

ИЗМЕНЕНИЕ ВОДНОГО БАЛАНСА КРУПНЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ*

© 2018 г. В.Ю. Григорьев^{1,2}, Н.Л. Фролова¹, Р.Г. Джамалов²

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия

² ФГБУН «Институт водных проблем РАН», Москва, Россия

Ключевые слова: водный баланс, уравнение водного баланса, изменение климата, речной сток, осадки, испарение, бассейновые влагозапасы, потенциальное испарение, коэффициент стока, индекс аридности, GRACE.



В.Ю. Григорьев



Н.Л. Фролова



Р.Г. Джамалов

Для ряда крупных речных бассейнов европейской части России (ЕЧР), суммарной площадью 1,88 млн км², проведен анализ среднегодовых величин речного стока, осадков, испарения, потенци-

ального испарения, коэффициента стока и индекса аридности (отношения слоя осадков к слою потенциального испарения) за три периода: 1945–1977, 1978–2002, 2003–2015 годы. Выявлено, что в среднем второй период, по сравнению с первым, отличаются большие величины осадков (+4,3 %), испарения (+3,2 %), речного стока (+6,1 %) и коэффициента стока (+1,8 %). Потенциальное испарение практически не выросло (+0,09 %), вследствие чего увеличился индекс аридности (+4,2 %). Третий период характеризуется большими значениями основных воднобалансовых характеристик по сравнению с первым периодом, но меньшими по сравнению со вторым. Положительные аномалии осадков (+2,4 %) и потенциального испарения (+5,8 %) привели к тому, что третий период, в отличие от второго, был более засушливым, чем первый (индекс аридности уменьшился на 3,2 %). В статье также предложены и рассмотрены возможные причины изменения составляющих водного баланса речных бассейнов.

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ, проекты № 17-05-00518-а, 16-55-52008 МНТ_а, 17-05-41030 РГО_а. Расчет испарения и анализ поля осадков – в рамках гранта РФФИ № 17-05-01165-а

Произошедшие за последние 150 лет изменения водного баланса в глобальном масштабе связаны, главным образом, с хозяйственной деятельностью человека и значительно превышают изменения, произошедшие за предшествующее тысячелетие [1]. С начала XX в. происходит рост глобальной приземной температуры воздуха, причем темпы потепления неоднородны, выделяются три периода: потепление 1910–1945 гг., относительное постоянство 1946–1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1976 г. [2]. Рост температуры воздуха ведет к росту влажности воздуха и, как следствие, осадков. При том, что в отдельных регионах может наблюдаться как рост, так и сокращение количества осадков в зависимости от изменения атмосферной циркуляции, в среднем для мира при росте глобальной температуры воздуха на 1°C происходит рост количества осадков (P) на 1,65 % [3]. Воздействие изменения климата на величину испарения (E) неоднозначно, хотя в целом положительно. Главными факторами, обуславливающими рост испарения, являются рост осадков, дефицита влажности воздуха, суммарной радиации и увеличение продолжительности вегетационного периода [4]. В то же время рост концентрации CO_2 , являющийся основным фактором изменения климата, приводит к тому, что процесс фотосинтеза у растений становится более эффективным, а величина транспирации меньше [5, 6]. Рост выбросов аэрозолей в 1950–1985 гг. привел к снижению величин прямой и суммарной солнечной радиации, что стало главной причиной снижения величины потенциального испарения (PET) за этот период [4, 7]. Наблюдаемое в средних широтах северного полушария с середины 1970-х гг. снижение скорости ветра также является фактором уменьшения PET [8]. Изменение величины стока (R) за многолетний период обусловлено изменением величин P и E .

