Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений

А.В. Горбаренко¹ , Варенцова Н.А.^{1,2} , М.Б. Киреева¹

gorbarenko.ar@gmail.com

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

²ФГБУ «Центральное УГМС», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рост среднегодовой температуры воздуха на Европейской территории России на фоне изменения климата ведет к уменьшению запасов воды в снежном покрове, формирующем половодье. Увеличение числа переходов температуры воздуха через 0 °C в область положительных значений в течение зимы ведет не только к дополнительному сокращению снеготопливных запасов, но и обеспечивает рост числа, объемов и интенсивности оттепельных паводков. Изменения во внутригодовом распределении объемов и интенсивности осадков отражаются на росте количества и величины дождевых паводков. Наблюдаемые в настоящее время трансформации в типах питания и водном режиме рек бассейна Верхней Волги влекут за собой снижение гидроэкологической безопасности территории вследствие неучета внутригодового распределения стока. **Методы.** Для решения задачи изучения влияния изменения климата на гидрологический режим рек бассейна Верхней Волги использованы методы определения генетических компонентов стока на основе расчленения гидрографа средствами программного комплекса GrWat и картирования полученных результатов. В рамках поставленной задачи проанализировано более двух тысяч гидрографов, исследованы их многолетние тренды. **Результаты.** Анализ показал, что на некоторых реках бассейна Верхней Волги объем паводочного стока к настоящему времени уже соизмерим с объемом стока половодья, что не характерно для рек восточноевропейского типа водного режима. Установлено, что для некоторых рек объем стока в половодье сократился более чем на 50 %, в то время как объем стока в период дождевых паводков увеличился более чем на 80 %, оттепельных – практически на 100 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водный режим, изменение климата, бассейн Верхней Волги, гидрограф, паводочный сток.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 19-77-10032.

© Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б., 2021

Для цитирования: Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1.

Дата поступления 07.04.2021.

TRANSFORMATION OF THE SPRING HIGHWATER AND FLOOD RUNOFF IN THE UPPER VOLGA BASIN UNDER THE CLIMATE CHANGE IMPACT

Artem V. Gorbarenko¹ , Nataliya A. Varentsova^{1,2} , Maria B. Kireeva¹

gorbarenko.ar@gmail.com,

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²FSBI «Central AHEM», Moscow, Russia

ABSTRACT

Significance. An increase in the average annual air temperature in the European territory of Russia against the background of climate change leads to a decrease in water reserves in the flood-forming snow cover. At the same time, an increase in the number of transitions of air temperature through 0 °C in the area of positive values in winter leads not only to an additional reduction in snow storage by the beginning, but also ensures an increase in the number and size of thaw floods. Changes in the intra-annual distribution of the range and intensity of precipitation entail an increase in the number and magnitude of rainfall floods. Observed transformations in the types of feeding and water regime of the rivers of the basin. **Methods.** The study posed the task of studying climate change on the hydrological regime of rivers in the Upper Volga basin. To solve it, methods were used to determine the methods for determining the runoff components based on the dismemberment of the hydrograph using the GrWat software package and mapping the results of the results. As part of this task, more than two thousand hydrographs were analyzed, and their long-term trends were analyzed. **Results.** The analysis showed that on some rivers of the region the volume of flood runoff is already comparable to the volume of flood runoff, which is not typical for the river-European type of water regime. It was found that for some rivers in the region, the volume of runoff during high water decreased by more than 50%, while the volume of runoff during the period of rainfall floods increased by more than 80%, while in the period of thaw practically by 100%.

Keywords: water regime, climate change, the Upper Volga basin, hydrograph, flood runoff.

Financing: The work was supported by RSF grant No. 19-77-10032.

For citation: Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B. Transformation of the Spring High-water and Flood Runoff in the Upper Volga Basin under the Climate Change Impact. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2021, No. 4. P. 6–28. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1.

