
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 556.5.01

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В РЕГИОНАХ РУССКОЙ РАВНИНЫ В ТЕПЛЫЕ ЭПОХИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОШЛОГО И СЦЕНАРНОГО БУДУЩЕГО

© 2018 г. А. Г. Георгиади*, И. П. Милюкова, Е. А. Кашутина

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: galex50@gmail.com*

Поступила в редакцию 07.03.2017 г.

Принята к печати 29.05.2018 г.

Выявлены особенности изменений речного стока Волги и Дона и водного баланса естественных ландшафтов Центральной лесостепи Русской равнины в позднеатлантический оптимум и в сценарных условиях потепления климата текущего столетия. Были использованы палеоклиматические реконструкции, основанные на данных спорово-пыльцевого анализа ископаемых растений и на расчетах, проведенных на ансамбле глобальных климатических моделей программы PMIP-II; а также сценарии потепления климата, выполненные на ансамбле глобальных климатических моделей программ CMIP3 и CMIP5. Гидрологические изменения оценивались на основе модели месячного водного баланса и модели влагопереноса в системе “почва—растительность—приземный слой атмосферы”. Показано, что наиболее заметные изменения речного стока Волги и Дона проявляются в трансформации характера его внутригодового распределения. Ощутимый рост температуры воздуха на фоне малозаметного изменения атмосферных осадков в рассматриваемые периоды в условиях Центральной лесостепи Русской равнины не приводит к сколько-нибудь значимым изменениям составляющих водного баланса лесных и степных ландшафтов в период вегетации.

Ключевые слова: Волга, Дон, Центральная лесостепь, позднеатлантический оптимум голоцена, глобальное потепление климата, гидрологические изменения

DOI: 10.1134/S2587556618050060

Введение. Более 30 лет назад была высказана идея об использовании прошлых геологических эпох в качестве аналогов будущих состояний природных систем и, прежде всего, климата [3, 4]. С тех пор это направление интенсивно развивается, и в последние два десятилетия, наряду с традиционными методами реконструкции климата, все более активно применяются климатические модели [15, 34]. В течение достаточно продолжительного времени выполнялась международная программа сравнения результатов модельных палеореконструкций климата (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project-PMIP, этапы I и II), которая составляет часть международной программы исследования глобальных изменений в прошлом (Past Global Changes – PAGES). В рамках PMIP-II участвовало 18 моделей климата [34]. В настоящее время реализуется ее третий этап.

Вместе с тем, традиционные методы реконструкции палеоклимата [17, 19, 24, 26, 37], по-прежнему широко используются как на глобальном, так и на региональном уровнях. На наш взгляд, одновременное развитие этих направлений и сопоставление их результатов является важнейшим условием дальнейшего развития методов реконструкции климата прошлого.

Уже более тридцати лет результаты палеоклиматических реконструкций используются для восстановления речного стока прошлых геологических эпох на глобальном, континентальном, региональном и локальном уровнях. Был разработан целый ряд методов гидрологических реконструкций, начиная с достаточно простых зональных зависимостей годового стока от климатических элементов [5, 6, 31, 32], до существенно более сложных воднобалансовых моделей с деkadным [13] и месячным разрешением [11, 12, 33], и заканчивая моделями общей циркуляции атмосферы, в которых речной сток рассчитывался как остаточный член по разности между смоделированными атмосферными осадками и испарением [15].

Для палеореконструкции речного стока и других составляющих водного баланса авторами был разработан подход, основанный на использовании моделей месячного водного баланса и влагопереноса в системе “почва—растительность—приземный слой атмосферы”, позволяющий количественно оценить влияние основных факторов на речной сток и водный баланс как на водосборе крупной реки, так и на уровне отдельных ландшафтов и их комплексов, которые уже прошли апробацию для различных регионов России [7–9, 14].

Таблица 1. Характеристика бассейнов Волги и Дона

№	Речной бассейн	Площадь бассейна (тыс. км ²)	Природная зона (ее доля в общей площади бассейна, %)*	Годовые атмосферные осадки**, мм	Годовой сток (условно-естественный), мм	Годовое испарение, мм	Среднегодовая температура воздуха**, °С
1	Бассейн р. Волги, г. Волгоград	1360	Лесная (74); лесостепная (15); степная (9); другие (2)	590	190	400	4
2	Бассейн р. Дона, станица Раздорская	378	Лесная (5); лесостепная (32); степная (63)	540	70	471	6.5

Источник: * [25], ** [28].

В данной статье рассматриваются результаты реконструкции речного стока крупнейших рек Русской равнины и водного баланса естественных ландшафтов Центральной лесостепи для условий позднелатентического оптимума голоцена и сценарного потепления климата, обусловленного выбросом в атмосферу парниковых газов в результате деятельности человека.

Краткая характеристика регионов. Бассейны Волги и Дона. Две трети площади бассейна Волги (табл. 1, рис. 1) покрыты тайгой (около 34% общей территории бассейна) и смешанными лесами (более 40%) [25]. Остальную часть бассейна занимают лесостепь (15%), степь (9%), а также полу-

пустыня и интразональные ландшафты. В бассейне Дона преобладают степной (63% всей территории) и лесостепной (32%) зональные комплексы. Основная часть естественных ландшафтов преобразована человеком. Водный режим Волги и Дона изменен также многочисленными водохранилищами.

Преобладание лесных ландшафтов, а также более холодные климатические условия определяют формирование повышенного стока в бассейне Волги.

Верхняя часть бассейна р. Сейм до г. Рыльск занята в основном ландшафтами Центральной лесостепи. Почвенный покров представлен различными подтипами мощных черноземов. Естественный растительный покров (луговые злаково-разнотравные и разнотравно-злаковые степи в сочетании с дубовыми лесами) значительно изменен человеком, леса на современном этапе занимают менее 10% площади, участки некосимой степи — не более 1% территории. Коренные степные и лесные угодья преобразованы и заняты пашней, пастбищами, сенокосами, селитебными территориями, дорогами (рис. 2), что повлекло за собой изменение водного баланса в регионе. По сравнению с естественными угодьями антропогенные ландшафты в большинстве своем характеризуются повышенным испарением с поверхности почвы и пониженной транспирацией, а также сужением диапазона изменений почвенных влагозапасов за период вегетации (рис. 3). Суммарное испарение с агроландшафтов близко к суммарному испарению с некосимой степи. Среднеголетняя за период 1960–1990 гг. сумма атмосферных осадков за период вегетации составляет 327 мм.