Целью данной работы является выявление особенностей изменений составляющих водного баланса ряда крупных речных бассейнов ЕЧР за 1945–2015 гг. Эти изменения происходят на фоне ненаправленных изменений (изменчивости). Так, для годовых сумм осадков значение коэффициента вариации C_v , характеризующего их изменчивость, колеблется от 0,15–0,17 на юго-западе ЕЧР до 0,26 в степной части Поволжья [9]. Функция распределения вероятности (ФРВ) годовых сумм осадков близка к нормальному [10]. Изменчивость годовых величин суммарного испарения меньше изменчивости годовых осадков и составляет для лесной зоны бывшего СССР 0,12, лесостепной – 0,15, степной зоны – 0,17 [11]. По современным данным, она несколько выше. Так, согласно [12], для бассейна Волги в створе г. Волгограда C_v годового испарения составляет 0,13, для бассейна Вычегды в створе г. Сыктывкара – 0,2, а для бассейна Дона в створе г. Калач – 0,34. ФРВ испарения близка к белому шуму или имеет

небольшие коэффициенты автокорреляции, причем возможны как положительные, так и отрицательные значения [12].

Для описания многолетней изменчивости годового речного стока широко используется трехпараметрическое распределение Крицкого-Менкеля. Коэффициенты вариации годового стока рек составляют на севере ЕЧР 0,20–0,25 и увеличиваются в южных районах до 0,60–0,70. Наиболее высокая изменчивость стока характерна для рек, протекающих по Прикаспийской низменности – $C_v = 0,80–1,00$ [13]. При этом для рядов речного стока, в отличие от испарения и осадков, свойственна автокорреляция. Наибольшие значения коэффициента автокорреляции присущи лесостепным и степным рекам, где они находятся в интервале от 0,2 до 0,4, достигая максимума в Приуралье 0,4–0,6 [14]. Вопрос изменчивости величин бассейновых влагозапасов пока недостаточно изучен. Вероятно, они близки к изменчивости объема воды в проточном водоеме, таком как Черное море [15], однако имеют более сложный характер в связи с отсутствием четкой связи между величиной бассейновых влагозапасов, с одной стороны, и величинами речного стока и испарения с другой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчет годовых величин P , E , PET , R , коэффициента стока (K) и индекса аридности ($AI = \frac{P}{PET}$) производился для трех периодов: t_1 – 1945–1977 гг., t_2 – 1978–2002 гг., t_3 – 2003–2015 гг. Величина стока рассчитывалась по измеренным расходам воды, осадков и потенциального испарения – по данным наблюдений на метеостанциях (рисунок), испарения – по уравнению водного баланса (1)

$$P_i - E_i - R_i - TWSC_i = 0, \quad (1)$$

где $TWSC$ – изменение величины бассейновых влагозапасов, i – индекс, обозначающий временной промежуток (1, 2, 3). При этом для периодов t_1 и t_2 величина $TWSC$ принималась равной 0. Величина $TWSC$ за t_3 рассчитывалась по данным проекта GRACE.

Выбор 1978 г. как порогового при рассмотрении изменения составляющих водного баланса обусловлен, в первую очередь, рассмотрением в ряде работ многолетних колебаний стока рек ЕЧР в виде двух условно стационарных периодов. При этом год нарушения стационарности относят к промежутку с 1976 г. по 1985 г. в зависимости от автора и конкретного речного бассейна [13, 16, 17]. Кроме того, середина 1970-х годов неоднократно рассматривалась как годы «климатического сдвига» [18–20]. Выбор 2003 г. как границы между вторым и третьим периодом обусловлен наличием данных по бассейновым влагозапасам лишь с апреля 2002 г. Отметим, что в данной статье не рассматривается вопрос стационарности рядов годовых величин



составляющих водного баланса. Основной причиной этого является то, что в условиях изменения факторов формирования водного баланса речных водосборов (в частности, изменение климата в результате хозяйственной деятельности человека) отсутствуют априорные основания для формулирования нулевой гипотезы как неизменности моментов распределения.

