеандр (Сидорчук, Панин, 2017; Сидорчук и др., 2019; Borisova et al., 2006), а также археологических данных (Panin and Nefedov, 2010), геоморфологических и седиментологических индикаторов (Panin and Matlakhova, 2015).

В начале 2000-х годов для реконструкций стока геологических эпох, а также для расчетов сценарных изменений стока в результате возможного глобального потепления в XXI в. в Институте географии РАН была разработана модель месячного водного баланса — ММВБ (Георгиади, Милюкова, 2002, 2007; Георгиади и др., 2011, 2014). На основе этой модели были проведены исследования изменений речного стока крупнейших рек Русской равнины (Волги, Дона и Днепра) и Восточной Сибири (Лены) в сценарных условиях XXI в. и в теплые геологические эпохи (Георгиади, Милюкова, 2002, 2007; Георгиади и др., 2011, 2014). Для расчетов сценарных изменений годового речного стока был использован также и другой (климатический) подход, исходящий из результатов воднобалансовых оценок, выполненных на основе данных о сценарных атмосферных осадках и испарении, рассчитанных на ансамбле глобальных климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана — КМОЦАО (Georgiadi et al., 2021). Следует отметить, что модельный подход для исследований изменений стока в теплые геологические эпохи и в сценарных климатических условиях XXI в. развивался в России в последние двадцать с лишним лет (Водные ..., 2008; Георгиевский, Голованов, 2019; Георгиевский и др., 1996; Гусев, Насонова, 2010; Кислов и др., 2008; Мотовилов, Гельфан, 2019; Мохов и др., 2003).

В 1950–1970-е годы для исследования многолетних изменений стока воды в период инстру-

ментальных наблюдений была высказана идея о долговременных фазах (периодах) повышенного/пониженного стока (Андреянов, 1959; и др.). Потом этот подход почти не развивался (основное внимание уделялось разработке статистических методов расчетов стока и физико-математических методов гидрологического моделирования). Такие долговременные контрастные фазы водности рек — одна из фундаментальных особенностей многолетних изменений стока (Болгов и др., 2018; Водные ..., 2008; Георгиади, Кашутина, 2006; Георгиади и др., 2011, 2014; Georgiadi and Groisman, 2022; Georgiadi et al., 2020). Авторами статьи с начала 2000-х годов исследуются долговременные контрастные фазы в многолетних изменениях годового и сезонного стока крупных и средних рек России и других регионов мира (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади и др., 2011, 2014). Использование свойств продолжительных контрастных фаз, закономерностей их смены могут создать основу для совершенствования методов гидрологических расчетов и подходов для сценариев возможной водности рек в среднесрочной перспективе (Болгов и др., 2016).

Данная статья посвящена сравнительному анализу оценок речного стока Волги, полученных для условий теплых эпох геологического прошлого, инструментального периода и сценарного будущего на основе модельного подхода и подхода, исходящего из анализа продолжительных контрастных фаз, свойственных многолетним изменениям речного стока, наблюдаемым в период инструментальных наблюдений. Сравняются климатические условия, годовой и сезонный сток, а также гидрографы стока Волги у Волгограда в эпохи глобального потепления в геологическом прошлом (оптимумы микулинского межледниковья (~125 тыс. л. н.) и теплые эпохи голоцена), в период современного (начиная с 1981 г.) и сценарного глобального потепления в XXI в. Изменения были оценены на основе модели месячного водного баланса и уравнивания среднего многолетнего годового водного баланса, основанного на данных о сценарных атмосферных осадках и испарении, рассчитанных на глобальных КМОЦАО, а также в результате анализа долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока. Используются палеоклиматические реконструкции, основанные на данных о растительности прошлого, реконструированной путем спорово-пыльцевого анализа отложений соответствующего возраста (Палеоклиматы ..., 2009; Atlas ..., 1992) и результатах палеоклиматических оценок, выполненных на ансамбле глобальных климатических моделей международной программы сравнения палеоклиматического моделирования PMIP-II (Ackerley et al., 2017). Оценки основывались также на данных климатических сценариев антропогенного по-

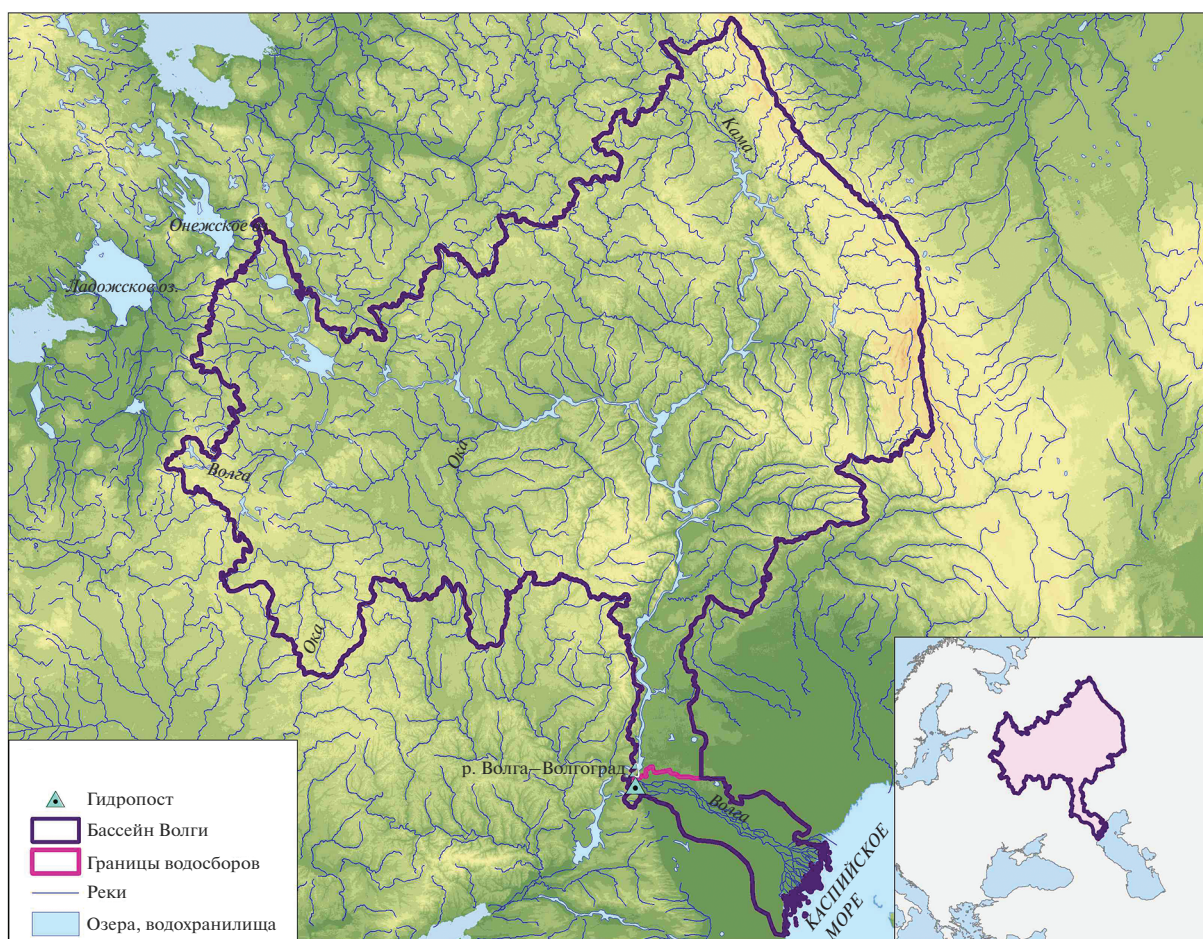


Рис. 1. Картограмма бассейна Волги.

тепления в XXI в., полученных в рамках программ МГЭИК/IPCC CMIP3 и CMIP5 на основе ансамбля глобальных климатических моделей (Meehl et al., 2007)¹.

ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА ВОЛГИ

Волга — крупнейшая река (площадь бассейна в створе Волгограда составляет 1360 тыс. км²) южного макросклона Русской равнины (рис. 1) исторически играет важнейшую роль в жизни нашего государства и испытывает в ходе хозяйственного освоения значительную антропогенную нагрузку. Наряду с этим сток реки изменялся на протяжении геологического и исторического времени и в современных условиях под влиянием природных факторов, связанных с изменениями климатических условий.

Географическая зональность в бассейне Волги носит субширотный характер. Преобладают шесть

основных зональных комплексов (Arc Atlas ..., 1996): таежный (занимает около 34% общей территории бассейна), смешанных лесов (более 40%), лесостепной (15%), степной (9%), а также полупустынный и интразональный. В результате хозяйственного освоения природная ландшафтная структура бассейна в значительной мере изменена. В бассейне Волги преобладают антропогенно-измененные (63% территории бассейна) и вторично-преобразованные (35%) ландшафты, используемые, главным образом, в неорошаемом земледелии. Значительное влияние на сток и водный режим Волги и ее притоков (Камы, Суры, Москвы и др.) оказывают водохранилища. Полный объем восемнадцати крупнейших из них составляет 197 км³, а полезный — 91 км³. Наиболее крупные из них были возведены в период с 1940-х до начала 1980-х годов. Они кардинально изменили водный режим реки.

Условно-естественный, или восстановленный (о методе восстановления стока будет сказано ниже) средний многолетний годовой сток Волги (осредненный за 1882–2020 гг.) составил бы 258 км³

¹ <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/> (дата обращения 15.05.2023).

(наблюденный сток в этот период не превышал 250 км³). В период антропогенно-измененных условий формирование стока происходило под влиянием как климатических изменений, так и антропогенных факторов. При этом сток половодья в условно-естественных условиях составлял бы 55.6%, летне-осенний сток 30.2%, а зимний 14.2% от годового стока. В период заметного антропогенного воздействия внутригодовая структура стока Волги существенно изменилась (Георгиади и др., 2014).

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Инструментальный период наблюдений

Методы

Методы восстановления и анализа долговременных фаз повышенного/пониженного речного стока. Многолетние ряды восстановленного годового и сезонного стока Волги у Волгограда, полученные ранее на основе метода рек-индикаторов климатических изменений, который изложен в (Георгиади и др., 2014), были продлены до 2020 г.

Границы между длительными фазами пониженных и повышенных значений годового и сезонного стока воды были определены с использованием разностно-интегральных кривых (РИК) в сочетании с оценкой статистической однородности многолетних рядов по средним значениям, определенной для длительных фаз с использованием параметрических и непараметрических критериев. Эти методы подробно изложены в публикациях авторов (Георгиади и др., 2014; Georgiadi and Groisman, 2022; Georgiadi et al., 2018).

Разностно-интегральные кривые представляют собой нарастающую сумму отклонений определенной характеристики от ее среднего значения, рассчитанного за весь период наблюдения (Андреянов, 1959; Георгиади и др., 2014). Они используются для определения границ длительных фаз (10–15 и более лет) в многолетних изменениях характеристики, в течение которых их средние значения были выше или ниже их среднего многолетнего значения за весь период наблюдений. В большинстве рассмотренных случаев годы смены длительных контрастных фаз могут быть определены на основе экстремальных (минимальных или максимальных) значений РИК. Они дают наглядное графическое представление о границе перехода между длительными фазами пониженных/повышенных значений характеристик.