Методы оценки гидрологических изменений. Модель месячного водного баланса. В ее основе лежит уравнение среднегодовой месячного водного баланса речных водосборов, которое в самом общем виде для каждой расчетной ячейки регулярной сетки можно записать следующим образом:

$$Q(t) = P_{sr}(t) - E(t) - dW/dt - dH_{gr}/dt,$$

где $Q(t)$ — речной сток, включающий в себя сумму поверхностного, подповерхностного (из слоя ак-

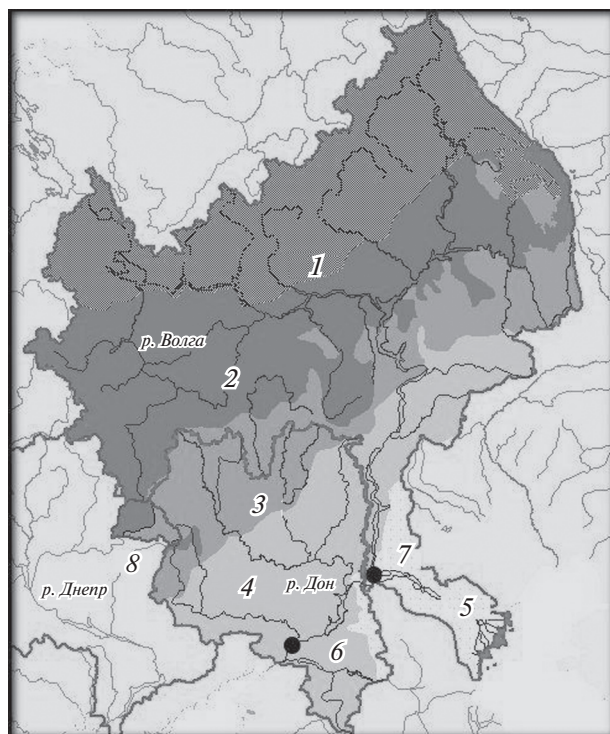


Рис. 1. Природные зоны в бассейнах Волги, Дона и Сейма. 1 — тайга, 2 — смешанные леса, 3 — лесостепь, 4 — степь, 5 — полупустыня, 6 — ст. Раздорская, 7 — г. Волгоград, 8 — бассейн р. Сейм, г. Рыльск. Источник: составлено по данным [26].

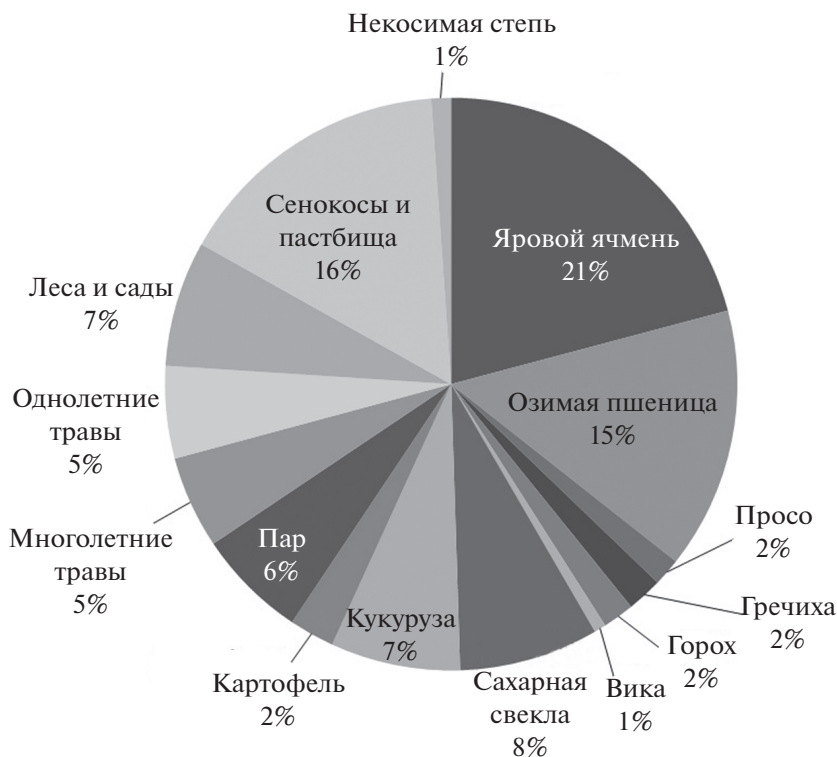


Рис. 2. Экспликация земель в Центральной лесостепи на 1990 г.

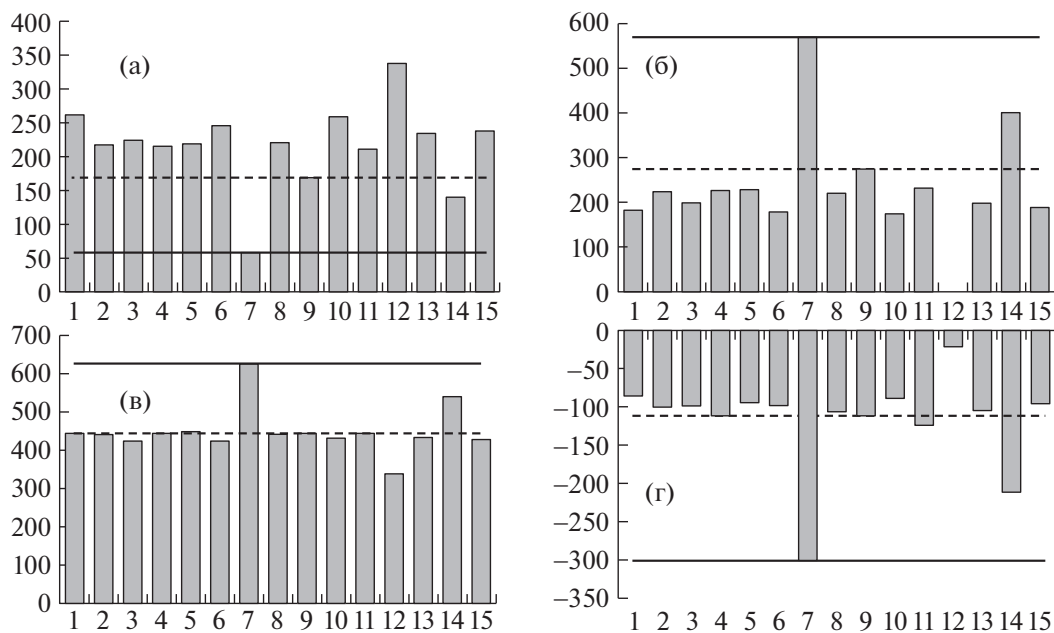


Рис. 3. Составляющие водного баланса вегетационного сезона (с 10 апреля по 10 октября) 15 участков Центральной лесостепи, характерные для периода 1960–1990 гг.: а — испарение с поверхности почвы, б — транспирация, в — суммарное испарение, г — изменение почвенных влагозапасов на участках, занятых: 1 — викой, 2 — горохом, 3 — гречихой, 4 — картофелем, 5 — косимой степью, 6 — кукурузой, 7 — лесом, 8 — многолетними травами, 9 — некошенной степью, 10 — однолетними травами, 11 — озимой пшеницей, 12 — паром, 13 — просом, 14 — сахарной свеклой, 15 — ячменем. Линиями показаны значения составляющих водного баланса для участков с естественной растительностью: — для лесных участков; - - - - для некошенной степи.