Received April 07, 2021.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом влияние изменения климата на человека и окружающую среду становится все более ощутимым [1]. Одна из важнейших задач современного общества – обеспечение устойчивости к таким изменениям, зачастую негативно влияющим на качество и количество водных ресурсов, состояние водных экосистем, увеличивающих масштабы и частоту проявлений экстремальных природных явлений [2].

Климатические изменения отражаются на состоянии рек, происходит заметная трансформация водного режима. Так, например, в докладе Росгидромета [1] отмечается, что водность большинства рек Европейской территории России в зимний период увеличилась на 50–120 %, в летний – на 40–70 % по сравнению с нормой, определенной за 1947–1977 гг. Кроме того, значительному росту подверглась и изменчивость стока. На этом фоне зафиксировано сокращение максимального стока половодья до 40 %. Бельгийское агентство окружающей среды (W&Z – Flanders Hydraulics, Flemish Environment Agency) заявило об увеличении опасных гидрологических явлений на территории страны более чем на 30 % по данным 2018 г. По информации немецких ученых, водность рек федеральной земли Бавария увеличилась более чем на 15 %, а рек федеральной земли Баден-Вюртемберг до 75 % [3]. По данным шведской ассоциации водных ресурсов (The Swedish Water & Wastewater Association), влияние климатических изменений на реки Швеции возросло на 5 – 30 % [3]. Для 21 из 37 европейских стран за период 2006–2015 гг. характерно увеличение частоты опасных гидрологических явлений более чем на 100 % [4]. В целом на территории Европы реки северо-западной части характеризуются увеличением максимальных расходов, в то время как южные регионы страдают от уменьшения расходов средних и крупных рек [5]. На многих высокогорных реках наблюдается уменьшение летнего стока ввиду значительного сокращения ледников [6], на реках с преобладающим дождевым типом питания отмечается значительное увеличение годового стока, что согласуется с диагностируемым увеличением осадков на территории Европы.

Актуальность исследования определена задачами обеспечения безопасности населения и экономики от негативных последствий участвовавших паводков и низких половодий. Так, наводнение в бассейнах Верхней Волги и Финского залива в ноябре 2019 г., затронувшее Новгородскую, Псковскую, Тверскую, Костромскую и Ярославскую области, привело к затоплению сотен домовладений. Его причиной стали экстремальные осадки, выпавшие

на переувлажненные речные водосборы и сформировавшие очень высокий паводок. Ущерб от наводнения значительно усугубился резким похолоданием с последующим установлением ледостава при высоких уровнях воды. В июне – июле 2020 г. в бассейне Верхней Волги и Оки вновь прошли дожди, вызвавшие формирование дождевых паводков с максимальными уровнями и расходами воды 1–10 % обеспеченности, а на ряде рек – близкими к максимальным за период наблюдений.

Трансформация стока Верхней Волги под влиянием глобальных климатических изменений – одна из широко обсуждаемых региональных проблем. После 1978 г. наблюдается рост среднегодовой температуры 0,53 °C/10 лет [7], что привело к увеличению ее в сравнении с серединой XX в. на 1,2–1,4 °C [8]. Эти изменения оказали значительное воздействие на факторы формирования стока как в целом за год, так и в масштабах гидрологических сезонов [7]. Климатические изменения привели к росту годового стока в сравнении с нормой за 1930–1980 гг. По данным [1], в 1981–2012 гг. в пределах Европейской территории России диагностировано увеличение водных ресурсов на 11,4 %, что эквивалентно 148 км³/год.

Среди наиболее ярких изменений в факторах формирования стока необходимо отметить значительный рост повторяемости и интенсивности оттепелей, уменьшение глубины промерзания почвы и соответствующее ей увеличение инфильтрации на 24 –32 % и подземного стока [10]. Одновременно с этим отмечено уменьшение запаса воды в снежном покрове на 15–20 %, а поверхностной составляющей речного стока в половодье – на 36 % [10]. Данные тенденции в значительной степени повлияли на величину стока в половодье: на Верхней Волге она уменьшилась на 4300 км³ за последние 40 лет. По данным [8], вклад климатических изменений в подобное сокращение составил порядка 30 %.