Метод оценки изменений стока в период современного глобального потепления основан на сравнении восстановленного (условно-естественного) стока для периода современного глобального потепления и базового периода, отличающихся

между собой климатическими условиями (Георгиади и др., 2014, 2019; Georgiadi et al., 2019).

Использованные данные

Многолетние ряды речного стока. Основу исследований составили многолетние ряды наблюдений средних месячных, средних сезонных и средних годовых фактических (наблюденных) расходов воды, а также ряды восстановленных (с исключенными изменениями, обусловленными антропогенными воздействиями) средних сезонных и средних годовых расходов воды Волги в створе Волгограда (гидроузел Волжской ГЭС). Наблюденные ряды стока Волги состоят из двух частей: с начала периода наблюдений (1882 г.) и до 1940 г. (до начала заполнения Рыбинского водохранилища) с относительно слабо заметным антропогенным влиянием и период, когда антропогенные воздействия начали заметно изменять сток Волги (с 1941 г.).

Для исследования сопряженности многолетних изменений стока Волги у Волгограда и уровня Каспийского моря были использованы многолетние ряды средних годовых уровней у г. Махачкалы (1900–2008 гг.), подготовленные в Государственном океанографическом институте². Ряд был продлен на основе материалов Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, опубликованных в интернете³.

Сопряженность многолетних изменений стока Волги у Волгограда, уровня Каспийского моря и макромасштабной атмосферной циркуляции анализировалась с использованием многолетнего ряда индекса Северо-Атлантического колебания – САК (Northern Atlantic Oscillation – NAO) (Jones et al., 1997). Индекс САК рассчитывается как разность давления на уровне моря за зимний период (декабрь–март) между Гибралтаром и Стиккисхумльмур/Рейкьявик, Исландия⁴. Многолетние изменения этого индекса (так же, как и ряда других известных индексов атмосферной циркуляции) отражают изменения интенсивности зонального переноса (Георгиади, Кашутина, 2016).

Для исследования многолетних изменений средней годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков в бассейне Волги были использованы многолетние ряды средних месячных значений указанных метеорологических

² <http://www.oceanography.ru/index.php/2010-03-15-15-57-22/2010-03-15-15-59-06/211-2011-02-01-15-38-38> (дата обращения 15.05.2023).

³ <https://informburo.kz/stati/uroven-kaspiya-dostig-kriticeskoi-otmetki-kak-spasti-stremitelno-meleyushhii-vodoyom> (дата обращения 15.05.2023).

⁴ <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/> (дата обращения 15.05.2023).

элементов из архива ВНИИГМИ-МЦД⁵ и глобального архива Университета Восточной Англии⁶.

Теплые эпохи геологического прошлого и сценарного будущего

Методы

Модель месячного водного баланса, разработанная авторами в начале 2000-х годов, использовалась в качестве основного инструмента для расчетов речного стока крупных рек России в условиях теплых эпох геологического прошлого и в условиях сценарных изменений климата в XXI в. (Георгиади, Милюкова, 2002; Георгиади и др., 2014). В ее основе лежит уравнение среднегогодового месячного водного баланса речных водосборов для расчетных ячеек регулярной сетки, размер которых может меняться. Расчеты проводятся по квазисуткам, т.е. среднемесячные значения температуры воздуха и атмосферных осадков интерполируются по суткам в пределах каждого месяца на основе использования разработанных авторами алгоритмов, которые подробно изложены в их публикациях (Георгиади, Милюкова, 2002; Георгиади и др., 2014). Модель прошла апробацию для условий крупных речных бассейнов, расположенных в разных природных зонах России, включая зону вечномёрзлых грунтов (Георгиади и др., 2011). Для расчетов изменений речного стока в теплые климатические эпохи прошлого и сценарного будущего использовались относительные отклонения (в %) климатических характеристик этих временных срезов от их современных значений, что позволяло во многом сгладить различия в значениях расчетных климатических характеристик.

Оценка среднего многолетнего годового речного стока крупных рек России для нескольких срезов сценарного потепления климата основана на использовании уравнения среднего многолетнего водного баланса и данных о сценарных средних многолетних годовых суммах атмосферных осадков и годового испарения, полученных осреднением результатов расчетов, проведенных в рамках программы CMIP5 на 30-ти глобальных климатических моделях (КМОЦАО) для ансамблей двух контрастных групп сценариев изменения климата (RCP 8.5 и RCP 2.6). Для этого данные модельных расчетов сумм атмосферных осадков и испарения, представленные в узлах равномерной сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ по широте и долготе, осреднялись для территории речных бассейнов. Аналогичным образом по данным о годовых суммах атмосферных осадков и испарения за ба-

зовый период (в качестве которого был принят период 1931–1980 гг.), осредненным по 30-ти КМОЦАО, рассчитывался современный годовой сток. На основе сравнения расчетных значений сценарного и современного стока оценивалось его относительное изменение в условиях потепления в первой трети и середине XXI в.

Использованные данные

Палеоклиматические реконструкции. Отклонения (от их современных значений) температуры воздуха и атмосферных осадков для микулинского межледникового были восстановлены на основе палеофлористических данных, исходя из метода, предложенного В.П. Гричуком (Палеоклиматы ..., 2009). В качестве базовых (для современного периода) были использованы средние многолетние данные, относящиеся к периоду до 1960–1970-х годов, относительно которых оценивались палеоклиматические отклонения. Климатические характеристики оптимума голоцена восстанавливались на основе информационно-статистического метода, разработанного В.А. Климановым (Палеоклиматы ..., 2009). Гидрологические оценки для оптимума голоцена были получены для двух вариантов палеоклиматических реконструкций. В одном из них к рассчитанному по палинологическим данным отклонению климатической характеристики добавлялась статистическая ошибка (и полученное значение принималось за “максимальное отклонение” от современных значений климатической характеристики). В другом случае статистическая ошибка вычиталась из исходного отклонения и полученное значение определялось как “минимальное отклонение”. При этом данные о январских отклонениях распространялись на месяцы холодного полугодия (октябрь–март), а июльские — на месяцы теплого полугодия (апрель–сентябрь).

Модельные палеоклиматические реконструкции среднемесячных аномалий [разницы между модельным климатом доиндустриального типа, который отнесен примерно к 1750 г. (Ackerley et al., 2017), и оптимумом голоцена], указанных выше климатических характеристик для каждого месяца среднего многолетнего года получены осреднением результатов расчетов, проведенных на 18 глобальных климатических моделях, включенных в программу PMIP-II⁷. Анализ длинных рядов средней годовой температуры воздуха в Санкт-Петербурге (начиная с середины XVIII в.), Нижнем Новгороде (с 1830-х годов), Казани и Волгограде (с середины XIX в.) показал, что годовая температура всего периода вплоть до начала потепления в 1980-х годах характеризовалась пониженными значениями.

⁵ <http://meteo.ru/> (дата обращения 15.05.2023).

⁶ <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data> (дата обращения 15.05.2023).

⁷ <https://pmip.lscce.ipsl.fr/> (дата обращения 15.05.2023).

Данные об отклонениях температуры воздуха и атмосферных осадков января и июля для условий теплых эпох голоцена (модельные теплые события 9, 6, 3 тыс. л. н.) были получены на основе расчетов, выполненных на глобальной климатической модели MSU, разработанной А.В. Кисловым (1993), которая была включена в ансамбль моделей международной программы сравнения палеоклиматического моделирования. Указанные выше теплые события были соотнесены автором модельных палеоклиматических реконструкций с известными палеогеографическими событиями: бореальным, атлантическим и субатлантическим потеплением соответственно. Палеоаномалии температуры воздуха и атмосферных осадков оценивались относительно их средних значений для периода 1960–1990 гг.

Климатические сценарии для временных срезов XXI в. Для расчетов изменений речного стока в бассейне Волги использованы климатические сценарии, подготовленные в рамках программ CMIP3 и CMIP5⁸ (Meehl et al., 2007). В каждой из этих программ для расчетов использованы те из четырех семейств сценариев, которые характеризуются наиболее (A2 из программы CMIP3 и RCP 8.5 из программы CMIP5) и наименее (B1 – CMIP3, RCP 2.6 – CMIP5) интенсивным ростом средней глобальной годовой температуры воздуха для периодов 2010–2039 и 2040–2069 гг., первый из которых условно отнесен к 2025 г., второй – к 2050 г. Такой подход на основе учета наиболее широкого диапазона возможных климатических изменений обусловлен отсутствием критериев выбора какого-либо из четырех возможных семейств (групп) имеющихся климатических сценариев. Аномалии среднемесячных средних многолетних значений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков для указанных выше сценарных периодов получены по результатам расчетов, проведенных на ансамбле КМОЦАО. При этом среднеансамблевые сценарные значения определены на основе результатов расчетов на 10 глобальных климатических моделях, отобранных из всего ансамбля моделей, включенных в программу CMIP3, на основе сравнения характеристик современного модельного и наблюдаемого климата для территории Русской равнины (Кислов и др., 2008). Тогда как среднеансамблевые сценарные климатические характеристики, полученные в рамках программы CMIP5, осреднялись по результатам расчетов, проведенных на 30 климатических моделях, включенных в эту программу. Сценарные аномалии температуры воздуха и атмосферных осадков оценивались относительно их современных значений, рассчитанных для периода 1960–1990 гг.

⁸ <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/> (дата обращения 15.05.2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Период инструментальных наблюдений

Период современного глобального потепления, которое в рамках распространенной парадигмы ассоциируется, прежде всего, с антропогенными воздействиями, и его гидрологические последствия зачастую рассматриваются в отрыве от многолетней динамики стока рек. Значительное число публикаций посвящено оценке изменений гидрологических характеристик в период современного глобального потепления относительно более холодного базового периода (Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2019; Georgiadi et al., 2019). Однако не меньший интерес в последнее время вызывает проблема исследования долговременных периодов (фаз) повышенного/пониженного годового и сезонного стока. Они, последовательно сменяя друг друга, представляют собой важную особенность многолетней динамики гидрологических характеристик, вызванных климатическими изменениями, а разница в стоке таких контрастных фаз чаще всего оказывается статистически значимой. Продолжительность этих фаз составляет 10–15 лет и более и может достигать многих десятилетий. В этом отношении уже исследован годовой и сезонный сток воды рек России (Болгов и др., 2018; Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2014; Georgiadi and Danilenko, 2022; Georgiadi and Groisman, 2022; Georgiadi et al., 2018, 2021). В этом разделе мы рассматриваем, как соотносятся между собой указанные два аспекта в исследовании современных изменений стока Волги.

Долговременные фазы повышенных/пониженных значений гидроклиматических характеристик

Долговременные фазы (продолжительностью 10–15 и более лет) повышенного/пониженного восстановленного годового и сезонного стока Волги у Волгограда – важнейшая закономерность их многолетних изменений (рис. 2, табл. 1).