тивного водообмена почвогрунтов) и подземного (из подземного горизонта активного водообмена) стока (мм); $P_{sr}(t)$ — суммарная водоподача на поверхность бассейна, включающая в себя сумму жидких атмосферных осадков и водоподачу на поверхность бассейна в результате снеготаяния (мм); $E(t)$ — испарение (мм); dW/dt — изменение запаса воды в деятельном слое почвогрунтов на момент времени t (мм); dH_{gr}/dt — изменение запаса воды в подземном водоносном горизонте активного водообмена на момент времени t (мм).

Модель может быть отнесена к классу макромасштабных гидрологических моделей, которые активно разрабатываются [29, 30, 38, 39]. В ней описываются основные процессы гидрологического цикла суши: инфильтрация и аккумуляция влаги в почве, испарение, промерзание и оттаивание почвогрунтов, накопление снегозапасов и снеготаяние, формирование поверхностного и почвенного, грунтового и полного речного стока. В ней учитываются макромасштабные неоднородности гидрометеорологических полей и воднофизических свойств почв. Модель прошла апробацию для условий крупных речных бассейнов, расположенных в разных природных зонах России, включая зону вечномёрзлых грунтов [8–10].

В предлагаемом подходе оцениваются сценарные изменения среднего многолетнего месячного стока в ячейках регулярной сетки. Воднобалансовые расчеты проводятся в пределах упомянутых ячеек, охватывающих слой почвогрунтов, включающий горизонт подземных вод активного водообмена, характерный для средних по размеру речных водосборов. В пределах таких ячеек рассчитываются основные составляющие водного баланса, в том числе сток, формирующийся на поверхности и в подповерхностном слое, и сток из зоны активного водообмена, на основе чего определяется суммарный сток из ячейки.

Речной сток, температура воздуха, атмосферные осадки задаются для каждой из ячеек. Расчеты проводятся по квазисуткам [9, 10, 39], т.е. среднемесячные значения температуры воздуха и атмосферных осадков интерполируются по суткам в пределах каждого месяца на основе использования разработанных алгоритмов, которые подробно изложены в [9].

Модель влагопереноса в системе “почва–растительность–приземный слой атмосферы”. Она разработана и параметризована для основных плакорных угодий Центральной лесостепи Русской равнины с учетом их почвенного и растительного покровов, в том числе для лесных угодий и участков некосимой степи [14]. Модель включает в себя взаимосвязанные блоки испарения, модель поглощения почвенной влаги корнями растений [36] и перераспределения влаги в почвенной толще по уравнению диффузии. Испарение рассчитывается по модели А.И. Будаговского [1, 2], детально учитывающей состояние

растительного покрова на участке. В модели предполагается, что в вегетационный период на плакорных участках лесостепи нет стока, а все осадки, за исключением задержанных растительностью и испарившихся с поверхности почвы, просачиваются в почвенно-грунтовую толщу. Стандартный шаг по времени при расчетах — 1 сутки, по глубине — 0.1 м.

Расчетный вегетационный период для всех вариантов начинался 10 апреля и заканчивался 10 октября. Для участков под лесной растительностью с мощной, глубоко расположенной корневой системой, в расчетах предполагалось, что транспирация осуществляется из 2-метрового почвенного слоя, для прочих участков, в том числе для участков, покрытых целинной степной растительностью, из верхнего 1-метрового слоя почвы. Начальный весенний влагозапас в слое 0–100 см на некосимой (“целинной”) степи, в соответствии с имеющимися материалами наблюдений по Центрально-Черноземному заповеднику, составляет около 300 мм, что и было принято в расчетах, в лесу — в слое 0–200 см — 680 мм [18].

Необходимые для модельных расчетов параметры растительного покрова (динамика листового индекса, высота растительного покрова, фитопараметры модели Будаговского) задавались как осредненные за многолетний период для рассматриваемой территории [20, 22, 23]. Эти величины предполагались постоянными для всех метеорологических сценариев и всех периодов расчета.

Характеристика данных палеоклиматических реконструкций. Для проведения палеогидрологических оценок для условий оптимума голоцена были использованы данные традиционных палеоклиматических реконструкций отклонений температуры воздуха и атмосферных осадков за январь и июль от их современных значений. Они были получены на основе зонального и информационно-статистического методов [17, 24]. Гидрологические оценки проводились для трех вариантов палеорекоkonструкций. В одном из них к рассчитанному по палинологическим данным отклонению климатической характеристики добавлялась абсолютная величина статистической ошибки (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”. В третьем варианте использовалось значение исходного отклонения без учета его статистической ошибки (оно соответствует “среднему отклонению” и было использовано в реконструкциях водного баланса ландшафтов Центральной лесостепи). Данные о январских отклонениях распространялись на месяцы холодного полугодия (октябрь–март), а июльские — на месяцы теплого полугодия (апрель–сентябрь), а

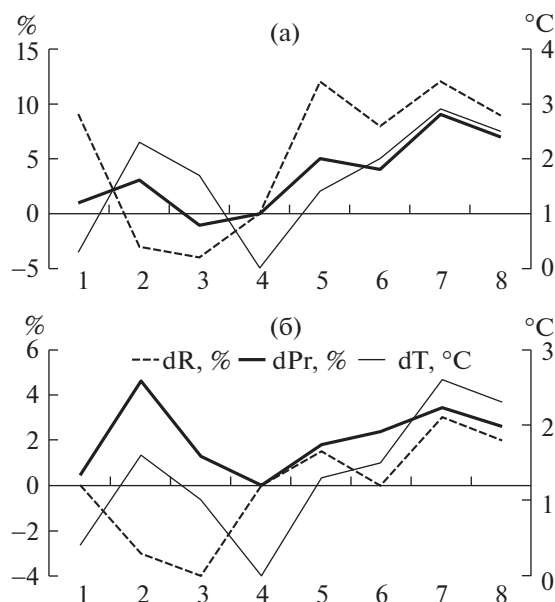


Рис. 4. Отклонения средних многолетних среднегодовых гидроклиматических характеристик: речного стока dR (% от современного стока), атмосферных осадков dPr (% от современных значений) и температуры воздуха dT (°C) в теплые эпохи прошлого и будущего для бассейнов Волги (а) и Дона (б). На оси абсцисс: 1 – оптимум голоцена по РМIP-II, 2 – оптимум голоцена по [19] при максимальных отклонениях Rg и T , 3 – оптимум голоцена по [19] при минимальных отклонениях Rg и T ; 4 – современный уровень, принятый за ноль отсчета, 5 – по сценарию A2 для 2025 г., 6 – по сценарию B1 для 2025 г., 7 – по сценарию A2 для 2050 г., 8 – по сценарию B1 для 2050 г.