Ряды измеренных осадков на территории бывшего СССР за рассматриваемый период неоднородны, что связано с заменой осадкомерного прибора, вводом поправок на смачивание и изменением числа сроков измерений осадков. При существующей методике измеренные осадки могут иметь систематическую ошибку, величина которой в силу ее зависимости от ряда факторов (скорости ветра, соотношения твердых, смешанных и жидких осадков, степени открытости метеостанций) не остается постоянной. По этой причине для расчета P использовался массив осадков с устраненной по методике ГГО систематической ошибкой [21], размещенный на сайте meteo.ru. Для расчета PET применяли формулу, представленную в [22] и использующую среднюю, максимальную и минимальную температуру воздуха за сутки и величину радиации на верхней границе атмосферы (extraterrestrial solar radiation).

$$PET = 0,0009384 H_0 (T_{\text{mean}} + 17,8) (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5}, \quad (2)$$

где T_{mean} – средняя, T_{min} – минимальная и T_{max} – максимальная температура воздуха за сутки, H_0 – радиация на внешнюю границу атмосферы, МДж/сут·м².

Сравнение этого метода расчета потенциального испарения с некоторыми другими, также основанными на температуре воздуха, приведено в [23]. Для среднесуточных величин PET коэффициент детерминации между величинами, рассчитанными по уравнению (2) и уравнению Пенмана–Монтейта, составил 0,91 (для холодного и полярного климата), а величина систематической ошибки 4,18 мм/мес. Для расчета величины $TWSC_3$ использовали данные проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), в рамках которого $TWSC$ рассчитывается по изменению гравитационного поля Земли [24]. Поскольку за первый и второй периоды величина $TWSC$ была принята равной нулю, величину среднеквадратического отклонения $TWSC$ рассчитали на начало года (σ_{twsc}) для оценки погрешности расчета E , связанного с этим допущением. Расчетные величины σ_{twsc} представлены в табл. 1.

В работе рассмотрено 10 речных бассейнов (табл. 1), чья суммарная площадь составляет 1,88 млн км². При этом бассейн Дона разделен на два участка – выше створа х. Беляевский и между х. Беляевским и ст. Раздорская. Величина стока со второго участка рассчитывалась как разница между стоком в створе ст. Раздорская и х. Беляевский. Для некоторых рек при расчете величины испарения по уравнению водного баланса был учтен вклад переброски стока и потерь воды на заполнение водохранилища. Так, для р. Оки учтена переброска стока по каналу им. Москвы в объеме 1,7 км³/год [25], потери на заполнение Ириклинского водохранилища (3,3 км³) для р. Урал, Цимлянского водохранилища (24 км³) для р. Дон.

Поскольку часть из рассмотренных речных бассейнов не полностью расположена в пределах Российской Федерации (Дон – Украина, Урал – Казахстан, Нева – Финляндия) для зарубежных частей бассейнов величины осадков и потенциального испарения рассчитывали по данным UEA CRU (University of East Anglia, Climate Research Unit) [26].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Величина σ_{twsc} , а также основные воднобалансовые характеристики бассейнов за первый период представлены в табл. 1.

Величина σ_{twsc} колеблется от 36 мм в бассейне Северной Двины до 92 мм в бассейне Дона, в целом имея тенденцию возрастать с севера на юг. При этом, по отношению к рассчитанному за 1945–1977 гг. слою испарения, σ_{twsc} составляет от 0,2 % в бассейне Северной Двины до 0,51 % в бассейне Печоры. Отметим, что на многих пунктах наблюдений за 1950–1990 гг. был за-

Таблица 1. Площадь бассейнов, средние годовые величины осадков (P), испарения (E), потенциального испарения (PET), речного стока (R) и коэффициента стока (K), осредненные за первый период (1945–1977 гг.)