Длительность контрастных фаз в многолетних изменениях годового и сезонного стока Волги изменялась в широких пределах (см. табл. 1). Для стока половодья она варьировала от 11 (фаза повышенного стока) до 26 лет (фаза пониженного стока), для стока летне-осеннего периода от 18 (фаза повышенного стока) до 82 лет (фаза пониженного стока), для зимнего стока от 42 лет (фаза повышенного стока) до 91 года (фаза пониженного стока), а для годового стока от 8 (фаза пониженного стока) до 55 лет (фаза пониженного стока). При этом общая продолжительность фаз пониженного стока как годового, так и сезонного стока превышала продолжительность их противоположенных фаз. Наименьшая разница между ними характерна для стока половодья (ФНС 59 го-

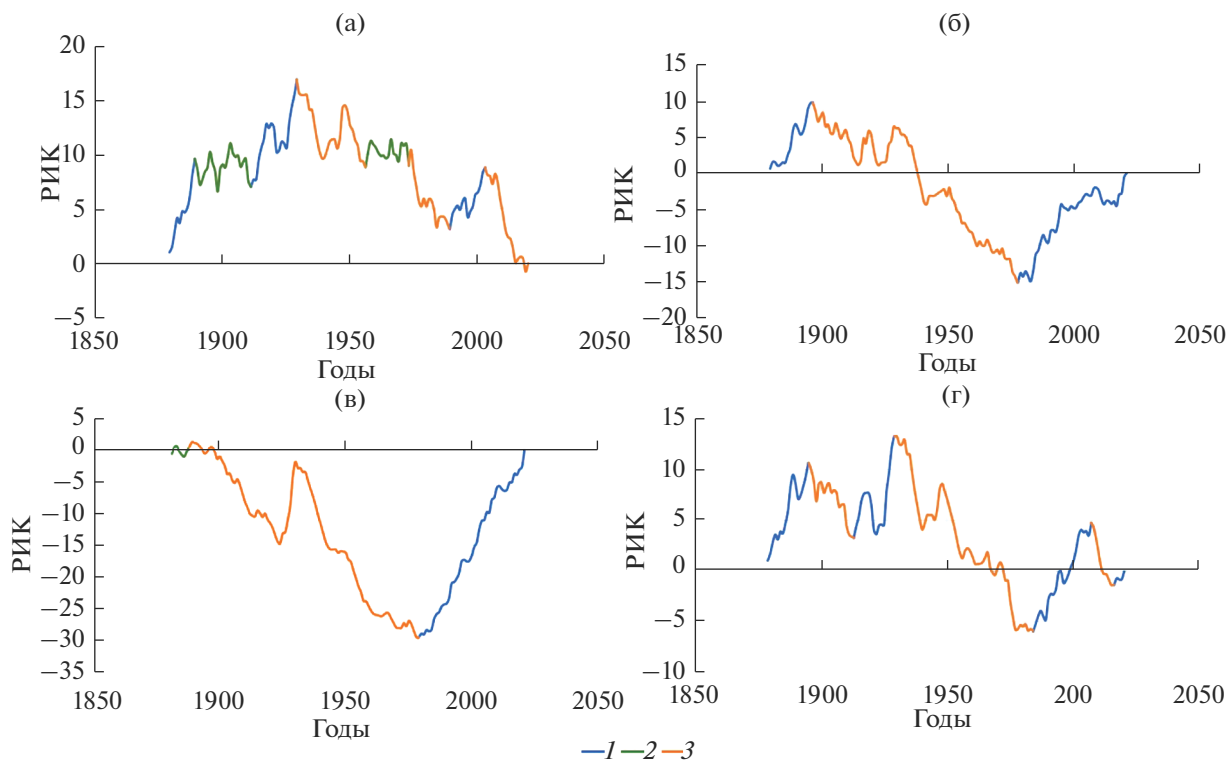


Рис. 2. Долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) в многолетних изменениях восстановленного стока Волги у Волгограда за половодье (а), летне-осенний период (б), зимний период (в) и год (г). 1 – фаза повышенного стока, 2 – фаза, средний сток которой близок к среднему многолетнему стоку всего периода наблюдений, 3 – фаза пониженного стока.

да, ФВС 53 года) и годового стока (ФНС 81 года, ФВС 63 года), тогда как для стока меженных сезонов она была наибольшей и составляла соответственно для зимнего стока и стока летне-осеннего сезона для ФНС 91 и 82 года, для ФВС 42 года и 61 лет. Отметим, что в многолетних изменениях стока половодья наблюдались два периода (общей продолжительностью 40 лет), для которых средний сток был близок к многолетней норме стока, рассчитанной для всего периода наблюдений.

Наибольшая степень синхронности длительных фаз повышенного или пониженного годового и стока разных сезонов года между собой наблюдалась в многолетних изменениях следующих сочетаний сезонного и годового стока: стока меженных сезонов; годового стока и стока меженных сезонов; годового стока и стока половодья, а наименьшая для стока половодья и зимнего стока, а также для годового стока, стока половодья и зимнего стока (табл. 2).

Наибольшая разница среднего стока контрастных фаз характерна для зимнего стока (37%), тогда как для стока летне-осеннего периода она существенно меньше (19%), а для годового стока и стока половодья она составляет соответственно 16 и 17%.

Продолжительность и годы смены контрастных фаз годового фактического (включающего период антропогенно-измененного стока) и восстановленного стока Волги у Волгограда мало отличаются между собой (рис. 3) в отличие от фаз сезонного стока (Георгиади и др., 2014).

Рассмотренные выше долговременные контрастные фазы в многолетних изменениях стока Волги начиная с 1930-х годов тесно сопряжены с соответствующими фазами пониженных/повышенных значений среднегодовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков, осредненных для бассейна Волги (рис. 4). По данным наблюдений на метеорологических станциях ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета (начало многолетних рядов в них относится к 1936 г.), осредненных для бассейна Волги, выявляются две контрастные фазы. С 1930-х годов наблюдалась фаза их пониженных значений, которая сменилась в 1989 (для температуры воздуха) и в 1975 гг. (для атмосферных осадков) на противоположную фазу. При рассмотрении более продолжительных рядов данных климатических характеристик (интерполированных в узлы равномерной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготы, а также осредненных для бассейна Волги), начало которых относится к 1901 г.

Таблица 1. Характеристика долговременных контрастных фаз годового и сезонного стока Волги у Волгограда

Фаза	Речной сток			
	годовой (январь—декабрь)	половодье (апрель—июнь)	летне-осенний (июль—ноябрь)	зимний (декабрь—март)
Пониженного стока (ФНС)	1896—1913/18/7742*	1930—1956/27/15524	1897—1978/82/4854	1888—1978/91/2783
	1930—1984/55/7701	1974—1989/16/15325	—	—
	2008—2016/9/7294	2004—2020/17/14910	—	—
Осредненный речной сток для всех наблюдавшихся фаз пони- женного стока (ФНС _{ав})	7764	15293	4854	2783
Повышенного стока (ФВС)	1879—1895/17/9036	1879—1889/11/18619	1879—1896/18/5934	1979—2020/42/3817
	1914—1929/16/9033	1912—1929/18/17749	1978—2020/43/5698	—
	1985—2007/23/8694	1990—2003/14/17368	—	—
Осредненный речной сток для всех наблюдавшихся фаз повы- шенного стока (ФВС _{ав})	8872	17848	5768	3817
Фаза, сток которой близок к среднему многолетнему стоку (ФВС _{ав} — ФНС _{ав})	—	1890—1911/22/15983	—	—
	1208	1957—1973/17/16233	—	—
(ФВС _{ав} — ФНС _{ав}), % относи- тельно ФНС _{ав}	16	2555	914	1034
		17	19	37

Примечание. * Годы/число лет/среднее значение расхода воды (м³/с).

Таблица 2. Количество лет с синхронными долговременными фазами годового и сезонного стока Волги у Волгограда

Сочетание годового и сезонного стока	Количество лет в синхронных фазах		
	фаза пониженного стока	фаза повышенного стока	всего
Летне-осенний/зимний	82	29	111
Годовой/зимний	65	44	109
Годовой/летне-осенний	57	51	108
Годовой/сток половодья	56	47	103
Годовой/сток половодья/летне-осенний	48	44	92
Годовой/и три сезона	49	39	88
Сток половодья/летне-осенний	56	24	80
Сток половодья/зимний	49	25	74
Годовой/сток половодья/зимний	49	19	68

(Георгиади и др., 2014 г.)⁹, также выявляются две продолжительные контрастные фазы. Отметим, что в основе архива сеточных данных лежат многолетние данные, полученные на государственной гидрометеорологической сети наблюдений России. При этом годы смены контрастных фаз в этих двух рядах данных разной продолжительности для атмосферных осадков совпадают, а для температуры воздуха они различались на девять лет (см. рис. 4а и 4в). Характер фаз для атмосфер-

ных осадков имеет более сложный характер по сравнению с температурой воздуха. Так, на фоне длительного периода пониженных атмосферных осадков наблюдались относительно короткие отрезки с повышенными осадками (в 1912—1916 годы, в 1920-е, 1940—1960-е годы). В эти периоды также формировался повышенный сток половодья и годового стока. В целом можно сделать вывод о том, что глобальное потепление проявилось в бассейне Волги начиная с середины 1970-х и в 1980-е годы, что выразилось в отчетливой смене фазы пониженных значений температуры воздуха и атмосферных осадков на противо-

⁹ <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data> (дата обращения 15.05.2023).

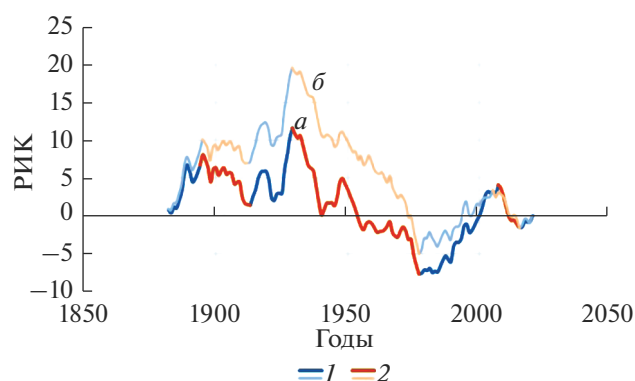


Рис. 3. Долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) восстановленного (*а*) и наблюдаемого (антропогенно-измененного) (*б*) годового стока Волги у Волгограда. 1 – фаза повышенного стока, 2 – фаза пониженного стока.

положенную фазу. Примерно в эти же годы произошла смена аналогичных фаз годового и сезонного стока Волги у Волгограда (см. рис. 2).