для модели влагопереноса в системе “почва–растительность–приземный слой атмосферы” на вегетационный период.

Модельные палеоклиматические реконструкции среднемесячных аномалий указанных выше климатических характеристик для каждого месяца среднемноголетнего года получены осреднением результатов восстановления, проведенного на 18 глобальных климатических моделях, включенных в программу РМIP-II [34].

Данные сценарных модельных оценок возможного потепления климата. Известно, что с 1990–2000 гг. для получения оценок гидрологических условий будущего климата достаточно широкое применение получили сценарные оценки глобальных климатических изменений, основанные на расчетах на моделях общей циркуляции атмосферы и океана [см., например, 8]. Под климатическим сценарием, следуя определению Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК-IPCC), понимается правдоподобная (или вероятная) эволюция климата в будущем, согласующаяся со сценариями эмиссий парниковых газов и других атмосферных примесей (сценарии международного проекта сравнения климатических моделей CMIP3-Sou-

pled Model Intercomparison Project 3 [35] или изменения концентрации антропогенных парниковых газов, а не их эмиссий (сценарии международного проекта CMIP5 [27] с существующими представлениями о воздействии изменений концентрации этих примесей на климат). Соответственно, под сценарием изменения климата подразумевается разница между климатическим сценарием и современным состоянием климата.

В качестве климатических сценариев использованы группы сценариев с наиболее ((A2 из программы CMIP3) и RCP 8.5 (CMIP5)) и наименее (B1 (CMIP3) и RCP 2.6 (CMIP5)) интенсивным ростом среднеглобальной среднегодовой температуры воздуха.

Оценки климатических изменений основывались на подготовленной геоинформационной системе, включающей в себя глобальные сеточные (через 1° по широте и долготе) данные о модельных значениях современных (осредненных для периода 1960–1990 гг.) и сценарных (осредненных для периодов 2010–2039 гг. и 2040–2069 гг., которые условно отнесены соответственно к 2025 г. и к 2050 г.) среднемесячных значениях температуры воздуха и атмосферных осадков и дельты между ними. При этом для расчетов по результатам проекта CMIP3 использовался ансамбль из 10 моделей (из более, чем 20 моделей, включенных в этот проект). Они были отобраны А.В. Кисловым с соавторами [16] на основе сравнения современного модельного и наблюдаемого климата для территории Русской равнины. А в случае с проектом CMIP5 были использованы результаты расчетов, полученных по всем (примерно тридцати) климатическим моделям, включенным в этот проект. Среднеансамблевые сценарии изменений среднемесячных значений температуры воздуха и атмосферных осадков по каждой из групп выбранных контрастных сценариев были получены на основе осреднения данных, полученных на каждой из климатических моделей, входящих в указанные группы сценариев.

На основе подготовленных данных рассмотренных выше палеоклиматических реконструкций и сценарных климатических изменений в среде ArcView 3.2 была подготовлена географическая информационная система, включающая в себя слои отклонений среднемесячных сумм атмосферных осадков и температуры воздуха от их современных значений в узлах регулярной сетки 1×1 градус по широте и долготе для Северной Евразии и всей суши в целом.

Гидроклиматические изменения в бассейнах Волги и Дона. Изменения температуры воздуха. По масштабу изменений средней многолетней среднегодовой температуры воздуха, осредненной по бассейну Волги, рассматриваемые периоды располагаются в следующем порядке (рис. 4а). По среднеансамблевым оценкам, полученным в рамках программы РМIP-II, оптимум голоцена

был теплее современного периода на 0.4°C , тогда как, если основываться на палинологическом методе [17, 19], положительная аномалия возрастает до $1.7\text{--}2.3^{\circ}\text{C}$ [19]. Здесь и далее приведены аномалии для минимального и максимального вариантов палеоклиматических реконструкций [19]. Последние оценки согласно среднеансамблевым расчетам, проведенным в рамках программы Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата (IPCC, 2007) в рамках CMIP3, весьма близки к уровню повышения температуры воздуха вероятному в первой трети текущего века ($1.4\text{--}2^{\circ}\text{C}$). Здесь и далее первое значение относится к семейству сценариев A2 (наиболее интенсивное среднеглобальное потепление), второе — к семейству сценариев B1 (умеренное среднеглобальное потепление). В середине же этого столетия вероятно повышение температуры воздуха на $2.5\text{--}2.9^{\circ}\text{C}$.

В бассейне Дона оценки потепления в оптимум голоцена также значительно отличались между собой. От 0.4°C (PMIP-II) и до $1\text{--}1.6^{\circ}\text{C}$ [19], что также весьма близко к масштабу потепления климата, вероятного в первой трети этого столетия ($1.3\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$). К середине этого века температура воздуха может повыситься на $2.3\text{--}2.6^{\circ}\text{C}$, если исходить из среднеансамблевых климатических сценариев CMIP3 [35] (рис. 4б).

Изменения годовых среднечасовых сумм осадков в бассейне Волги менее выражены (см. рис. 4а). Так, по результатам реконструкции, основанной на палинологических данных [19], отклонение годовой суммы атмосферных осадков от современных значений составляло от -3 мм (менее 1%) до 17 мм (около 3%) [19], а согласно PMIP-II — на 3 (менее 1%) мм. При сценарном потеплении CMIP 3 возможен рост осадков на $32\text{--}24$ мм (5–4%) в первой трети текущего века и на $54\text{--}38$ мм (9–7%) в его середине.

На Дону ситуация с изменениями атмосферных осадков аналогична. При этом масштабы как прошлых, так и сценарных изменений, как правило, меньше волжских (см. рис. 4б).

Изменения речного стока. Полученная на модели месячного водного баланса [10] оценка аномалии годового стока Волги в оптимум голоцена, исходящая из модельной среднеансамблевой палеоклиматической реконструкции PMIP-II, составляет 9% от его современного значения (см. рис. 4а). Тогда как расчеты изменений стока, выполненные на основе палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологическом методе [19], показывают, что сток этого периода мог быть ниже современного на 3–4%. Качественно этот результат согласуется с оценками палеостока, полученными ранее для Волги на основе зональных зависимостей годового стока [5, 6], и с результатами реконструкции стока по древним излучинам [21].

В первой трети текущего столетия вероятно повышение годового стока Волги соответственно на 12 (сценарий A2) — 2% (сценарий B1), в середине века на 12–9%.

Сток Дона в первой трети текущего века практически не изменится в сравнении с современным (см. рис. 4б). Полученные оценки аномалий стока, характерные для оптимума голоцена и исходящие из разных методов палеоклиматических реконструкций, также менее заметны, чем на Волге.