Река – пост	Площадь водосбора*, тыс. км ²	σ_{twsc} , мм	P_1 , мм	E_1 , мм	PET_1 , мм	R_1 , мм	K_1
р. Ока – г. Горбатов	240	60	618	474	677	144	0,23
р. Дон – ст. Раздорская	180/51,2	92	506	478	855	28,1	0,06
р. Печора – с. Усть-Цильма	250	44	622	188	464	434	0,70
р. С. Двина – с. Усть-Пинега	350	36	664	377	559	287	0,43
р. Урал – г. Оренбург	82,3/18,2	66	421	383	796	37,9	0,09
р. Вятка – г. Вятские Поляны	120	50	591	363	616	227	0,39
р. Белая – г. Бирск	120	83	591	375	706	216	0,36
р. Нева – д. Новосаратовка	280/58,2	72	640	369	552	271	0,42
р. Мезень – д. Малонисогорская	56,4	41	685	316	529	369	0,54
р. Дон – х. Беляевский	200	83	528	442	781	85,6	0,16

Примечание: – в знаменателе обозначена площадь зарубежной части бассейна.

фиксирован рост уровня подземных вод на 50–130 см [16], это может быть существенным источником ошибок при расчете испарения как разности между осадками и речным стоком. Средняя для ЕЧР активная пористость в первой гидродинамической зоне (мощность порядка 100 м) составляет около 15 % [13], т. е. рост TWS мог составить около 75–195 мм. Учитывая, что сильнее всего минимальный сток летней межени вырос в пределах южной половины ЕЧР [16], а также то, что при росте бассейновых влагозапасов более интенсивный рост стока летней межени (по отношению к среднему межённому расходу) характерен для северных бассейнов [27], можно утверждать, что наибольший рост запасов подземных вод произошел в пределах южной половины ЕЧР. Так, рост запасов подземных вод в бассейне Дона составил 220–260 мм [16]. Невозможно точно определить динамику TWS за 1945–2002 гг. В худшем случае весь рост запасов подземных вод произошел за наиболее короткий, второй период. Тогда для бассейна Дона, где рост запасов подземных вод был, видимо, наибольшим, систематическая ошибка определения слоя испарения за t_2 составит 1,5–2 %. Сильнее всего величина TWS за t_3 увеличилась в бассейне Невы (+137 мм), а уменьшилась в бассейне р. Дона – ст. Раздорская (–161 мм).

Рассмотренные водосборы мало отличаются по средней величине осадков, с минимумом для бассейна р. Урал (421 мм) и максимумом для бассейна

на р. Мезень (685 мм). Величины E и PET различаются также не значительно, убывая с севера на юг (а испарение, вслед за осадками, и с востока на запад). Однако выделяется бассейн р. Печоры, где E в два раза меньше, чем в соседнем бассейне Северной Двины, а PET на 20 % меньше. Наибольшие различия наблюдаются в величинах R и K . Максимальные величины как первого, так и второго относятся к бассейну Печоры (434 мм и 0,70 соответственно), а минимальные – к бассейну р. Дон – ст. Раздорская (28,1 мм и 0,06 соответственно). Изменение этих характеристик за t_2 и t_3 относительно к t_1 приведено в табл. 2.

Таблица 2. Изменение величин осадков (ΔP), испарения (ΔE), потенциального испарения (ΔPET), речного стока (ΔR) и коэффициента стока (ΔK) за 1978–2002 гг. и 2003–2015 гг. относительно 1945–1977 гг., %