Долговременные фазы наблюдаемого (антропогенно-измененного), но также (как было показано выше, см. рис. 3) и восстановленного повышенного/пониженного годового стока Волги у

Волгограда практически синхронны с соответствующими многолетними периодами повышенного/пониженного среднего годового уровня Каспийского моря (рис. 5). Ранее это было показано И.А. Шикломановым с коллегами (Shiklomanov et al., 2011). При этом самая длительная фаза пониженного стока Волги и период, характеризующийся долговременной тенденцией понижения уровня Каспия, выявляется в 1929–1977 гг. За ней последовала существенно менее продолжительная фаза повышенного стока Волги, продолжавшаяся до 2005 г. Она сопровождалась периодами повышения (1978–1995 гг.) и частично периодом снижения (1996–2018 гг.) уровня Каспия. Оставшаяся часть периода снижения уровня совпала, начиная с 2006 г., с фазой пониженного стока Волги. С 2016 г. наметился переход к фазе повышенного стока Волги.

Указанные выше длительные фазы повышенного/пониженного стока Волги и соответствующие периоды повышения/понижения годового уровня Каспийского моря изменяются во многом синхронно с соответствующими периодами усиления/ослабления зонального переноса в зимний период, что соответствует длительным фазам повышенных/пониженных значений индекса САК. Аналогичный вывод относительно сопряженности многолетних изменений стока Волги и индек-

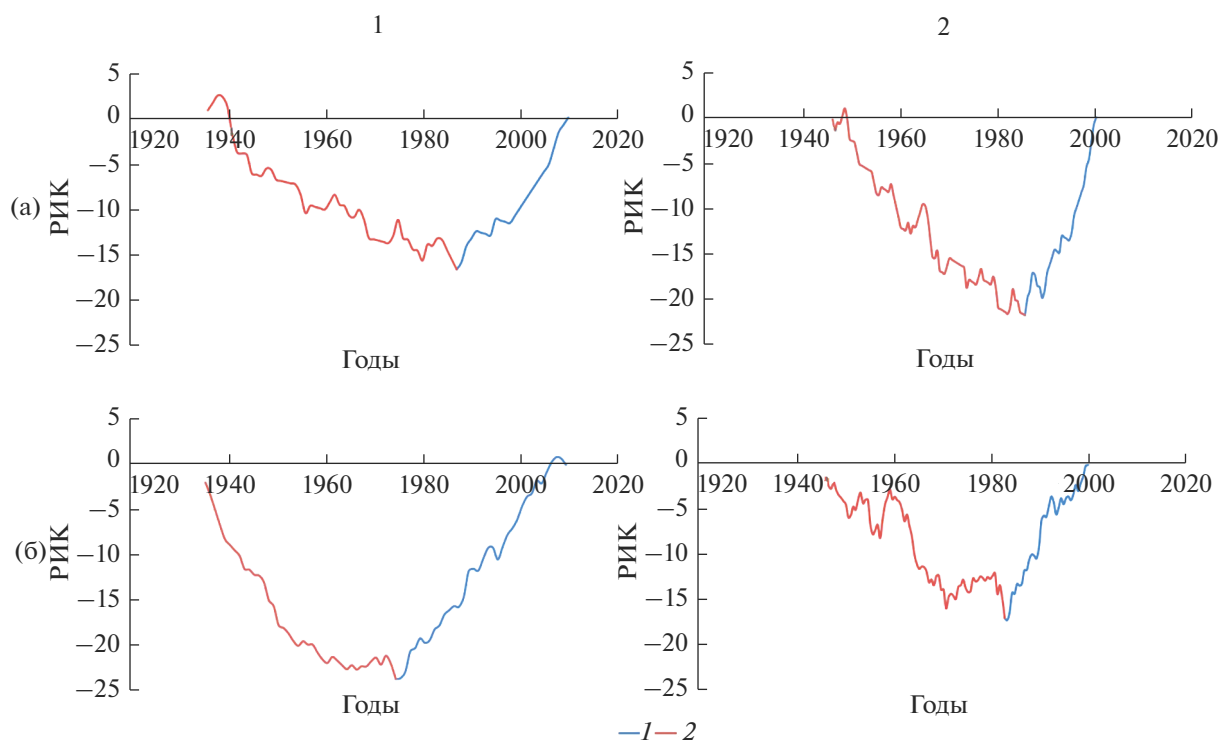


Рис. 4. Долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) в многолетних изменениях средней годовой температуры воздуха (*а*) и суммы атмосферных осадков (*б*), осредненных по бассейну Волги у Волгограда по данным ВНИИГМИ-МЦД (1) и по данным Университета Восточной Англии (2). 1 – фаза повышенных значений, 2 – фаза пониженных значений температуры воздуха и суммы атмосферных осадков.

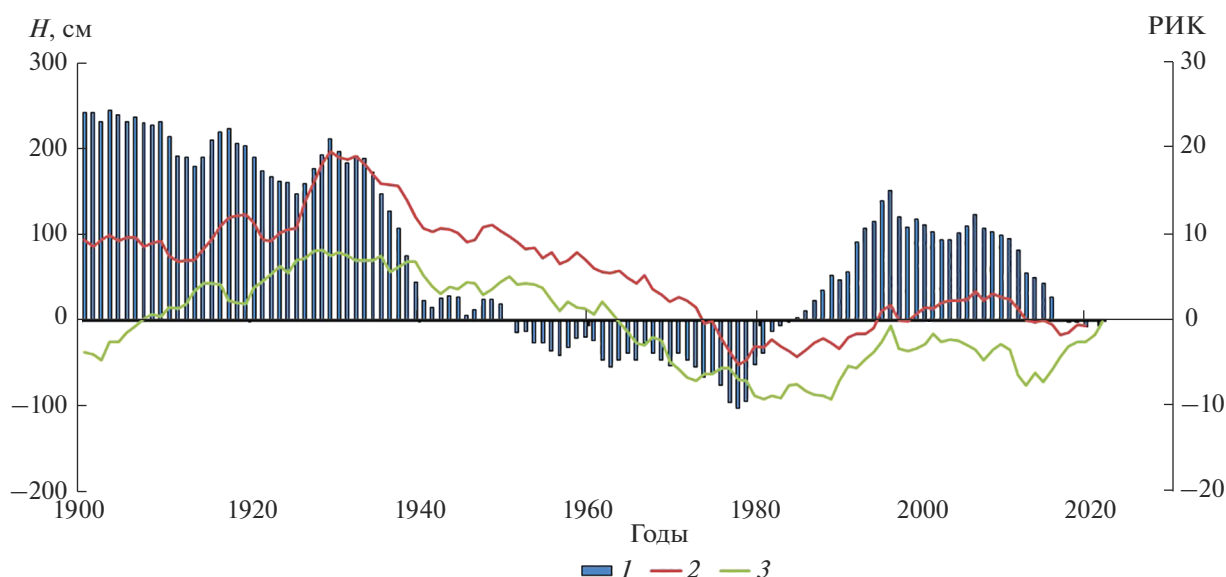


Рис. 5. Уровни Каспийского моря у Махачкалы (1), долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) годового фактического стока Волги у Волгограда (2) и индекса североатлантического колебания (3).

са САК на основе метода скользящего осреднения был сделан ранее (Попова, Георгиади, 2017). Долговременные фазы и других известных индексов макромасштабной атмосферной циркуляции [среди которых повторяемость западной формы атмосферной циркуляции (W) согласно типизации Г.Я. Вангенгейма, Арктического колебания (Arctic Oscillation) и ряда других, выявленные на основе метода разностно-интегральных кривых, тесно коррелированы между собой (Георгиади, Кашутина, 2016)]. Это объясняется тем, что каждый из них характеризует усиление или ослабление зонального переноса в атмосфере.

Изменение стока Волги у Волгограда в эпоху современного глобального потепления

Как было показано выше, начало периода современного глобального потепления (в качестве начала которого был принят 1981 г.) согласуется с продолжительной фазой повышенного летне-осеннего и зимнего стока. А вот для стока половодья в этот период наблюдаются две примерно равные по продолжительности контрастные фазы. Для годового стока в этот период наблюдается продолжительная фаза повышенного стока, вслед за которой выявляется более короткая (почти вдвое) фаза пониженного стока, которая, возможно, сменяется снова на фазу повышенного стока. Такие особенности динамики продолжительных фаз годового и сезонного стока в период современного глобального потепления определяют разницу в его годовом и сезонном стоке в сравнении с предшествующим (базовым) периодом. В

качестве базового использован период 1931–1980 гг., который характеризуется пониженными значениями средней годовой температуры воздуха (на 1°C) и суммой атмосферных осадков (на 25 мм, или на 4%) и практически совпадает с долговременной фазой пониженного стока каждой из его составляющих.

За период современного глобального потепления восстановленный (с исключенным антропогенным изменением) годовое стока Волги по сравнению с базовым периодом был выше современного на 8%. Сток половодья практически не изменился (увеличился на немногим более 1%), тогда как заметно выше стал сток зимней межени (на 47%), а также сток летне-осеннего периода (на 19%).

Теплые эпохи геологического прошлого

Климатические условия

Палеоклиматические реконструкции, основанные на ископаемой пыльце растений (Палеоклиматы ..., 2009). В рассмотренные теплые геологические эпохи наиболее заметными изменениями средней многолетней среднегодовой температуры воздуха (на 4.7°C) и суммой атмосферных осадков (на 13%), осредненной по бассейну Волги, по сравнению с базовым периодом [для которого согласно нашим расчетам на основе данных архива (Daily ..., 2007) атмосферные осадки составляли 590 мм, а температура воздуха 4°C] характеризуется теплая эпоха микулинского межледниковья (125 тыс. л. н.). В атлантический оп-

тимум голоцена аномалии температуры воздуха были существенно ниже ($1.7\text{--}2.3^\circ\text{C}$), а отклонения осадков не превышали 3% ($0.5\text{--}2.9\%$).

Модельные палеоклиматические реконструкции теплых эпох голоцена. По нашим оценкам, основанным на осреднении результатов, полученных на ансамбле глобальных климатических моделей, в атлантический оптимум голоцена аномалии атмосферных осадков (0.5%) и, особенно, температуры воздуха (0.4°C) были существенно меньше тех, что были получены традиционными методами палеоклиматических реконструкций. А оценки среднегодовых аномалий, полученные по расчетам, проведенным на глобальной климатической модели MSU (Георгиади, Милюкова, 2006; Кислов, 1993), показали для этого среза голоцена нулевую аномалию для температуры воздуха и отрицательную для атмосферных осадков (-4.1%). Тогда как для бореального и субатлантического потепления температура воздуха могла быть выше современной на 0.3 и на 0.1°C , а атмосферные осадки ниже на 3.5 и 0.7% соответственно.