В наблюдаемых условиях изменения режима речного стока и связанных с ним рисков очевидна необходимость повышения защищенности строений, расположенных в речных поймах, а также совершенствования систем регулирования водохозяйственным комплексом с учетом рисков развития высоких паводков в любое время года. Бассейн Верхней Волги имеет высокую экономическую значимость, однако в большинстве действующих схем регулирования стока в пределах центральной России отсутствуют резервные паводочные емкости, что ведет к снижению эффективности водохозяйственных систем в период прохождения паводков, в частности, за счет экстренных сбросов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водный режим рек определяет внутригодовое распределение расходов воды, которое на реках Русской равнины традиционно характеризуется чередованием фаз повышенной и пониженной водности [11]. Одним из основных методов анализа фаз водного режима и формирующих их источников питания является расчленение гидрографа реки. Метод позволяет определить суммарную величину талого, подземного и дождевого стока.

Наиболее масштабные оценки величин каждой из фаз водного режима, определенные ручным методом, а также приведение коротких рядов к многолетним значениям представлены в [12]. Однако при ручном подсчете сохраняется вероятность ошибки или субъективности в выделении границ фаз водного режима. По этой причине в данном исследовании расчленение гидрографа проводилось в автоматическом режиме с использованием программной библиотеки GrWat, разработанной в рамках проекта по изучению современного режима рек Европейской территории России [13]. В основе принципа работы алгоритма лежит методика расчленения гидрографа Б.И. Куделина [11]. Общий массив данных дифференцирован на два периода: от 1936 – 1962 гг. до 1978 г. и современный (1978 – 2017 гг.) [10, 12].

В работе использованы многолетние данные среднесуточных расходов зональных рек бассейна Верхней Волги. Выбор рек осуществлялся по принципам максимально полного охвата изучаемой территории и наличия продолжительного непрерывного ряда наблюдений. Для решения поставленной задачи проанализированы 2170 гидрографов по 32 гидрологическим постам бассейна Верхней Волги с площадями водосбора от 2720 и до 244 000 км² (табл. 1).

В рамках решения задачи анализа трансформации водного режима рек Верхней Волги под влиянием изменения климата проанализированы характеристики годового стока, а также основные показатели половодья, паводков и межени. Однородность и стационарность рядов стока оценены по критериям Стьюданта, Фишера, Спирмана, Манна–Кендалла, выбор переломного года произведен с помощью Петитт-теста [13]. Установлено, что для характеристик половодья и паводков в 90 % случаев переломный год попадает на 1978–1981 гг. Все анализируемые объемные величины выражены через модуль и слой стока, а полученные значения отнесены к центрам речных водосборов. Величины стока определены для водохозяйственных лет: начало года совпадает с началом половодья, окончание – с последним днем зимней межени. Для наглядности результаты изменения стока представлены в процентах относительно значений предшествующего климатического периода.

Таблица 1. Перечень гидрологических постов, данные по которым использованы для анализа трансформации водного режима рек Верхней Волги
 Table 1. The list of hydrological posts that provide data used for analysis of the Upper Volga basin rivers water regime transformation

Река – пост	Площадь, км ²	Гоа	Река – пост	Площадь, км ²	Гоа
Волга – Старица	21 100	1943 – 2017	Ока – Горбатов	244 000	1962 – 2017
Тверца – Медное	5400	1938 – 2017	Зуша – Мценск	6000	1936 – 2017
Молога – Устюжна	19 100	1936 – 2008	Жиздра – Козельск	6940	1936 – 2016
Чагодоща – Анисимово	2720	1950 – 2017	Угра – Товарково	15 300	1936 – 2014
Кострома – Буй	8870	1946 – 2017	Протва – Спас-Загорье	3640	1936 – 2017
Унжа – Кологрив	11 500	1941 – 2009	Мокша – Темников	15 800	1936 – 2017
Унжа – Макарьев	18 500	1936 – 2014	Клязьма – Владимир	14 300	1946 – 2017
Ока – Белев	17 500	1950 – 2017	Клязьма – Ковров	24 900	1946 – 2017
Ока – Кауга	54 900	1936 – 2017	Ветлуга – Михайловцы	12 600	1936 – 2017
Ока – Кашира	68 700	1936 – 2017	Ветлуга – Ветлуга	22 200	1936 – 2016
Ока – Половское	9 9000	1936 – 2017	Керженец – Хахалы	3630	1951 – 2017
Ока – Муром	188 000	1936 – 2014	Сура – Порецкое	50 100	1980 – 2017