Исходя из палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологических методах, сток половодья Волги в период оптимума голоцена мог быть на 3–4% ниже современного, тогда как зимой и в летне-осенний период он был выше современного (рис. 5а). А исходя из модельных реконструкций палеоклимата (PMIP-II), сток половодья мог превышать его современные значения на 23%, а в другие сезоны года сток практически не отличался от современного. В сценарных условиях первой трети текущего века (сценарии A2 и B1) вероятное повышение стока Волги в основные сезоны года может составить: в половодье — на 17% (сценарий A2) и 4% (сценарий B1), зимой — на 6 и 15%, а летом-осенью — на 19 и 12%. При этом половодье может начинаться на месяц раньше без существенных изменений его формы. Вероятно, что к середине века внутригодовая структура стока существенно не изменится относительно предшествующей стадии потепления климата.

Внутригодовая структура изменений стока Дона в условиях оптимума голоцена и сценарного потепления климата в первой трети этого века качественно близка между собой (рис. 5б). Половодье на Дону при модельной реконструкции оптимума голоцена (PMIP-II) выполаживается и смещается на более ранние сроки и при этом его объем малозаметно снижается (на 3%). Но незначительно повышается зимний (на 5%), а также летне-осенний сток (на 7%). По направленности изменений стока сезонов похожая картина получается, если основываться на традиционных палеоклиматических реконструкциях [19], с той лишь разницей, что отличия более заметны. Так, сток половодья в оптимум голоцена мог быть ниже (на 12–11%), а в другие сезоны выше (зимой на 19–30%, летом-осенью на 6–8%) современного. В сценарных условиях первой трети текущего столетия вероятно, что половодье будет ниже современного на 2–4%, а зимний и летне-осенний сток выше на 17–23% и 6% соответственно. На следующем этапе потепления климата (в середине века) доля стока гидрологических сезонов года практически не изменится за исключением зимнего стока.

Изменения водного баланса естественных ландшафтов Центральной лесостепи. В Центральной лесостепи в рассмотренные теплые климатические эпохи относительные изменения сумм атмо-

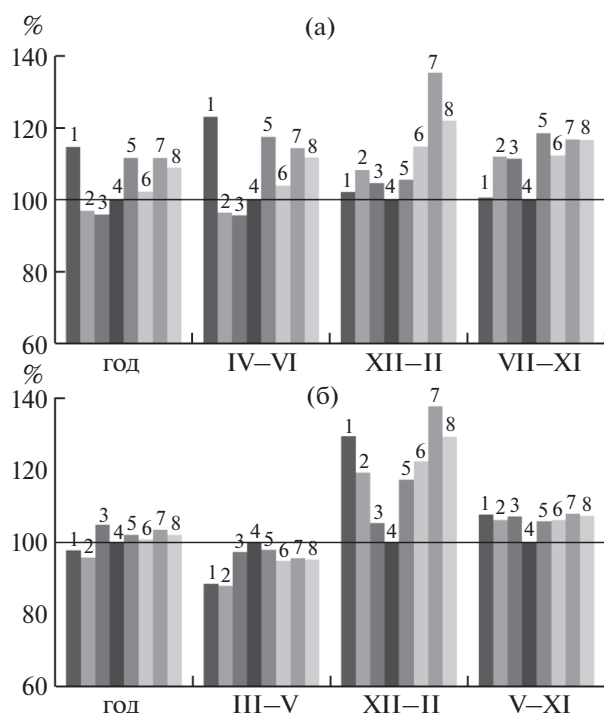


Рис. 5. Отклонения (%) от современных значений (принятых за 100%) среднего многолетнего годового (год), за половодье (IV–VI), зимнего (XI–II) и летне-осеннего (VII–XI) стока в теплые эпохи прошлого и будущего, для бассейнов Волги (а) и Дона (б). На оси абсцисс: 1 – оптимум голоцена по РМIP-II, 2 – оптимум голоцена по [19] при максимальных отклонениях P_г и T, 3 – оптимум голоцена по [19] при минимальных отклонениях P_г и T, 4 – современный уровень, принятый за 100%, 5 – по сценарию A2 для 2025 г., 6 – по сценарию B1 для 2025 г., 7 – по сценарию A2 для 2050 г., 8 – по сценарию B1 для 2050 г.

сферных осадков за вегетационный период менее заметны, чем изменения температуры воздуха. При этом в оптимуме голоцена осадки были меньше современных на 3% (11 мм) по реконструкции, выполненной в рамках программы РМIP-II, и на 0.3% (1 мм) по реконструкции, основанной на палинологических данных [19]. В сценарных же условиях для 2010–2039 гг. можно ожидать небольшого их увеличения (на 2–4%, или на 8–12 мм), за исключением малозаметного снижения осадков (на 0.3%, или на 0.1 мм) при реализации сценария A2 (рис. 6).

Более значительные изменения характерны для температуры воздуха сезона вегетации. В рассмотренные временные срезы она оказалась выше климатической нормы за 1960–1990 гг. По оценкам, выполненным в рамках программы РМIP-II, ее рост составляет 1.1°C, а по реконструкциям, основанным на ископаемой пыльце растений, 0.7°C. Вероятно, что сценарный рост температуры в первой трети XXI в. будет выше. По сценариям программы CMIP3 он может до-

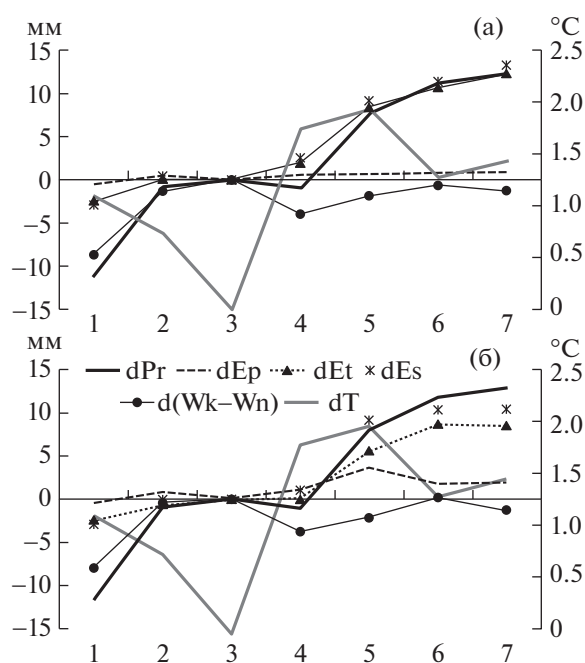


Рис. 6. Отклонения от современных значений средних многолетних среднегодовых гидроклиматических характеристик: атмосферных осадков dPr (мм), испарения с поверхности почвы dEp (мм); транспирации dEt (мм); суммарного испарения dEs (мм) и температуры воздуха dT (°C) в теплые эпохи прошлого и будущего для лесных (а) и степных (б) ландшафтов Центральной лесостепи. На оси абсцисс: 1 – оптимум голоцена по РМIP-II, 2 – оптимум голоцена по [19], 3 – современный уровень, принятый за ноль отсчета, 4 – по сценарию A2 для 2025 г., 5 – по сценарию B1 для 2025 г., 6 – по сценарию RCP2.6 для 2025 г., 7 – по сценарию RCP8.5 для 2025 г.