Сток Волги в условиях теплых эпох геологического прошлого

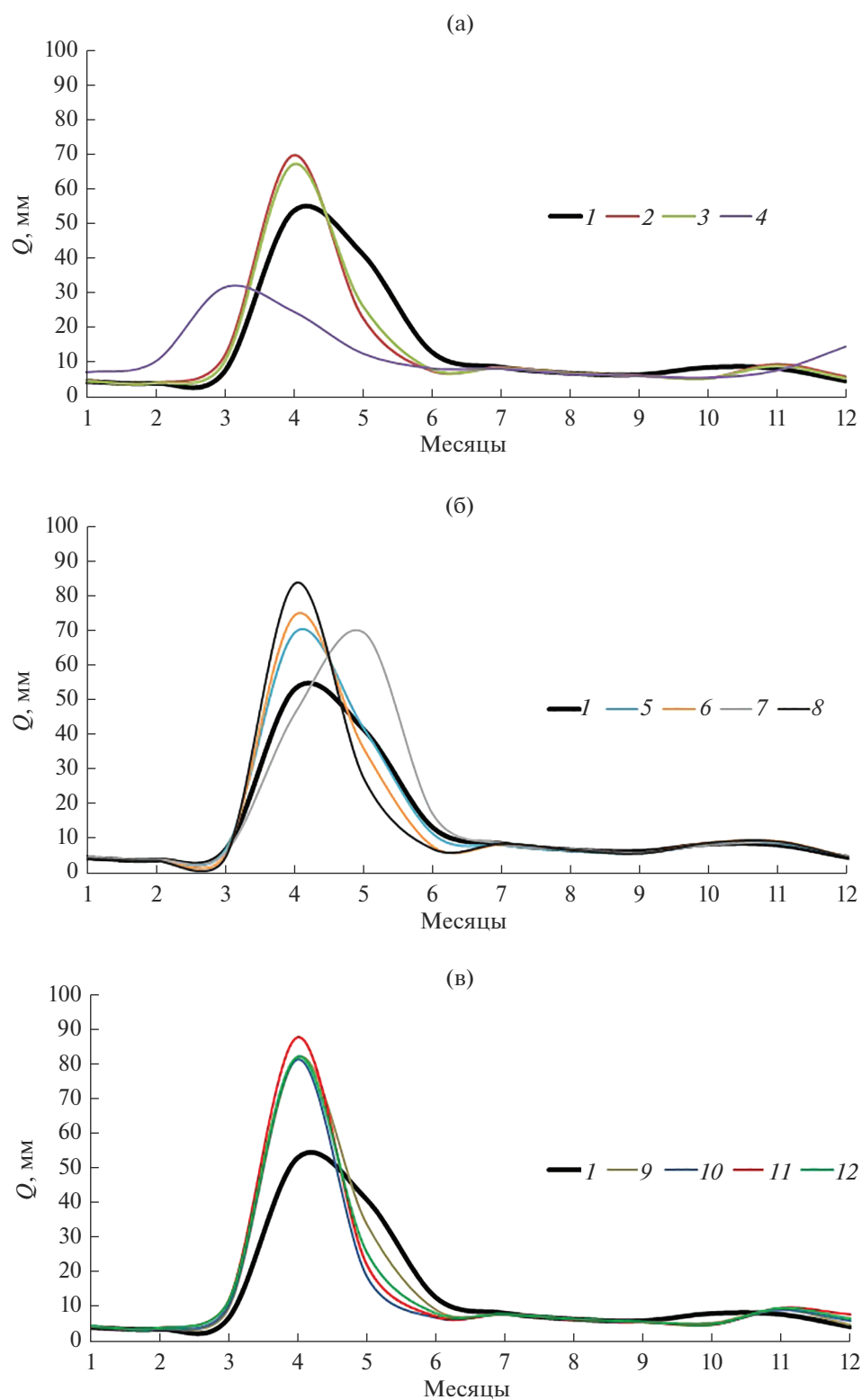
Годовой сток. Согласно расчетам на модели месячного водного баланса (Георгиади, Милюкова, 2002), годовой сток Волги в период оптимума микулинского межледникового был заметно ниже (на 14.6%), чем в современных условиях (оценка дается относительно стока базового периода 1931–1980 гг.). В атлантический оптимум голоцена, согласно расчетам на ММВБ, исходящим из палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологическом методе (Палеоклиматы ..., 2009), сток также был ниже современного (на $3.1\text{--}4\%$), что качественно совпадает с результатами, полученными на основе зональных зависимостей и палеомеандр (Величко и др., 1988, 1992; Сидорчук и др., 2012; Atlas ..., 1992). Оценки аномалий стока для этого периода, выполненные на ММВБ и основанные на палеоклиматических реконструкциях, полученных на ансамбле климатических моделей программы PMIP-II и на модели MSU, напротив, говорят о том, что годовой

сток в этот период мог быть выше современного на 9 и 5.5% соответственно. Также как и годовой сток бореального (на 5.6%) и субатлантического потепления (на 8.5%), если исходить из палеоклиматических реконструкций, полученных на модели MSU.

Гидрографы стока. Анализируются гидрографы среднемесячного стока, полученные осреднением стока каждого месяца по всем расчетным ячейкам ($1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе), покрывающим бассейн Волги до г. Волгограда. В период оптимума микулинского межледникового, исходя из палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологическом методе, гидрограф стока Волги был кардинально другим по сравнению с современными условиями (рис. 6а). Волна половодья была существенно более выположенной, а ее пик был смещен с апреля на март. В атлантический оптимум голоцена пик половодья не смещался, а основная волна половодья проходила за более короткое время. Если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях, то в среднеансамблевых палеоклиматических условиях атлантического оптимума пик половодья проходил в мае, а не в апреле, как в современных условиях, а согласно палеоклиматическим данным, полученным на модели MSU, он практически не смещался во времени. Исходя из палеоклиматических данных PMIP-II, существенно увеличивались расходы воды на пике половодья, но его форма изменялась не очень значительно. В целом аналогичные изменения характерны и для этих параметров волны половодья, рассчитанных на основе палеорекострукции климатических характеристик, полученных на модели MSU.

Распределение стока по гидрологическим сезонам года. В оптимум микулинского межледникового внутригодовая структура стока Волги кардинально отличалась от современной (рис. 7б). Это связано, прежде всего, со значительно более теплыми (более чем на 8°C) зимними месяцами и сокращением периода с отрицательной температурой воздуха с пяти месяцев до трех. В результате сток за период половодья снижался на 36% , более чем в два раза повышался сток в зимний период и несколько увеличивался летне-осенний сток. Ана-

Рис. 6. Гидрографы стока Волги у Волгограда в теплые эпохи, рассчитанные на модели месячного водного баланса ИГ РАН по данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, полученных на основе: (а) — палеоклиматических реконструкций теплых эпох микулинского межледникового и оптимума голоцена, основанных на палинологических данных; (б) — палеоклиматических реконструкций теплых эпох голоцена, основанных на расчетах на глобальных климатических моделях; (в) — климатических сценариев антропогенного потепления в XXI в., рассчитанных на основе глобальных климатических моделей. 1 — базовый период (1931–1980 гг.), 2 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик, увеличенные на статистическую ошибку расчетов), 3 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик, уменьшенные на статистическую ошибку расчетов), 4 — микулинское межледниковье, 5 — субатлантическое потепление (глобальная климатическая модель MSU), 6 — атлантический оптимум голоцена (глобальная климатическая модель MSU), 7 — атлантический оптимум голоцена (осредненные палеоклиматические оценки на ансамбле глобальных климатических моделей программы PMIP-II), 8 — бореальное потепление (глобальная климатическая модель MSU). Осредненные климатические сценарии на ансамбле глобальных климатических моделей программ: 9 — CMIP3_A2_2011–2039, 10 — CMIP3_B1_2011–2039, 11 — CMIP3_A2_2040–2069, 12 — CMIP3_B1_2040–2069.



логичным образом изменялась сезонная структура в атлантический оптимум голоцена, если основываться на палеоклиматических реконструкциях, полученных на основе палинологического метода (см.

рис. 7б). Сток половодья был ниже (так же, как и годовой сток), а зимний и летне-осенний сток выше современного. При этом для стока половодья и зимнего стока масштабы аномалий были со-

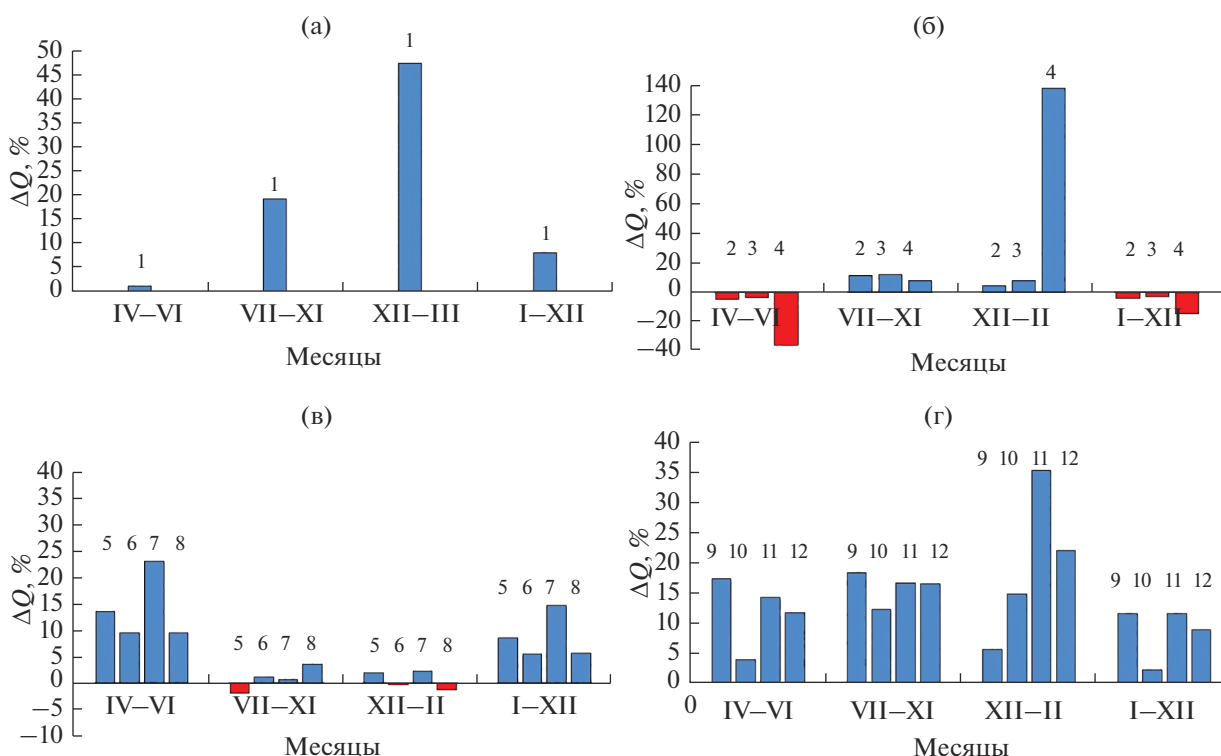


Рис. 7. Изменения годового и сезонного стока (%) в эпохи потепления по сравнению с базовым периодом (1931–1980 гг.): (а) – современное глобальное потепление; (б) – теплые эпохи микулинского межледникового и оптимума голоцена (палеоклиматические реконструкции основаны на палинологических данных); (в) – теплые эпохи голоцена (палеоклиматические реконструкции основаны на расчетах на глобальных климатических моделях); (г) – антропогенное потепление в XXI в. (климатические сценарии основаны на глобальных климатических моделях). 1 – изменение стока рассчитаны на основе многолетних рядов восстановленного стока, 2 – микулинское межледниковье, 3 – атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик увеличены на статистическую ошибку расчетов), 4 – атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик уменьшены на статистическую ошибку расчетов), 5 – бореальное потепление (глобальная климатическая модель MSU), 6 – атлантический оптимум голоцена (глобальная климатическая модель MSU), 7 – атлантический оптимум голоцена (осредненные палеоклиматические оценки на ансамбле глобальных климатических моделей программы PMIP-II), 8 – субатлантическое потепление (глобальная климатическая модель MSU). Осредненные климатические сценарии на ансамбле глобальных климатических моделей программ: 9 – CMIP3_A2_2011–2039, 10 – CMIP3_B1_2011–2039, 11 – CMIP3_A2_2040–2069, 12 – CMIP3_B1_2040–2069.