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным расчетам, годовой слой стока на реках бассейна Верхней Волги в среднем за современный период (1978–2017 гг.) варьирует от 136 до 402 мм (табл. 2). Его наибольшие значения приурочены к бассейнам р. Тверца – г/п Медное, наименьшие – к бассейну р. Оки – г/п Белев. Полученные величины хорошо согласуются с результатами [12].

Таблица 2. Среднемноголетние значения годового слоя стока

рек бассейна Верхней Волги

Table 2. Average many-year annual layer values of the Upper Volga basin rivers runoff

Река– пост	Слой годового стока, мм	
	до 1978 г.	1978 – 2017 гг.
Волга – Старица	216	271
Тверца – Медное	355	402
Молога – Устюжна	193	251
Чагодоща – Анисимово	272	311
Кострома – Буй	247	255
Унжа – Кологрив	263	282
Унжа – Макарьев	262	350
Ока – Белев	139	136
Ока – Калуга	155	173
Ока – Кашира	153	169
Ока – Половское	159	191
Ока – Муром	142	165
Ока – Горбатов	150	174
Зуша – Мценск	145	160
Жиздра – Козельск	161	180
Угра – Товарково	174	198
Протва – Спас-Загорье	170	199
Мокша – Темников	114	138
Клязьма – Владимир	178	197
Клязьма – Ковров	167	196
Сура – Порецкое	–	175
Ветлуга – Михайловицы	242	257
Ветлуга – Ветлуга	225	270
Керженец – Хахалы	165	191

В сравнении с предшествующим периодом (до 1978 г.) на фоне современного изменения климата отмечается плавный рост стока рек, что согласуется с выводами [1]. Однако лишь для 27 из 32 рек диагностируется значимый тренд годового стока (рис. 1). Так, на реках Зуша, Мокша, Упа, Кострома тренд практически отсутствует, а на реке Которосль наблюдается слабо отрицательная динамика, вероятно, обусловленная затянувшимся маловодьем последнего десятилетия.

Анализ полученных результатов и выводов, приведенных в [8], показал сопоставимость значений. При этом следует отметить, что годовой сток в рамках данного исследования определялся для водохозяйственных лет с «плавающей» продолжительностью, а в [12] – для календарных лет.

Установлено, что выраженный тренд увеличения годового стока рек Верхней Волги обеспечивается не за счет половодной составляющей. Современный гидрограф региона исследований характеризуется относительно более низким и растянутым половодьем и большим числом паводков на спаде и в течение всего года (рис. 2), а характерный гидрограф восточно-европейского типа водного режима (по Б.Д. Зайкову) [9] встречается все реже. На современном этапе трансформация гидрографа привела к тому, что все чаще годовой максимум паводка превышает пик половодья.

Рис. 2. Гидрографы р. Протвы в створе Спас-Загорье за 1956 г. (а) и 2017 г. (б).
Fig. 2. Hydrographs of the Protva River in the Spas-Zagorye range for 1956 (а) and for 2017 (б).

Средние значения слоя стока в период половодья на реках бассейна Верхней Волги по результатам GrWat-анализа (параметр Wpol) в среднем за 1978–2017 гг. варьируют от 32 до 162 мм (табл. 3). Наибольшие его значения приурочены к верховьям р. Ветлуги (175 мм), наименьшие – к р. Зуша (54 мм). Полученные величины максимального слоя стока также хорошо согласуются с результатами [8].