стигать 1.7°C для ансамбля A2 и 1.9°C для ансамбля B1, а по сценариям программы CMIP5 1.3–1.4°C (см. рис. 6).

На фоне довольно значительного роста в рассматриваемые теплые эпохи, прежде всего температуры воздуха, относительно периода 1960–1990 гг., изменения составляющих водного баланса (испарения с поверхности почвы, транспирации, суммарного испарения и изменения почвенных влагозапасов) для лесных и степных участков оказались малозаметны. По всем сценариям, кроме РМIP-II, отмечается небольшое увеличение испарения с поверхности почвы, транспирации и суммарного испарения, максимальное для сценариев B1, RCP2.6 и RCP8.5, для которых характерно наибольшее увеличение осадков на фоне повышенных температур. По палеоклиматическим данным РМIP-II в оптимуме голоцена все компоненты испарения были очень незначительно ниже современных – испарение с поверхности почвы в лесу сократилось на 0.9% (0.5 мм) от климатической нормы за 1960–1990 гг., а суммарное испарение уменьшилось на 3 мм.

По всем временным срезам для рассмотренных теплых климатических эпох иссушение верхнего метрового слоя почвы к концу сезона вегетации по сравнению с периодом 1960–1990-х годов выше современных значений, хотя и очень незначительно. Наибольшее иссушение (до 8 мм) отмечается в расчетах по реконструкциям, выполненным в рамках программы PMIP-II для оптимума голоцена, т.е. при наименьшем рассмотренном атмосферном увлажнении. Однако и осадки, превышающие современные (сценарии B1, RCP2.6, RCP 8.5 для 2010–2039 гг.), не компенсируют увеличивающееся иссушение деятельного слоя почвы к концу вегетационного сезона. Дефицит почвенных влагозапасов тем больше, чем выше температура воздуха в сценарии и чем ниже сценарные осадки.

Таким образом, ощутимый рост температуры воздуха на фоне малозаметного изменения атмосферных осадков в оптимуме голоцена и в сценарных климатических условиях в Центральной лесостепи Русской равнины не приводит к сколько-нибудь значимым изменениям составляющих водного баланса лесных и степных ландшафтов.

Выводы. Наиболее близкими по сценарному термическому режиму в бассейнах Волги и Дона, характерному для первой трети текущего столетия, оказываются условия позднеатлантического оптимума голоцена, восстановленные по палинологическим данным [19]. При этом годовой речной сток Волги и Дона по результатам расчетов на модели месячного водного баланса получился ниже современного. Качественно этот результат согласуется с оценками палеостока, полученными ранее для Волги на основе зональных зависимостей годового стока [5, 6], и с результатами реконструкции стока по древним излучинам [21]. При сценарных климатических условиях и при палеоклиматических реконструкциях, основанных на ансамбле климатических моделей программы PMIP-II, он оказывается выше современного (на Волге) или почти не отличается от него (на Дону). В условиях климата сценарного будущего (в первую треть и середине текущего столетия) годовой сток Волги вероятно будет увеличиваться по мере потепления климата, тогда как сток Дона останется практически неизменным.

Наиболее заметные различия гидрологических особенностей оптимума голоцена, современного и сценарного периодов проявляются в изменении характера внутригодового распределения элементов гидрологического режима. При этом на Дону сток половодья в более теплые периоды по сравнению с современными условиями снижается, а межени возрастает. На Волге сток каждого из сезонов в сценарных условиях возрастает, но в разной степени. Внутригодовая структура палеостока Волги в период оптимума голоцена замет-

но различается для палеоклиматических реконструкций, полученных на основе палинологического метода и на глобальных климатических моделях.

Ощутимый рост температуры воздуха на фоне малозаметного изменения атмосферных осадков в оптимуме голоцена и в сценарных климатических условиях в Центральной лесостепи Русской равнины не приводит к сколько-нибудь значимым изменениям составляющих водного баланса лесных и степных ландшафтов.

Благодарности. Исследования были поддержаны РФФИ грант № 17-05-00948.

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 17-05-00948.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будаговский А.И. Уточнение моделей испарения почвенных вод // Водные ресурсы. 1986. № 5. С. 58–69.
2. Будаговский А.И. Методы оценки параметров моделей испарения почвенных вод // Водные ресурсы. 1986. № 6. С. 3–15.
3. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
4. Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеиздат, 1986. 160 с.
5. Величко А.А., Беляев А.В., Климанов В.А., Георгиади А.Г. Реконструкция климатических условий и речного стока северного полушария в оптимумы Микулинского межледниковья и голоцена // Водные ресурсы. 1992. № 4. С. 34–42.
6. 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.
7. Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Изменение гидрологического цикла вегетационного периода Центральной лесостепи в XXI столетии при реализации различных климатических сценариев // Вопросы географии. Сб. 133: Географо-гидрологические исследования. М.: Издательский дом “Кодекс”, 2012. С. 237–258.
8. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милокова 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.
9. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милокова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Макс Пресс, 2014. 214 с.
10. Георгиади А.Г., Милокова И.П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне реки Волги при антропогенном потеплении климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 54–59.