Примечание: изменения стока для (б), (в) и 7 рассчитаны на модели месячного водного баланса ИГ РАН.

вершенно другими. Если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях, то картина сезонной структуры стока Волги качественно отличалась. В этом случае и сток почти всех сезонов (за исключением слабозаметного снижения стока летне-осеннего сезона в субатлантическое потепление и зимнего сезона в период бореального потепления и атлантического оптимума) и годовой сток превышал современные их значения.

Сценарное глобальное антропогенное потепление XXI века

Климатические условия

Наши оценки среднеансамблевых сценарных изменений сумм атмосферных осадков и температуры воздуха для бассейна Волги, полученные

на основе глобальных архивов данных CMIP3 и CMIP5 программы МГЭИК/ИРСС (ИРСС, 2007) показывают, что диапазон возможных изменений годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков может составить соответственно для периода 2011–2039 гг. 1.4–2.2°C и 5.4–7.8%, а для периода 2040–2069 гг. – 2.5–4°C и 7–10.3%. Здесь и далее первое значение относится к семейству сценариев B1 и RCP2.6 (наименее интенсивное среднелобальное потепление), A2 и RCP8.5 (наиболее интенсивное среднелобальное потепление).

Сток Волги в условиях сценарного потепления климата

Годовой сток. Рассчитанное на модели месячного водного баланса возможное изменение го-

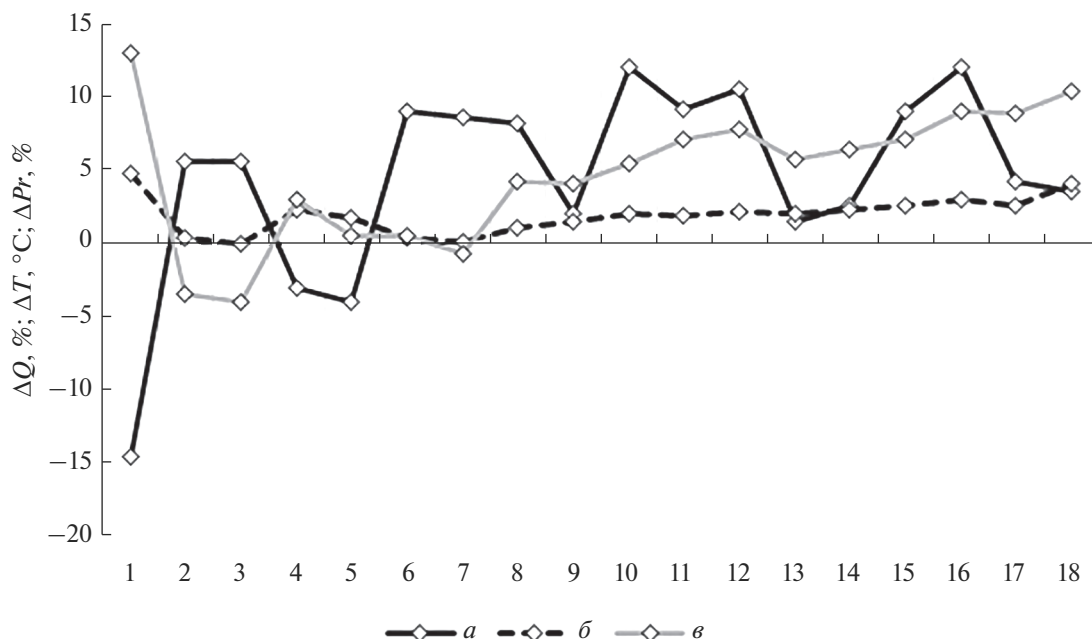


Рис. 8. Изменения (по сравнению с базовым периодом) годового стока (ΔQ , %), температуры воздуха (ΔT , °C) и атмосферных осадков (ΔPr , %) в бассейне Волги у Волгограда в теплые эпохи. *a* — сток воды (ΔQ , %), *б* — температура воздуха (ΔT , °C), *в* — атмосферные осадки (ΔPr , %). 1 — микулинское межледниковье (метод палеоклиматической реконструкции на основе ископаемой пыльцы растений), 2 — бореальное потепление (глобальная климатическая модель MSU), 3 — атлантический оптимум голоцена (глобальная климатическая модель MSU), 4 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик увеличены на статистическую ошибку расчетов), 5 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик уменьшены на статистическую ошибку расчетов), 6 — атлантический оптимум голоцена (осредненные палеоклиматические оценки, полученные на ансамбле глобальных климатических моделей программы RMP-II), 7 — субатлантическое потепление (глобальная климатическая модель MSU), 8 — современное потепление (1981–2020 гг.); осредненные климатические сценарии, полученные на ансамбле глобальных климатических моделей программ: 9 — CMIP3_B1_2011-2039, 10 — CMIP3_A2_2011-2039, 11 — CMIP5_RCP2.6_2011-2039, 12 — CMIP5_RCP8.5_2011-2039, 13 — CMIP5_RCP2.6_2011-2039_ББ, 14 — CMIP5_RCP8.5_2011-2039_ББ, 15 — CMIP3_B1_2040-2069, 16 — CMIP3_A2_2040-2069, 17 — CMIP5_RCP2.6_2040-2069_ББ, 18 — CMIP5_RCP8.5_2040-2069_ББ.

дового стока (рис. 7г) в указанных сценарных климатических условиях в 2011–2039 гг. составило 2–12% (по климатическим сценариям программ CMIP3 и CMIP5), в 2040–2069 гг. — 9–12% (по климатическим сценариям программы CMIP3). Наши расчеты, проведенные на основе уравнения среднего многолетнего водного баланса и среднеансамблевых данных о сценарных изменениях атмосферных осадков и испарения, полученных в рамках программы CMIP5, показывают, что возможные изменения годового стока Волги в этих сценарных условиях менее заметны, чем приведенные выше. Так, в 2011–2039 гг. сток Волги может быть выше современного на 1.4–2.6%, в 2040–2069 гг. — на 3.5–4.2%.

Гидрографы стока. Волна половодья для условий рассмотренных климатических сценариев может компактно смещаться на месяц раньше при одновременном существенном увеличении

стока в месяц с наибольшим в период половодья стоком (рис. 6в).

Распределение стока по гидрологическим сезонам года. В сценарных условиях первой трети (2011–2039 гг.) и середины текущего века (2040–2069 гг.), вероятно, сток основных гидрологических сезонов года будет выше современного (кроме летне-осеннего стока, если исходить из климатических сценариев CMIP5 в 2011–2039 гг.). При этом в середине века их изменения могут быть более заметны (см. рис. 7г). Сток половодья в 2011–2039 гг. может увеличиться на 4–17%, зимний сток — на 6–97%, а летне-осенний (при сценариях CMIP3) — на 12–19% или уменьшиться (при реализации сценариев CMIP5) на 6.1–8.3%. В середине века (2040–2069 гг., сценарии CMIP3) сток половодья, вероятно, будет выше современного на 12–14%, зимний — на 22–35%, а летне-осенний — на 17%.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЙ ГОДОВОГО И СЕЗОННОГО СТОКА ВОЛГИ В ТЕПЛЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭПОХИ ПРОШЛОГО, НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО

Отметим, что все рассмотренные теплые эпохи характеризовались положительными аномалиями годовой температуры воздуха относительно современных условий (базового периода), также как и аномалии годовых сумм атмосферных осадков за исключением бореального и субатлантического потепления и атлантического оптимума голоцена, рассчитанных на глобальной климатической модели MSU (Кислов, 1993). Наибольшими аномалиями годовой температуры воздуха характеризовались оптимумы микулинского межледниковья и голоцена (рассчитанные на основе ископаемой пыльцы растений) и сценарные условия глобального антропогенного потепления, а годовой суммой атмосферных осадков микулинское межледниковье и рассмотренные временные срезы глобального потепления текущего столетия (рис. 8).

Годовой сток Волги, рассчитанный на ММВБ для условий теплых эпох микулинского межледниковья и атлантического оптимума голоцена (если исходить из палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологических методах), был ниже современного (см. рис. 8). Тогда как, согласно среднеансамблевым модельным палеоклиматическим реконструкциям программы PMIP-II и глобальной климатической модели MSU, в условиях теплых эпох голоцена (атлантический оптимум голоцена, бореальное и субатлантическое потепление) годовой сток Волги был выше современного. И при сценарном антропогенном потеплении он также может быть выше современного особенно заметно в середине текущего века. Отметим, что изменения годового стока, полученные на основе среднеансамблевых модельных сценариев годового испарения и годовых сумм атмосферных осадков и уравнения водного баланса, существенно ниже оценок, полученных на ММВБ. И при современном глобальном потеплении годовой сток Волги также заметно превышает сток базового периода.

При этом в условиях потепления в период инструментальных наблюдений сток всех сезонов превышал сток базового периода, так же, как и в теплые эпохи голоцена (если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях). И в сценарных климатических условиях текущего столетия сток всех гидрологических сезонов (за рядом исключений, см. рис. 7), так же, как и годовой сток, был выше базового. Но при современном потеплении сток половодья практически не изменялся, в то время как в указанных выше как сценарных условиях, так и в теплых геологических эпохах аномалии стока половодья были

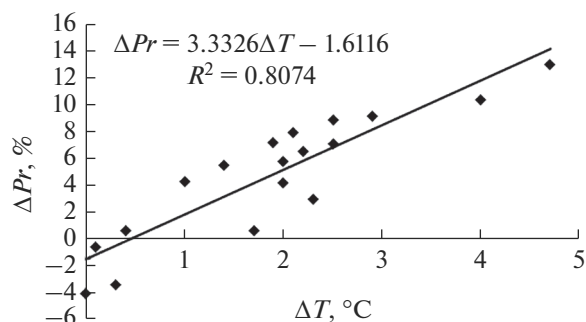


Рис. 9. Корреляция отклонений годовых сумм атмосферных осадков (ΔPr , %) и среднегодовой температуры воздуха (ΔT , °C) в бассейне Волги у Волгограда от их значений для базового периода в условиях теплых эпох геологического прошлого, инструментального периода и сценарных климатических изменений в XXI в.