Полученные оценки, указывающие на сокращение стока весеннего половодья в современном периоде, согласуются с [1, 5, 14]. Значимый тренд слоя стока половодья диагностируется на 28 из 32 рек. На реках Керженец,

Тверца, Чагодоща тренд практически отсутствует, а на Ветлуге наблюдается слабopоложительная динамика, вероятно, обусловленная влиянием воздушных масс с Атлантики.

Максимальный суточный модуль стока в период половодья на реках бассейна Верхней Волги по результатам GrWat-анализа составляет 25–150 л/с·км². Его наибольшие значения приурочены к верховьям рек Ветлуги и Оки, наименьшие – к р. Сура.

Таблица 3. Среднемноголетние значения слоя стока в половодье рек бассейна Верхней Волги

Table 3. Average many-year annual layer values of the Upper Volga basin rivers runoff during the high-water period

Река–пост	Слой стока в половодье, мм	
	до 1978 г.	1978 – 2017 гг.
Волга – Старица	82	80
Тверца – Медное	135	125
Молога – Устюжна	99	91
Чагодоща – Анисимово	122	117
Кострома – Буй	142	137
Унжа – Кологрив	151	146
Унжа – Макарьев	147	151
Ока – Белев	70	37
Ока – Калуга	81	56
Ока – Кашира	82	58
Ока – Половское	79	65
Ока – Муром	78	63
Ока – Горбатов	83	79
Зуша – Мценск	65	33
Жиздра – Козельск	85	65
Угра – Товарково	81	65
Протва – Спас-Загорье	85	63
Мокша – Темников	82	65
Клязьма – Владимир	90	68
Клязьма – Ковров	85	74
Сура – Порецкое	83	64
Ветлуга – Михайловицы	158	162
Ветлуга – Ветлуга	164	136
Керженец – Хакалы	95	105

Левобережные притоки Волги (Ветлуга, Унжа, Нея) характеризуются большим значением модуля максимального стока за период половодья, чем правобережные притоки, и увеличением его значения за последние 40 лет (рис. 3). Уменьшение модуля максимального суточного стока половодья более чем на 20 % характерно для большинства правобережных притоков Волги. Исключение составляют рр. Ветлуга, Унжа, Нея, Чагодоща и Упа. Предположительно, рост расходов половодья на этих территориях связан с общим увеличением осадков и снегозапасов в бассейнах рек, обусловленным влиянием рельефа. В то же время, почти на всех реках бассейна Оки уменьшение максимального модуля стока в половодье составляет более 50 %.

Изменение климата вносит немаловажную роль в изменение слоя стока половодья и его суточных максимумов, на что указывается многими авторами [1, 2, 7, 8, 13, 15]. Значимой трансформации суммы осадков в зимний период не отмечается, однако диагностируется значительный рост сумм жидких осадков, что влечет уменьшение максимальных снегозапасов, формирующих половодье. Адвекции теплого и влажного воздуха с Атлантики в зимние месяцы в последние десятилетия участились, что привело к увеличению повторяемости оттепелей в западном и южном секторах водосбора Верхней Волги. Удаленность бассейнов левобережных притоков (реки Унжа, Нея и Ветлуга) обеспечивает меньшую величину многолетних изменений и большие абсолютные значения максимального модуля стока. На фоне роста температуры воздуха отмечено значительное сокращение мощности и распространенности ледяной корки, которая обеспечивала повышение коэффициента стока в весенний период. Снижение глубины промерзания на фоне развития мягких зим, при прочих равных, обеспечивает увеличение впитывающего потенциала речных водосборов весной.

На фоне уменьшения стоковых характеристик половодья отмечается увеличение доли паводочного стока в годовом (рис. 3), проявляющегося как в повышении частоты их формирования, так и в росте объемов и расходов на пике.