Река – пост	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_2	ΔE_3	ΔPET_2	ΔPET_3	ΔR_2	ΔR_3	ΔK_2	ΔK_3
р. Ока – г. Горбатов	6,6	5,8	2,7	3,8	1,1	7,0	19,6	16,2	12,2	9,8
р. Дон – ст. Раздорская	8,6	4,4	8,8	10,8	-0,6	6,1	4,8	-59,3	-3,5	-61,0
р. Печора – с. Усть-Цильма	5,0	3,2	9,7	-11,8	-0,3	5,0	2,9	10,1	-2,0	6,7
р. С. Двина – с. Усть-Пинега	0,7	-0,9	-2,0	-1,0	0,5	6,1	4,2	-0,6	3,5	0,2
р. Урал – г. Оренбург	4,3	-6,1	3,7	-5,3	-0,9	6,4	10,6	-13,4	6,0	-7,8
р. Вятка – г. Вятские Поляны	8,5	4,1	-0,8	0,9	-0,5	6,0	23,3	10,4	13,7	6,0
р. Белая – г. Бирск	3,5	-4,2	-2,3	0,3	-0,3	5,0	13,7	-11,1	9,8	-7,2
р. Нева – д. Новосаратовка	5,1	9,3	6,6	10,4	1,0	4,2	3,1	3,9	-1,9	-4,9
р. Мезень – д. Малонисогорская	-9,9	-10,2	-14,3	-20,8	0,3	5,3	-6,2	-0,5	4,1	10,7
р. Дон – х. Беяевский	5,7	0,8	6,8	4,1	-0,4	6,1	0,0	-4,3	-5,3	-5,1

Во второй период осадки выросли на девяти из десяти бассейнов, причем картина изменения весьма пестрая. ΔP_2 даже на соседних бассейнах различается на саму величину ΔP_2 . Так, для бассейнов Печоры и Северной Двины эта разница составляет 4,3 %. Единственным бассейном, где произошло уменьшение P , является бассейн Мезени. P_3 больше P_1 уже лишь для шести водосборов, оставаясь, однако, в среднем (здесь и далее имеется в виду средневзвешенное по площади) для ЕЧР больше, чем за первый период (на 2,4 %). Единственным водосбором, где P_3 больше P_2 , является бассейн Невы. Возрастающий тренд рядов годовых осадков существует практически для всех территорий средних и высоких широт северного полушария

[28] и рост осадков во второй период на ЕЧР полностью в него укладывается. Однако, несмотря на продолжающийся рост температуры воздуха (хотя и менее интенсивный), P_3 меньше P_2 . Вероятно, это связано с максимальными с 1899 г. значениями продолжительности меридиональной циркуляции по классификации Дзерdzeевского с конца 1990-х годов. [29].

Величина испарения во второй период (по сравнению с первым) была больше на семи, а в третий – на шести водосборах. Как и для осадков, в среднем E_2 и E_3 больше E_1 , но E_2 больше E_3 . При этом пространственная неоднородность изменения E еще больше, чем у P . Так, для Печоры и Мезени разница в ΔE_2 составляет 24 %. Отметим, что одним из факторов роста испарения на ЕЧР (на ≈ 1 %) за 1973–2003 гг. стало изменение в видовом и возрастном составе лесов [30]. Существенно величина E за t_2 выросла на западе ЕЧР (бассейны Невы, Оки и Дона). $\Delta E_2 > 2$ % также для бассейнов Печоры и Урала, но E_3 для них уже меньше E_1 .

Во многом, особенно для южных водосборов, рост E обусловлен ростом P . Однако изменение величины PET также сыграло свою роль. Величины PET за первый и второй период, несмотря на рост температуры воздуха за 1978–2002 гг., практически не отличаются ($\Delta PET_2 = 0,09$ %). Подобные изменения согласуются с глобальными изменениями и связаны, вероятно, с динамикой прямой и суммарной солнечной радиации на ЕЧР [31], а именно – их спада до 1990-х годов и последующего роста, особенно в центральных и южных областях. Величина ΔPET_3 в среднем составляет уже 5,8 %, с максимумом роста в бассейне Оки (7 %) и минимумом в бассейне Невы (4,2 %). Основной причиной столь существенного роста (коэффициент вариации PET на большей части ЕЧР составляет порядка 6–7 %), вероятно, является рост дефицита влажности воздуха, хотя определенная роль принадлежит и сохраняющемуся положительному тренду прямой солнечной радиации [32].