весьма заметными. В сценарных условиях увеличение как сезонного, так и годового стока характеризуется, как правило, сходным масштабом. При этом в условиях модельных палеоклиматических реконструкций наибольшие изменения происходили с годовым стоком и стоком половодья, тогда как сток межженных сезонов изменялся существенно менее заметно. А вот в условиях атлантического оптимума голоцена (климатические условия которого были реконструированы на основе палинологического метода) наибольшие изменения затрагивали сток межженных сезонов. Тогда как в микулинское межледниковье наиболее заметные изменения (разного знака) коснулись стока половодья, зимнего, а также годового стока.

Несмотря на то, что были использованы данные об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков, полученные на основе многолетних рядов наблюдений, палеоклиматических реконструкций, исходящих из модельных и традиционных подходов, а также различных методов обобщения сценарных изменений, выявляется достаточно тесная корреляция между аномалиями их изменений во все рассмотренные теплые климатические эпохи (рис. 9). В то же время сколько-нибудь тесной корреляции между аномалиями годового стока с аномалиями годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков не обнаруживается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены сходства и различия климатических условий (температуры воздуха и атмосферных осадков), годового и сезонного стока, а также гидрографов стока Волги у Волгограда в эпохи глобального потепления геологического прошлого (оптимум микулинского межледниковья, атлантический оптимум, бореальное и субатланти-

ческое потепление голоцена,), периода потепления инструментального периода наблюдений (начиная с 1981 г.) и сценарного глобального потепления в XXI в.

Изменения стока геологического прошлого и сценарного будущего были оценены на основе модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН, и уравнения среднего многолетнего водного баланса. В качестве климатических условий для оценки изменений стока были использованы результаты палеоклиматических реконструкций, основанные на реконструкциях растительности по данным спорово-пыльцевого анализа и результатах расчетов, выполненных на ансамбле глобальных климатических моделей программы RMIР-II, а также результаты оценки изменений климата в XXI в. при условии реализации сценариев антропогенного глобального потепления, полученных в рамках реализации программ МГЭИК/ІРСС СМІР3 и СМІР5. Современные многолетние изменения стока Волги проанализированы на основе методов анализа долговременных контрастных фаз его восстановленных значений (с исключенными антропогенными изменениями).

Наибольшими аномалиями годовой температуры воздуха в бассейне Волги характеризовались оптимумы микулинского межледникового и голоцена (рассчитанные на основе ископаемой пыльцы растений) и сценарные условия глобального антропогенного потепления, а изменениями годовой суммой атмосферных осадков микулинское межледниковье и рассмотренные временные срезы глобального потепления текущего столетия.

Годовой сток Волги в условиях теплых эпох микулинского межледникового и атлантического оптимума голоцена (если исходить из палеоклиматических реконструкций, основанных на палеонтологических методах) был ниже современного. Тогда как согласно модельным палеоклиматическим реконструкциям и сценариям в условиях теплых эпох голоцена и при сценарном антропогенном потеплении (особенно в середине текущего столетия), а также в условиях современного глобального потепления годовой сток Волги оказывается выше, чем в базовый период.

Выявлены значительные различия в изменениях сезонного распределения стока Волги между всеми рассмотренными теплыми климатическими эпохами. При этом изменения сезонного распределения при современном глобальном потеплении во многом сходны (за исключением стока половодья) с теми, что можно ожидать в сценарных условиях, а также могли наблюдаться (с рядом исключений) в теплые эпохи голоцена, если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях. При этом в условиях модельных палеоклиматических реконструкций

наибольшие изменения происходили с годовым стоком и стоком половодья, тогда как сток межженных сезонов изменялся существенно менее заметно. А вот в условиях атлантического оптимума голоцена (климатические условия которого были реконструированы на основе ископаемой пыльцы растений) наибольшие изменения затрагивали сток межженных сезонов. Тогда как в микулинское межледниковье наиболее заметные изменения (разного знака) коснулись стока половодья, зимнего, а также годового стока.

Несмотря на то, что были использованы весьма разнородные данные об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков, полученные на основе многолетних рядов наблюдений, палеоклиматических реконструкций, исходящих из модельных и традиционных подходов, а также различных методов обобщения сценарных изменений, выявлена достаточно тесная корреляция между аномалиями их изменений во все рассмотренные теплые эпохи.

Региональная граница начала современного глобального потепления в бассейне Волги, определенная как начало долговременных фаз повышенной годовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков, осредненных по ее бассейну, относится (в зависимости от используемых данных) соответственно к 1978–1987 гг. и к 1975 г. В этот период наблюдалась фаза повышенного стока обоих межженных сезонов, фазы повышенного и пониженного стока половодья (примерно одинаковой продолжительности) и годового стока, фаза повышенного стока которого была существенно продолжительнее. Разница в стоке контрастных фаз для годового и сезонного стока составляла 16, 17, 19% для годового стока, стока половодья, летне-осеннего сезона и 37% для зимнего стока.

В период инструментальных наблюдений (особенно начиная с 1920-х годов) выявлена высокая степень синхронности долговременных фаз повышенного/пониженного стока Волги с соответствующими фазами индекса Северо-Атлантического колебания и периодов повышения и понижения годовых уровней Каспийского моря.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

FUNDING

The study was prepared within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев В.Г. Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчетах стока // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. Ленинград: Гидрометеиздат, 1959. Т. II. С. 3–49.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72–81.
- Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. Вып. 145. Гидрологические изменения. 2018. С. 206–218.
- Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
- Величко А.А., Климанов В.А., Беляев А.В. Реконструкция стока Волги и водного баланса Каспия в оптимумы микулинского межледниковья и голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 1988. № 1. С. 27–37.
- Величко А.А., Беляев А.В., Георгиади А.Г., Климанов В.А. Реконструкция климатических условий и речного стока северного полушария в течение микулинского межледниковья и голоцена // Водные ресурсы. 1992. № 4. С. 34–42.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический ин-т, 2008. 600 с.
- Георгиади А.Г. Реконструкция речного стока на основе исторических и косвенных данных // Водные ресурсы. 1992. № 4. С. 106–114.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Долговременные фазы многолетних изменений стока крупнейших рек водосбора Северного Ледовитого океана // Вопросы географии. Вып. 142. География полярных регионов. 2016. С. 178–195.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Долговременные изменения стока крупнейших Сибирских рек // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 5. С. 70–81. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне реки Волги при антропогенном потеплении климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 72–79.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Особенности гидрологических аномалий в бассейне р. Волги в теплые эпохи голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 2006. № 6. С. 112–120.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Речной сток в бассейнах крупнейших рек южного склона Русской равнины в позднеатлантический оптимум // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 6. С. 113–124.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова 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.: Изд-во “Макс Пресс”, 2014. 214 с.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек Русской равнины и Сибири // ДАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885539-544>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
- Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных климатических изменений на гидрологический режим и водные ресурсы рек бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
- Георгиевский М.В., Голованов О.Ф. Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5 // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. Вып. 2. С. 206–218.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
- Кислов А.В. Математическое моделирование климата оптимума голоцена // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 2. № 7. С. 705–713.
- Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколичина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов С.М., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс Пресс, 2008. 290 с.
- Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли / ред. В.И. Корзун. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 637 с.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд. Российской академии наук, 2019. 300 с.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.К. Оценки возможных изменений регионального гидрологического режима в XXI веке, основанные на глобальных климатических моделях // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2003. № 39. С. 130–144.
- Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен-голоцен. М.: ГЕОС, 2009. 120 с.
- Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 35–52.
- Попова В.В., Георгиади А.Г. Спектральные оценки связи изменчивости стока Волги и Североатлантического колебания в 1882–2007 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 2. С. 73–85. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59>
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Снижение стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 1. С. 1–14.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Геоморфологические подходы к оценке величины речного сто-

- ка в геологическом прошлом (ст. 5. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами) // Геоморфология. 2019. № 1. С. 66–79.
- Шерстюков Б.Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2021. 221 с.
- Шумм С. Палеогидрология четвертичного периода // Четвертичный период в США. М.: Изд-во “Мир”, 1968. Т. 1. С. 541–559.
- Ackerley D., Reeves J., Barr C., Bostock H., Fitzsimmons K., Fletcher M.-S., Gouramanis C., McGregor H., Mooney S., Phipps S.J., Tibby J., Tyler J. Evaluation of PMIP2 and PMIP3 simulations of mid-Holocene climate in the Indo-Pacific, Australasian and Southern Ocean regions // *Clim. Past*. 2017. Vol. 13. P. 1661–1684. <https://doi.org/10.5194/cp-13-1661-2017>
- Arc Atlas: Our Earth. Environmental Systems Research Institute, Inc. and DATA+ All Rights Reserved. 1996.
- Atlas of Paleoclimates and Paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene. Stuttgart: Gustav Fesher Verlag, Budapest, 1992.
- Borisova O., Sidorchuk A., Panin A. Palaeohydrology of the Seim River basin, Mid-Russian Upland, based on palaeochannel morphology and palynological data // *Catena*. 2006. Vol. 66. № 1–2. P. 53–73.
- Caesar L., McCarthy G.D., Thornalley D.J.R., Cahill N., Rahmstorf S. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last Millennium // *Nature Geoscience*. 2021. Vol. 14. P. 118–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>
- Daily and Sub-daily Precipitation for the Former USSR. Ver. 1.0. Asheville, USA: National Climatic Data Center, 2005.
- Georgiadi A.G. Reconstruction of river runoff based on natural proxy data // *Climatic change in the historical and instrumental period*. Brno: Mazaric Univ., 1990. P. 134–137.
- Georgiadi A.G., Danilenko A.O. Northern Dvina River: Long Periods of Increased and Decreased Water and Ionic Runoff in the 19th–21st Centuries // *Geography and Natural Resources*. 2022. № 2. P. 149–155. <https://doi.org/10.1134/S1875372822020032>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora // *Environ. Res. Lett.* 2022. Vol. 17. P. 085002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // *Polarforschung*. 2018. Vol. 87 (2). P. 167–176. <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // *Water Res.* 2021. Vol. 47. № 6. P. 913–923. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Assessing the effect of climatic and anthropogenic factors on the annual runoff of large rivers in European Russia and Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bristol: IOP Publ., 2019. Vol. 38. P. 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012027>
- Jones P.D., Jónsson T., Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland // *Int. J. Climatol.* 1997. Vol. 17. P. 1433–1450.
- Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Taylor K.E. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research // *Bull. of the American Meteorological Society*. 2007. № 88. P. 1383–1394.
- Panin A., Matlakhova E. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // *Catena*. 2015. Vol. 130. P. 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016>
- Panin A.V., Nefedov V.S. Analysis of Variations in the Regime of Rivers and Lakes in the Upper Volga and Upper Zapadnaya Dvina Based on Archaeological-Geomorphological Data // *Water Res.* 2010. Vol. 37. № 1. P. 16–32.
- Shiklomanov I.A., Georgievsky V.Yu., Shalygin A.L. River runoff as a major factor of long-term Caspian level fluctuations. Proceedings of the International Scientific Conference “Climate and Water Balance Changes in the Caspian Region” (19–20 October 2010, Astrakhan). Astrakhan, 2011. P. 9–15.