Количество паводков в течение года для большинства рек характеризуется положительными трендами. На современном этапе для бассейна Верхней Волги в среднем отмечается 7 – 10 паводков в год, из которых 6 – 8 дождевых. Наиболее часто они развиваются на реках Жиздра (9 раз/год), Проня (10 раз/год) и Сура (8 раз/год). В их пространственном распределении присутствует определенная закономерность: количество паводков уменьшается с увеличением континентальности климата. Установлено, что для 65 % случаев характерна тенденция к увеличению количества дождевых паводков, а для 40 % – пики дождевых паводков оказывались наивысшими

Рис. 3. Максимальный суточный модуль стока половодья на реках
бассейна Верхней Волги и его изменение в сравнении с периодом до 1978 г.
Fig. 3. Maximal daily module of the high-water runoff in the rivers of the Upper Volga
basin and its changes in comparison with the period before 1978.

значениями за год. Одновременно с этим на малых реках фиксируется заметное уменьшение их числа (реки Протва, Зуша, верховья Мокши и Неи).

По результатам GrWat-анализа в среднем по бассейну Верхней Волги диагностируется рост слоя стока дождевых и оттепельных паводков на 35 % и 13 %, соответственно по сравнению с периодом до 1978 г. (табл. 4). Так, на 50–76 % в теплое время года вырос паводочный сток на Волге, Унже, Нижней Оке, Протве и Клязьме, а на Мологе и Ветлуге до 92–150 %. При этом сокращение слоя стока дождевых паводков наблюдается на реках Зуша и Мокша, достигая 52 %. Слой стока оттепельных паводков больше всего увеличился на Волге, Чагодоше, Оке у г. Кашира (от 50 до 76 % в сравнении с предшествующим периодом), а также на р. Ветлуге у с. Михайловицы, где прирост составил 258 % от соответствующих показателей до 1978 г. При этом на многих реках диагностированы отрицательные тренды объема паводочного стока в период оттепелей.

Современная трансформация водного режима привела к тому, что на ряде рек все чаще паводочные пики стали превышать пик половодья или быть соизмеримыми с ним. Если в период до 1978 г. подобные случаи были единичными, то в последние 40 лет такие условия складываются в среднем один раз в 7–10 лет. Наиболее характерно превышение паводочного пика над половодным для бассейна р. Оки, где за последние 20 лет отмечено три превышения и два случая соизмеримых величин. Среди примеров подобных гидрологических условий можно назвать период с 2005–2010 гг. на р. Оке, когда пик стока летних паводков был максимально близок к пику половодья, а в 1990 и 2006 гг. даже превосходил его (рис. 4а, 4б). На р. Костроме паводочный пик был практически равен стоку в половодье в 1992, 1989, 2011, 2015 гг.

Анализ результатов расчленения гидрографов с применением алгоритма GrWat по данным 32 постов позволяет предположить, что в настоящее время абсолютная и относительные величины максимального паводочного стока в пределах бассейнов рек Верхней Волги увеличиваются практически повсеместно. На всех реках изучаемого региона наблюдается увеличение максимального модуля стока за период дождевых паводков более чем на 60 % (рис. 5), за исключением рек Проня и Мокша, где максимальный модуль стока снизился более чем на 40 %.

Современный климат формирует благоприятные условия для развития и интенсификации оттепельных паводков в зимний период. Одновременно для большинства рек фиксируется сдвиг дат максимальных расходов оттепельных паводков на весенний период. Если раньше самые интенсивные оттепели чаще всего наблюдались в декабре-январе, в последние годы они в основном фиксируются в феврале-марте, а осенние паводки из оттепельных стали дождевыми (рис. 6).