Продуктивность сельскохозяйственных угодий в значительной степени определяется отношением осадков к испарению – индексом аридности по определению UNESCO (AI) [33]. За t_2 климат на всех водосборах, помимо бассейна Мезени, стал более гумидным, причем максимальный рост AI (на 9 %) произошел в пределах одного из наиболее засушливых и активно используемых в сельском хозяйстве водосборов – Дон – ст. Раздорская. В третий период ситуация обратная, $\Delta AI_3 > 0$ лишь в бассейне Невы.

Картина изменения R близка к таковой для P , но с большей величиной изменения. Средняя величина ΔR_2 составляет 6,14 %, а ΔR_3 – 3,49 %. Наибольший рост R во второй период произошел на реках Волжского бассейна, для Вятки составив 23,3 %. Уменьшение величины речного стока отмечено лишь на р. Мезени (-6,2 %). В третий период сток был меньше, чем в первый период на шести водосборах. Особенно заметное сокращение произошло

в бассейне Дона на участке между х. Беляевским и ст. Раздорская (-59,3 %). На реках юго-востока ЕЧР (Урал и Белая) многоводная фаза сменилась маловодной. Величина стока уменьшилась и на реках средней полосы ЕЧР (Ока, Вятка), однако оставаясь больше, чем за первый период. Выросла величина стока на реках северо-востока ЕЧР, бассейнах Печоры и Мезени.

В целом, как за второй, так и за третий периоды, рост осадков был меньше роста речного стока, что выразилось в росте коэффициента стока. Так, в среднем величина ΔK_2 составляет 1,78 %, а ΔK_3 – 1,05 %. $\Delta K_2 > 0$ для шести водосборов, а $\Delta K_3 > 0$ для пяти. Подобное изменение коэффициента стока хорошо согласуется с изменением P и PET . Во второй период PET по сравнению с первым периодом практически не изменился, а осадки выросли. В третий период осадков было также больше, хотя и не так существенно как во второй период, в то время как PET выросло. Отметим, что в основных формулах, связывающих нормы R , P и PET (формулы Шрайбера, Ольдекопа и Будыко [34]) частная производная R по P больше частной производной R по PET . Так, по формуле Шрайбера она больше в $(1 + \frac{PET}{P})$, т. е. от 1,74 раза для бассейна Печоры до 2,89 в бассейне Урала. Соответственно речной сток более чувствителен к изменению осадков (в сравнении с потенциальным испарением). Наиболее значительное изменение коэффициента стока произошло на участке х. Беляевский – ст. Раздорская р. Дон, где $\Delta K_3 = -61$ %. Отметим, что величина ΔK_2 составляет всего -3,5 %. При этом Цимлянское водохранилище существовало на протяжении всего второго периода, а величина безвозвратного водопотребления была выше во второй период, чем в третий [35]. Учитывая положительную аномалию осадков за третий период ($\Delta P_3 = 4,4$ %), столь значительное уменьшение K может быть связано с ростом PET , которое привело к росту испарения, в т. ч. с поверхности прудов и водохранилищ.

ВЫВОДЫ

В работе впервые для периода до 1966 г. (1945–2015 гг.) проведен анализ изменения составляющих водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России. Показано, что эти изменения близки к таковым для других районов средних широт северного полушария – наблюдается рост осадков, испарения, потенциального испарения, речного стока и коэффициента стока. Однако изменения не были монотонными. Период 1978–2002 гг. отличается максимальными величинами составляющих водного баланса при величине потенциального испарения, близкого к норме за 1945–1977 гг. За 2003 – 2015 гг. величины составляющих водного баланса были также больше, чем за 1945–1977 гг., но меньше чем за 1978–2002 гг., при значительном росте потенциального испарения – 5,8 %. Таким обра-

зом, второй период, по сравнению с первым, являлся более гумидным, а третий, напротив, более аридным. Подобные изменения в режиме тепла и увлажнения привели к росту величины речного стока на 9 из 10 рассмотренных бассейнов за второй период. В течение третьего периода на реках юга ЕЧР наблюдалась водность ниже средней, однако, в силу их малой водоносности, в целом для ЕЧР сток был выше среднего за первый период.