The Volga River Water Runoff in Warm Epochs

A. G. Georgiadi¹, * and I. P. Milyukova¹

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: georgiadi@igras.ru

Similarities and differences in climatic conditions (air temperature and precipitation), annual and seasonal runoff, as well as hydrographs of the Volga River runoff near Volgograd in the epochs of global warming in the geological past, the period of modern warming (since 1981), and the scenario global warming in the 21st century are revealed. Changes in the runoff of the geological past and the scenario future were estimated on the basis of the monthly water balance model developed at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences and the equation of the average long-term water balance. The results of traditional and model paleoclimatic reconstructions and climate scenarios of global warming in the 21st century were used as climatic conditions for assessing changes in runoff. Modern long-term changes in the Volga River runoff are analyzed on the basis of ideas about long-lasting contrasting phases. As a result of the analysis, it is shown that

the annual Volga River runoff in the conditions of the warm epochs of the Mikulinsky interglacial and the Atlantic optimum of the Holocene (based on traditional paleoclimatic reconstructions) was lower than the modern one. Whereas, according to model paleoclimatic reconstructions of the warm epochs of the Holocene, climatic scenarios of anthropogenic warming, as well as in the conditions of modern global warming, the annual runoff of the Volga River is higher than in the base period. Significant differences in the changes in the seasonal distribution of the Volga River runoff between all the considered warm epochs were revealed. The different nature of these changes is characteristic of the warm epochs of the paleoepochs and in the conditions of scenario climatic changes in the 21st century. At the same time, changes in the seasonal distribution during modern global warming are similar to those that can be expected with scenario warming in the first third and middle of the current century (except snowmelt flood runoff). A close correlation was revealed between the anomalies of changes in the annual air temperature and the annual amount of precipitation in all the considered warm epochs. During the period of instrumental observations, the long-term phases of the increased or decreased water runoff of the Volga River are synchronous with the corresponding phases of the index of the North Atlantic oscillation and the periods of increase and decrease in the annual levels of the Caspian Sea.

Keywords: global warming, warm geological epochs, scenario warming, changes in annual and seasonal runoff, long phases, methods for assessing runoff changes

REFERENCES

- Ackerley D., Reeves J., Barr C., Bostock H., Fitzsimmons K., Fletcher M-S., Gouramanis C., McGregor H., Mooney S., Phipps S.J., Tibby J., Tyler J. Evaluation of PMIP2 and PMIP3 simulations of mid-Holocene climate in the Indo-Pacific, Australasian and Southern Ocean regions. *Clim. Past*, 2017, vol. 13, pp. 1661–1684. <https://doi.org/10.5194/cp-13-1661-2017>
- Andreyanov V.G. Cyclical fluctuations of annual runoff, their changes in the territory and accounting for runoff calculations. *Tr. III Vsesoyuz. Gidrol. S'ezda*. Vol. II. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1959, pp. 3–49. (In Russ.).
- Arc Atlas: Our Earth. Environmental Systems Research Institute, DATA+, 1996.
- Atlas of Paleoclimates and Paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene. Stuttgart: Gustav Fesher Verlag, Budapest, 1992.
- Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D. Modern features of the hydrological regime of the rivers of the Volga basin. In *Vopr. Geografii, Tom 145* [Problems of Geography. Vol. 145], 2018, pp. 206–218. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Filippova I.A. Bayesian prediction of minimum river runoff under nonstationary conditions of future climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 497–503. <https://doi.org/10.3103/S1068373916070074>
- Borisova O., Sidorchuk A., Panin A. Palaeohydrology of the Seim River basin, Mid-Russian Upland, based on palaeochannel morphology and palynological data. *Catena*, 2006, vol. 66, no. 1–2, pp. 53–73.
- Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [Climate in the Past and Future]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980. 352 p.
- Caesar L., McCarthy G.D., Thornalley D.J.R., Cahill N., Rahmstorf S. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last Millennium. *Nature Geosci.*, 2021, vol. 14, pp. 118–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>
- Daily and Sub-daily Precipitation for the Former USSR. Version 1.0*. Asheville, USA: National Climatic Data Center, 2005.
- Georgiadi A.G. Reconstruction of river runoff based on natural proxy data. In *Climatic change in the historical and instrumental period*. Brno: Mazaric Univ., 1990, pp. 134–137.
- Georgiadi A.G. Reconstruction of river flow based on historical and indirect data. *Vodn. Resur.*, 1992, no. 4, pp. 106–114. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Danilenko A.O. Northern Dvina River: long periods of increased and decreased water and ionic runoff in the 19th–21st centuries. *Geogr. Nat. Resour.*, 2022, vol. 43, no. 2, pp. 149–155. <https://doi.org/10.1134/S1875372822020032>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17, no. 085002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Long phases of long-term changes in the flow of the largest rivers of the Arctic Ocean catchment. In *Vopr. Geografii. Tom 142* [Problems of Geography. Vol. 142], 2016, pp. 178–195. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Long-term changes in the flow of the largest Siberian rivers. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 5, pp. 70–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. The scale of hydrological changes in the Volga River basin under anthropogenic climate warming. *Meteorol. Hydrol.*, 2002, no. 2, pp. 72–79. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Features of hydrological anomalies in the Volga River basin in the warm epochs of the Holocene. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2006, no. 6, pp. 112–120. (In Russ.).

- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. River flow in the basins of the largest rivers of the southern slope the Russian plain in the Late Atlantic optimum. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2007, no. 6, pp. 113–124. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of the largest Siberian rivers. *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, pp. 167–176.
<https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin. *Water Resour.*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 913–923.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of Climatic and Anthropogenic Factors to Changes in the Flow of Large Rivers of the Russian Plain and Siberia. *Dokl. Earth Sci.*, 2019, vol. 488, pp. 1211–1216.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X19100106>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Assessing the effect of climatic and anthropogenic factors on the annual runoff of large rivers in European Russia and Siberia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 38, no. 012027.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012027>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kislov A.V., Anisimov O.A., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Borodin O.O. *Stsenarnaya otsenka veroyatnykh izmenenii rechnogo stoka v basseynakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 1. Bassein reki Leny* [Scenario Assessment of Probable Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers of Russia. Part 1. Lena River Basin]. Moscow: “Max Press” Publ., 2011. 179 p.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsenarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseynakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: “Max Press” Publ., 2014. 214 p.
- Georgievsky M.V., Golovanov O.F. Forecast estimates of changes in water resources of the largest rivers of the Russian Federation based on data on river flow of the CMIP5 project. *Vestn. St. Petersburg Gos. Univ. Nauki Zemle*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 206–218. (In Russ.).
- Georgievsky V.Yu., Yezhov A.V., Shalygin A.L., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.B. Assessment of the impact of possible climate changes on the hydrological regime and water resources of the rivers of the former USSR. *Meteorol. Hydrol.*, 1996, no. 11, pp. 89–99. (In Russ.).
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushy s atmosferoi* [Modeling of Heat and Moisture Exchange of the Land Surface with the Atmosphere]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Jones P.D., Jónsson T., Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.*, 1997, vol. 17, pp. 1433–1450.
- Kislov A.V. Mathematical modeling of the Holocene optimum climate. *Izv. Atmosf. Ocean. Phys.*, 1993, vol. 2, no. 7, pp. 705–713. (In Russ.).
- Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malkhazova S.M., Sokolikhina N.N., Surkova G.V., Toropov S.M., Chernyshev A.V., Chumachenko A.N. *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* [Forecast of Climatic Resource Availability of the East European Plain in the Conditions of Warming of the 21st Century]. Moscow: “Max Press” Publ., 2008. 290 p.
- Lvovich M.I. *Mirovye vodnye resursy i ikh budushchee* [World Water Resources and Their Future]. Moscow: Mysl’ Publ., 1974. 448 p.
- Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Taylor K.E. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2007, no. 88, pp. 1383–1394.
- Mirovoi vodnyi balans i vodnye resursy Zemli* [World Water Balance and Water Resources of the Earth]. Korzun V.I., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 637 p.
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.K. Estimates of possible changes in the regional hydrological regime in the 21st century based on global climate models. *Izv. Atmosf. Ocean. Phys.*, 2003, no. 39, pp. 130–144. (In Russ.).
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseynov* [Models of Flow Formation in the Problems of Hydrology of River Basins]. Moscow: Russ. Acad. Sci. Publ., 2019. 300 p.
- Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnii pleistotsen-golotsen* [Paleoclimates and Paleolandscapes of the Extratropical Space of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene]. Moscow: GEOS Publ., 2009. 120 p.
- Panin A., Matlakhova E. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *Catena*, 2015, vol. 130, pp. 46–61.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016>
- Panin G.N., Diansky N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V., Vyruchalkina T.Yu. Assessment of climate change in the Arctic in the 21st century based on a combined prognostic scenario. *Arktika: Ecol. and Econ.*, 2017, no. 2 (26), pp. 35–52. (In Russ.).
- Panin A.V., Nefedov V.S. Analysis of Variations in the Regime of Rivers and Lakes in the Upper Volga and Upper Zapadnaya Dvina Based on Archaeological-Geomorphological Data. *Water Resour.*, 2010, vol. 37, no. 1, pp. 16–32.
- Popova V.V., Georgiadi A.G. Spectral estimates of the relationship between the variability of the Volga runoff and the North Atlantic oscillation in 1882–2007. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 2, pp. 73–85. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59>

- Sherstyukov B.G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'nie svyazi, prognozy* [Vibrational Climate System, Resonances, Long-Distance Communications, Forecasts]. Obninsk: RIHMI-WDC Publ., 2021. 221 p.
- Shiklomanov I.A., Georgievski V.Yu., Shalygin A.L. River runoff as a major factor of long-term Caspian level fluctuations. In *Proc. Int. Sci. Conf. "Climate and Water Balance Changes in the Caspian Region" (19–20 October 2010, Astrakhan)*. Astrakhan, 2011, pp. 9–15.
- Shumm S. Paleohydrology of the Quaternary period. In *Chetvertichnyi period v SShA. Tom I* [The Quaternary Period in the USA. Vol. I]. Moscow: Mir Publ., 1968, pp. 541–559. (In Russ.).
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. River runoff decrease in North-Eurasian plains during the Holocene optimum. *Water Resour.*, 2012, vol. 39, no. 1, pp. 69–81.
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. Geomorphological approaches to assessing the magnitude of river runoff in the geological past (Article 5. Comparative analysis of the results obtained by different methods). *Geomorph.*, 2019, no. 1, pp. 66–79. (In Russ.).
- Velichko A.A., Belyaev A.V., Georgiadi A.G., Klimanov V.A. Reconstruction of climatic conditions and river flow in the Northern Hemisphere during the Mikulin interglacial and Holocene. *Vodn. Resur.*, 1992, no. 4, pp. 34–42. (In Russ.).
- Velichko A.A., Klimanov V.A., Belyaev A.V. Reconstruction of the Volga River flow and water balance the Caspian Sea in the optima of the Mikulino interglacial and Holocene. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1988, no. 1, pp. 27–37. (In Russ.).
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: Gos. Hydrol. Inst. Publ., 2008. 600 p.