Таблица 4. Значения слоя стока дождевых и оттепельных паводков рек бассейна Верхней Волги
Table 4. Values of rain and thaw floods runoff layer of the Upper Volga basin rivers

Река – пост	Слой стока дождевых паводков, мм		Слой стока оттепельных паводков, мм	
	до 1978 г.	1978 – 2017 гг.	до 1978 г.	1978 – 2017 гг.
Волга – Старица	49,9	82,8	15,4	24,2
Тверца – Медное	109	140	42,9	42,6
Молога – Устюжна	43,7	84,1	11,4	8,6
Чагодоца – Анисимово	78,3	80,8	15,9	28,0
Кострома – Буй	53,8	73,6	20,9	8,6
Унжа – Кологрив	56,4	70,4	20,6	8,9
Унжа – Макарьев	69,2	107,6	10,8	13,7
Ока – Белев	21,4	20,3	14,3	15,3
Ока – Калуга	22,1	33,6	13,2	13,0
Ока – Кашира	19,7	29,0	11,4	17,6
Ока – Половское	18,8	23,8	9,2	13,6
Ока – Муром	26,5	44,1	11,1	13,9
Ока – Горбатов	24,3	39,1	18,6	18,4
Зуша – Мценск	30,2	14,5	30,6	17,8
Жиздра – Козельск	31,5	33,6	14,3	14,9
Угра – Товарково	49,8	69,4	16,9	21,4
Протва – Спас-Загорье	37,1	56,3	22,6	17,9
Мокша – Темников	6,9	3,3	2,5	3,1
Клязьма – Владимир	31,1	52,6	9,6	13,2
Клязьма – Ковров	39,2	68,9	15,9	12,5
Сура – Поречное	–	46,6	–	12,8
Ветлуга – Михайловицы	48,4	58,3	9,0	23,2
Ветлуга – Ветлуга	44,7	112	7,6	8,6
Керженец – Хахалы	28,2	35,2	19,6	14,0

Рис. 4. Объем стока р. Оки в период половодья (а) и летних паводков (б) с учетом грунтовой составляющей и р. Костромы в период половодья (в) и летних паводков (г).

Fig. 4. The Oka River runoff volume during the high-water period (а) and summer floods (б) with taking into account the soil component and the Kostroma River during the high-water period (в) and summer floods (г).

Наименьшей величиной максимального модуля стока оттепельных паводков характеризуются бассейн р. Оки в створе Муром, Суры и Мологи в створе Ильицино (рис. 7). Высокие оттепельные паводки не самое частое явление на данных реках. Наибольший модуль стока отмечен в бассейнах рек Жиздра и Упа (до $60 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$).

Комплексный анализ результатов расчленения гидрографов позволяет предположить, что относительное увеличение максимального суточного модуля стока на большинстве рек достигает 100 % и более. Причиной этому служит повышение зимней температуры и увеличение числа, продолжительности и интенсивности оттепелей.

Рис. 7. Максимальный суточный модуль стока оттепелейных паводков и его изменение после 1978 г.

Fig. 7. Maximal daily module of the thaw flood runoff and its changes after 1978.

В связи с изменением климата основной причиной трансформации внутригодового распределения стока на Европейской территории России является повышение зимних значений температуры воздуха и связанное с ним увеличение количества жидких осадков на 30 мм по сравнению с периодом 1978–2016 гг. [1].

Результаты проведенной работы во многом подтвердили ряд полученных ранее выводов об изменении и трансформации водного режима рек Европейской территории России. Они показали, что в последние 30 лет в бассейнах рек Верхней Волги отмечается значительное снижение объема половодья, рост меженных расходов воды и увеличение доли паводочного стока в годовом. Снижение стока половодья происходит на фоне увеличения минимального зимнего стока в основном за счет зимних паводков, объем которых на большинстве рек увеличился более чем на 60 %.

Отличительной особенностью водного режима последних десятилетий стало наличие паводочных пиков практически в любой сезон гидрологического года. Их частота возросла на порядок по сравнению с серединой XX в.

Таким образом, некоторые реки Европейской территории России по классификации Б.Д. Зайкова [9] с трудом можно отнести к рекам с восточно-европейским типом водного режима, поскольку сток весеннего половодья составляет менее 50 % годового. Тем не менее, на реках региона половодье остается главной фазой водного режима (в основном для левобережных притоков Горьковского водохранилища). Установлено, что максимальные расходы в половодье статистически значимо увеличиваются только на реках Унжа, Немда и Ветлуга. Они же характеризуются и увеличением объема стока половодья.