11. *Георгиади А.Г., Милукова И.П.* Особенности гидрологических аномалий в бассейне р. Волги в теплые эпохи голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 2006. № 6. С. 112–120.
12. *Георгиади А.Г., Милукова И.П.* Речной сток в бассейнах крупнейших рек южного склона Русской равнины в позднеатлантический оптимум // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 6. С. 113–124.
13. *Георгиевский В.Ю.* Изменения стока рек России и водного баланса Каспийского моря под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2005. 39 с.
14. *Кашутина Е.А.* Моделирование межгеосистемных различий влагопереноса в почве-растительности-атмосфере лесостепи: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИГ РАН, 1999. 24 с.
15. *Кислов А.В.* Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: МАИК "Наука"/Интерпериодика, 2001. 351 с.
16. *Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколикхина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н.* Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс Пресс, 2008. 290 с.
17. *Климанов В.А.* К методике восстановления количественных характеристик климата прошлого // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1976. № 2. С. 92–98.
18. Материалы стационарного изучения компонентов лесостепных заповедных биогеоценозов: Климат, влажность почвы и фитофенология / Центрально-Черноземный заповедник им. проф. В.В. Алехина. Л.: Гидромет., 1979. Вып. 12. 428 с.
19. Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен–голоцен. М.: ГЕОС, 2009. 120 с.
20. *Савельева Т.А.* Особенности испарения, его структуры и продуктивности использования влаги в различных природных и природно-технических комплексах // Водный баланс основных экосистем Центральной лесостепи: Материалы экспериментальных исследований / ред. А.М. Грин. М.: ИГ АН СССР, 1974. Ч. 1. С. 154–212.
21. *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. 69–81.
22. *Утехин В.Д., Хоанг Тьонг.* Структура и продуктивность фитомассы луговой степи // Биота основных геосистем Центральной лесостепи / отв. ред. А.М. Грин. М.: ИГ АН СССР, 1976. С. 7–24.
23. Учет разнообразия геосистем при определении тепло- и влагообмена подстилающей поверхности с атмосферой. Программа ГКНТ № 18 "Глобальные изменения природной среды и климата": Промежуточный отчет / М.: ИВП РАН, 1991.
24. *Хотинский Н.А., Савина С.С.* Палеоклиматические схемы территории СССР в бореальном, атлантическом и суббореальном периодах голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 1985. № 4. С. 18–34.
25. Arc Atlas: Our Earth. Environmental Systems Research Institute, Inc. and DATA+ All Rights Reserved. 1996.
26. Atlas of Paleoclimates and Paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene. Gustav Fesher Verlag, Stuttgart. Budapest. 1992.
27. CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project. URL. <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>.
28. Daily and Sub-daily Precipitation for the Former USSR. Version 1.0. National Climatic Data Center, Asheville, USA, 2005.
29. *Döll P., Kaspar F., Lehner B.* A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation // J. of Hydrology. 2003. № 270. P. 105–134.
30. *Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Grabs W.* Global composite runoff fields based on observed river discharge and simulated water balance. Technical report, WMO Global Runoff Data Center Report. Koblenz, Germany. 1999. № 22.
31. *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.
32. *Georgiadi A.G., Jai-Ho Oh, Yong Hee Lee.* Impact of Global Climate Warming on Macroscale Distribution of Mean Annual Water Budget Elements // The Fourth International Conference on Global Continental Palaeohydrology-GLOCOPH 2000. Jointly with Symposium on Glaciation and Reorganization of Asia's Network of Drainage, August 21–26, 2000, Moscow and Central Part of Russian Plain, Russia. Conference papers and abstracts. Institute of Geography RAS. 2000. ISBN 5-89658-015-0. P. 22–27.
33. *Georgiadi A.G., Milyukova I.P.* Method of monthly water budget estimation under impact of global climate change // The Fourth International Conference on Global Continental Palaeohydrology-GLOCOPH 2000. Jointly with Symposium on Glaciation and Reorganization of Asia's Network of Drainage, August 21–26, 2000, Moscow and Central Part of Russian Plain, Russia. Conference papers and abstracts. Institute of Geography RAS. 2000. ISBN 5-89658-015-0. P. 106–109.
34. *Joussaume S., Taylor K.E., Braconnot P., Mitchell J.F.B., Kutzbach J.E., Harrison S.P., Prentice I.C., Broccoli A.J., Abe-Ouchi A., Bartlein P.J., Bonfils C., Dong B., Guiot J., Henerich K., Hewitt C.D., Jolly D., Kim J.W., Kislov A., Kitoh A., Loutre M.F., Masson V., McAvaney B., McFarlane N., de Nobler N., Peltier W.R., Peterschmitt J.Y., Pollard D., Rind D., Royer J.F., Schlesinger M.E., Syktus J., Thompson S., Valdes P., Vittoretti G., Webb R.S., Wypytta U.* Monsoon changes for 6000 years ago: results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP) // Geophysical Research Letters. 1999. V. 26. P. 859–862.
35. *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 // Bulletin of the American Meteorological Society. 2007. № 88. P. 1383–1394.

36. Molz F.J., Remson I. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants // *Water Res. Res.* 1970. V. 6. № 5. P. 1346–1356.
37. Resources and Environment World Atlas // Russian Academy of Sciences, Institute of Geography / Holzel (Ed.). Vienna, 1998.
38. WATCH (*Water and Global Changes*). Technical Report. 2008. № 1. P. 1–19.
39. Willmott C.J., Rowe C.M., Mintz Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle // *J. of Climatology*. 1985. V. 5. P. 589–606.

Hydrological changes in regions of the Russian Plain in warm epochs of the geological past and the scenario future

A. G. Georgiadi*, I. P. Milyukova, and E. A. Kashutina

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

*e-mail: galex50@gmail.com

Received March 07, 2017

Accepted May 29, 2018

The features of the Volga and the Don river runoff changes and the water balance of the natural landscapes of the Central forest steppe of the Russian Plain during the Late Holocene Optimum and scenario conditions of global climate warming in the current century were revealed. Paleoclimatic reconstructions based on data of spore and pollen analysis of fossil plants and on calculations carried out on the ensemble of global climate models of PMIP-II program, as well as scenarios of climate warming, performed on an ensemble of global climate models of CMIP3 and CMIP5 programs, were used. Hydrological changes were evaluated on the basis of the monthly water balance and SVAT models. It is shown that the most significant changes of the Volga and Don river runoff are detected in changing the nature of its intra-annual distribution. In studied periods, the notable increase in air temperature against a backdrop of insignificant changes of atmospheric precipitation in Central forest steppe conditions of the Russian Plain does not lead to any significant changes in the water balance components of forest and steppe landscapes in growth season.

Keywords: Volga River, Don River, Central forest steppe, Late Holocene Optimum, global climate warming, hydrological changes.

REFERENCES

1. Budagovsky A.I. Evaluation of model for soil water evaporation. *Water Resour.*, 1986, no. 5, pp. 58–69. (In Russ.).
2. Budagovsky A.I. Methods for parameters estimations for evaporation model of soil water. *Water Resour.*, 1986, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.).
3. Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [Climate in the Past and in the Future]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ, 1980. 352 p.
4. Budyko M.I., Golitsyn G.S., Izrael Yu.A. *Global'nye klimaticheskie katastrofy* [Global Climatic Catastrophes]. Moscow: Gidrometeoizdat Publ, 1986. 160 p.
5. Velichko A.A., Belyaev A.V., Klimanov V.A., Georgiadi A.G. Reconstruction of climate and river runoff in the Northern Hemisphere in Mikulino interglacial and Holocene Optimum. *Water Resour.*, 1992, no. 4, pp. 34–42. (In Russ.).
6. Velichko A.A., Klimanov V.A., Belyaev A.V. Reconstruction of Volga runoff and Caspian water balance in the optimum of the Mikulino interglacial and Holocene. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1988, no. 1, pp. 27–37. (In Russ.).
7. Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Hydrological Cycle Change for Vegetation Season in the Central Forest-steppe in XXI Century Realization of Different. In *Voprosy geografii, sb. 133* [Problems of Geography, no. 133]. Moscow: Kodeks Publ., 2012, pp. 237–258.
8. 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 basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' I. Bassein reki Leny* [Scenario Estimation of Probable River Runoff Changes in the Largest Russian River Basins. Part I. The Lena River Basin]. Moscow: Maks Press Publ., 2011. 179 p.
9. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsenarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' II. Basseiny rek Volgi i Dona* [Scenario Estimation of Probable River Runoff Changes in the Largest Russian River Basins. Part II. The Volga & Don River Basins]. Moscow: Maks Press Publ., 2014. 214 p.
10. Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Possible scales of hydrological changes in the Volga river basin during anthropogenic climate warming. *Russ. Meteor. Hydrol.*, 2002, no. 2, pp. 54–59.
11. Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Features of hydrological anomalies in Volga river basin during the Holocene warm epochs. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2006, no. 6, pp. 112–120. (In Russ.).
12. Georgiadi A.G., Milyukova I.P. River runoff in the largest river basins of southern slope of Russian plain in Late Atlantic Optimum. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 6, pp. 113–124. (In Russ.).