Использование данных о бассейновых влагозапасах (проект GRACE) позволило оценить величину их многолетней изменчивости, а также ошибку расчета величины испарения как разности между осадками и речным стоком. Продемонстрировано, что величина изменения речного стока может существенно варьироваться, даже при близких величинах изменения осадков и потенциального испарения, на соседних водосборах (Дон – Ока, Мезень – Северная Двина). Подобные различия связаны, вероятно, с физико-географическими особенностями изучаемых водосборов. Количественный анализ влияния физико-географических особенностей водосборов на изменение величины речного стока требует использования физически обоснованных моделей формирования стока. Представляется перспективным исследование того, насколько глобальные климатические модели реалистично воспроизводят пространственную неравномерность изменения речного стока. Актуальность данного вопроса связана с тем, что негативные последствия изменения климата сказываются на изменении водного режима, в т. ч. на локальном уровне, на котором могут существенно отличаться от регионального уровня, показывающего усредненную картину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fu Q., Lin L., Huang J., Feng S., Gettelman A.* Changes in terrestrial aridity for the period 850–2080 from the Community Earth System Model // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016. Vol. 121. P. 2857–2873. Doi:10.1002/2015JD024075.
2. *Ранькова Э.Я., Груза Г.В., Рочева Э. В., Самохина О. Ф.* Температура приземного воздуха // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва, 2014. С. 37–72.
3. *Fu Q., Feng S.* Responses of terrestrial aridity to global warming // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. Vol. 119. P. 7863–7875. Doi:10.1002/2014JD021608.
4. *Huntington T.G.* Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis // *Journal of Hydrology.* 2006. Vol. 319. P. 83–95. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.07.003
5. *Potvin C.* Interactive effects of temperature and atmospheric CO₂ on physiology and growth. In: *Alscher R.G., Wellburn A.R. (eds) Plant Responses to the Gaseous Environment.* Springer, Dordrecht, 1994.
6. *Milly P. C.D., Dunne K.A.* Potential evapotranspiration and continental drying // *Nature Climate Change.* 2016. Vol. 6. P. 946–949. Doi:10.1038/nclimate3046.
7. *Wild M.* Enlightening global dimming and brightening // *Bulletin of the American Meteorological Society.* Vol. 93. No 1. P. 27–37.

8. *Bichet A., Wild M., Folini D., Schär C.* Causes for decadal variations of wind speed over land: sensitivity studies with a global climate model // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. L11701. Doi:10.1029/2012GL051685.
9. *Жаков С.И.* Общие закономерности режима тепла и увлажнения на территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 231 с.
10. *Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколихина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н.* Прогноз климатической ресурсообеспеченности ВЕР в условиях потепления XXI века. М.: МАКСПресс, 2008. 292 с.
11. *Зубенок Л.И.* Испарение на территории Советского Союза // *Влагооборот в природе и его роль в формировании ресурсов пресных вод.* М.: Стройиздат, 1973. 231 с.
12. *Фролов А.В.* Оценка статистических характеристик многолетних колебаний испарения с крупных речных водосборов // *Доклады академии наук.* 2014. Т. 458. № 3. С. 345–348.
13. *Водные ресурсы России и их использование* // под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
14. *Долгов С.В., Коронкевич Н.И.* Высотно-пространственный и пространственно-временной анализ водного баланса европейской части России // *Водные ресурсы.* 2010. Т. 37. № 2. С. 134–149.
15. *Kislov A.* On the interpretation of century–millennium-scale variations of the Black Sea level during the first quarter of the Holocene // *Quaternary International.* Vol. 465. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.09.008>.
16. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.А., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А.* Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России. Формирование, распределение, использование. М.:ГЕОС, 2015. 315 с.
17. *Филиппова И.А.* Изменение минимального стока рек и его оценка в условиях нестациональности климата: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.:ИВП РАН, 2014. 209 с.
18. *Nitta T., Yamada S.* Recent Warming of Tropical Sea Surface Temperature and Its Relationship to the Northern Hemisphere Circulation // *J. Meteorol. Soc. Japan.* 1989. Vol. 67. P. 375–383.
19. *Trenberth K.E.* Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere // *Bulletin of the American Meteorology Soc.* 1990. Vol. 71. P. 988–993.
20. *Полонский А.Б., Башарин Д.В.* Влияние климатического сдвига 1976–1977 гг. на крупномасштабную структуру приземных метеорологических полей Евразии // *Метеорология и гидрология.* 2008. № 5. С. 16–30.
21. *Богданова Э.Г., Голубев В.С., Ильин Б.М., Драгомилова И.В.* Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России // *Метеорология и гидрология.* 2002. № 10. С. 68–94.
22. *Hargreaves G.H., Samani Z.A.* Estimating potential evapotranspiration // *J. Irrig. Drain. Eng.* 1982. Vol. 108. P. 225–230.
23. *Almorox J., Quej V.H., Martí P.* Global performance ranking of temperaturebased approaches for evapotranspiration estimation considering Koppen climate classes // *J. Hydrol.* 2015. Vol. 528. P. 514–522.
24. *Зотов Л.В., Фролова Н.А., Григорьев В.Ю., Харламов М.А.* Использование спутниковой системы измерения поля гравитации (GRACE) для оценки водного баланса крупных речных бассейнов // *Вестник Московского ун-та. Сер. география.* 2015. № 4. С. 27–33.

25. Мельник К.С. Гидротехническое воздействие на водные ресурсы в бассейне реки Москвы // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2–6. С. 1230–1237.
26. Harris I., Jones Philip, Osborn, Timothy and Lister, David. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset // *International Journal of Climatology*. 2014. Vol. 34. P. 623–642.
27. Grigoriev V.Yu., Frolova N.L. Terrestrial water storage change of European Russia and its impact on water balance // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. Vol. 11, № 1. P. 38–50.
28. Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F.J., Dlugokencky E.J., Easterling D.R., Kaplan A., Soden B.J., Thorne P.W., Wild M., Zhai P.M. Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*: Stocker, T.F., Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). 2013. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
29. Кононова Н.К. Циркуляция атмосферы и наводнений последних лет // *География в школе*. 2015. № 4. С. 23–28.
30. Кашутина Е.А., Коронкевич Н.И. Влияние изменения состояния лесов европейской части России на годовой речной сток // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40. № 4. С. 339–349.
31. Хлебникова Е.И., Махоткина Е.А., Салль И.А. Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения // *Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2014. № 573. С. 65–91.
32. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.
33. Bannayan M., Sanjani S, Alizadeh A, Lotfabadi S. S, Mohamadian A. Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran // *Field Crop Res*. 2010. Vol. 118. No 2. P. 105–114.
34. Gardner L.R. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff // *Journal of Hydrology*. 2009. Vol. 379. No 3, 4. P. 351–359. Doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.021.
35. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А., Вишневецкая И.А., Бородин О.О. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКСПресс, 2014. С. 214.

Сведения об авторах:

Григорьев Вадим Юрьевич, инженер, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных проблем РАН», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: vadim308g@mail.ru

Фролова Наталья Леонидовна, д-р геогр. наук, профессор, заведующая кафедрой гидрологии суши, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: frolova_nl@mail.ru

Джамалов Роальд Гамидович, д-р геол.-мин. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией, ФГБУН «Институт водных проблем РАН», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, e-mail: roald@iwrp.ru