13. Georgievsky V.Yu. Changes runoff of Russian rivers and Caspian sea water balance under influence of anthropogenic impact and global warming. *Extended Abstract of Dr. Sci. (Geogr.) Dissertation*. St. Petersburg, 2005. 39 p. (In Russ.).
14. Kashutina E.A. Modeling of intergeosystem differences of moisture transfer in soil-vegetation-atmosphere in forest-steppe. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Institute of Geography RAS, 1999. 24 p. (In Russ.).
15. Kislov A.V. *Klimat v proshlom, nastoyashchem i budushchem* [Climate in Past, Present and Future.]. Moscow: MAIK Nauka/Interperiodika Publ., 2001. 351 p.
16. Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malhazova S.M., et al. *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* [Climatic Forecast of Resourcing of East European Plain in Warming Conditions of 21 Century]. Moscow: Maks Press Publ. 2008. 290 p.
17. Klimanov V.A. About method of reconstruction of past climatic characteristics. *Vestn. Mosc. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1976, no. 2, pp. 92–98. (In Russ.).
18. *Materialy statsionarnogo izucheniya komponentov lesostepnykh zapovednykh biogeotsenozov: Klimat, vlazhnost' pochvy i fitofenologiya. Central'no-Chernozemnyi zapovednik im. prof. V.V. Alekhina*. [Stationary Research Components of Protected Steppe Ecosystems: Climate, Soil Moisture and Phytophenology. Alekhin Central Chernozem Soil Reserve]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1979, vol. 12. 428 p.
19. *Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnii pleistotsen–golotsen* [Paleoclimate and Paleolandscapes of Extratropical Territory of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene]. Moscow: GEOS Publ., 2009. 120 p.
20. Savel'eva T.A. Features of evaporation, its structure and productivity of soil water using in different natural and natural-technical complexes. In *Vodnyi balans osnovnykh ekosistem Central'noi lesostepi: Materialy eksperimental'nykh issledovaniy* [Water Balance of Main Ecosystems of Central Forest-Steppe Experimental Research Materials], A.M. Grin, Ed. Moscow: IG AN SSSR, 1974, part 1, pp. 154–212. (In Russ.).
21. Sidorchuk A.Ju., 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.
22. Utehin V.D. Hoang T'jung. The structure and productivity of biomass of meadow steppe. In *Biota osnovnykh geosistem Tsentral'noi lesostepi* [Biota of the Main Geosystems of the Central forest-steppe], A.M. Grin, Ed. Moscow: Institute of Geography AN SSSR, 1976, pp. 7–24. (In Russ.).
23. *Uchet raznoobraziya geosistem pri opredelenii teplo- i vlagobmena podstilayushchei poverkhnosti s atmosferoi. Programma GKNT No. 18 "Global'nye izmeneniya prirodnoi sredy i klimata": Promezhutochnyi otchet*. [Consideration of Geosystems Diversity in Determining the Heat and Moisture Exchange of Underlying Surface and Atmosphere. Program number 18 "Global Changes of Natural Environment and Climate": Intermediate Report]. Moscow: IWP RAS, 1991. (In Russ.).
24. Khotinsky N.A., Savina S.S. Paleoclimatic schemes of the USSR territory in Boreal, Atlantic and Subboreal Holocene. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.*, 1985, no. 4, pp. 18–34. (In Russ.).
25. Arc Atlas: Our Earth. Environmental Systems Research Institute and DATA+, 1996.
26. Atlas of Paleoclimates and Paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene. Gustav Fesher Verlag Publ, Stuttgart, Budapest, 1992.
27. CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project. <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>.
28. Daily and Sub-Daily Precipitation for the Former USSR. Version 1.0. National Climatic Data Center, Asheville, USA, 2005.
29. Döll P., Kaspar F., Lehner B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *J. Hydrol.*, 2003, no. 270, pp. 105–134.
30. Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Grabs W. Global composite runoff fields based on observed river discharge and simulated water balance. Technical report, WMO Global Runoff Data Center Report. Koblenz, Germany, 1999. No. 22.
31. Georgiadi A.G. Reconstruction of river runoff based on natural proxy data. In *Climatic change in the historical and instrumental period*. Brno: Mazaric University, 1990, pp. 134–137.
32. Georgiadi A.G., Jai-Ho Oh, Yong Hee Lee. Impact of Global Climate Warming on Macroscale Distribution of Mean Annual Water Budget Elements. In *The Fourth International Conference on Global Continental Palaeohydrology-GLOCOPH 2000, August 21–26, 2000, Moscow and Central Part of Russian Plain, Russia. Conference papers and abstracts*. Institute of Geography RAS. 2000, pp. 22–27.
33. Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Method of monthly water budget estimation under impact of global climate change. In *The Fourth International Conference on Global Continental Palaeohydrology-GLOCOPH 2000, August 21–26, 2000, Moscow and Central Part of Russian Plain, Russia. Conference papers and abstracts*. Institute of Geography RAS, 2000. pp. 106–109.
34. Joussaume S. et al. Monsoon changes for 6000 years ago: results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). *Geophys. Res. Lett.*, 1999, vol. 26, pp. 859–862.
35. 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. Meteor. Soc.*, 2007, no. 88, pp. 1383–1394.
36. Molz F.J., Remson I. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.* 1970, vol. 6, no. 5, pp. 1346–1356.
37. Resources and Environment World Atlas. Russian Academy of Sciences, Institute of Geography, Holzel, Ed. Vienna, 1998.
38. WATCH (Water and Global Changes). Technical Report. 2008, no.1, pp. 1–19.
39. Willmott C.J., Rowe C.M., Mintz Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *J. Climat.*, 1985, vol. 5, pp. 589–606.