Полученные в рамках данной работы результаты имеют важное практическое применение. Большинство поостренных на Европейской территории России крупнейших водохранилищ в схемах регулирования подразумевают наличие основного максимума половодья, обеспечивающего главную волну притока воды в водохранилища. Но, как показали исследования, многие реки Волжского каскада ГЭС в последние десятилетия не имеют ярко выраженного пика половодья. Например, на Костроме и Оке в отдельные годы максимальные расходы в период паводков даже превышают значения максимальных расходов в период половодья. Таким образом, использование старых схем регулирования может привести к неэффективности работы ГЭС Волжского каскада.

ВЫВОДЫ

На основе анализа результатов расчленения гидрографов рек бассейна Верхней Волги можно утверждать, что для большинства рек характерна трансформация водного режима. По состоянию на конец 2010-х годов доля

талого стока на реках бассейна уменьшилась более чем на 50 %, а доля паводочного и меженного стока увеличилась до 80 % и 100 %, соответственно.

В бассейне Верхней Волги рек со снеговым типом питания, соответствующих классическим представлениям о гидрографе восточно-европейского типа, по-прежнему, большинство, но количество рек, где доля паводочного стока сопоставима, а в некоторые годы и преобладает над долей стока в половодье, увеличивается. Это обстоятельство указывает на необходимость дальнейшего изучения данного вопроса, поскольку подобные трансформации, в первую очередь, затрагивают водохозяйственные системы региона, не рассчитанные на работу с повышенным стоком за пределами половодья. Не учет подобных изменений уже имеет последствия в виде опасных гидрологических явлений и ущербов как для населения, так и для экономики, однако в дальнейшем уязвимость территорий будет только расти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.В. Ясюкевича. 2014. 1018 с.
2. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.А. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет. 2012. С. 53–86.
3. Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., & Kjeldsen T. R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe // Journal of Hydrology. 2014. Т. 519. Р. 3634–3650.
4. Alfieri L., Burek P., Feyen L. & Forzieri G. Global warming increases the frequency of river floods in Europe // Hydrology and Earth System Sciences. 2015. Vol. 19. No. 5. P. 2247–2260.
5. Blöschl G., Hall J., Parajka J., Perdigão R.A., Merz B., Arheimer B. Changing climate shifts timing of European floods // Science. 2017. Vol. 357. No. 6351. P. 588–590.
6. Matti B., Dahlke H. E., Lyon S. W. On the variability of cold region flooding // Journal of hydrology. 2016. Vol. 534. P. 669–679.
7. Джамалов Р.Г., Фролова, Н.Л., Кричевец, Г.Н., Сафронова, Т.И., Киреева М.Б., Игониная М.И. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод Европейской части России // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 571–589.
8. Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. Изменение стока снегового половодья на южном макросклоне Русской равнины в период 1930–2014 гг. // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. №. 4. С. 498–506.
9. Зайков Б. Д. Очерки гидрологических исследований в России. Гидрометеиздат, 1973. 512 с.

10. Лавров С.А., Калюжный И.А. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
11. Подземный сток на территории СССР/Под ред. Б. И. Куделина. М.: Изд-во МГУ, 1966. 303 с.
12. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги / под редакцией Георгиевского В.Ю. Ливны: Издатель Мухаметов Г.В., 2015. 112 с.
13. Киреева М.Б., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Фролова Н.А. Изучение современного водного режима рек европейской территории России с помощью автоматизированного алгоритма расчленения гидрографа GrWat // Сб. докл. межд. научной конф. «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения». 2019. С. 160–165.
14. Rybski D., Neumann J. A review on the Pettitt test //In extremis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. P. 202–213.
15. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.А., Харламов М.А., Илич В.П., Сазонов А.А. Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 694–709.

REFERENCES

1. Vtoroy itsenochniy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territoriyi Rossiyskoy Federatsiyi [Second estimation report of Rosgidromet about climate changes and their aftermath on the territory of the Russian Federation pod red. V.V. Yasyukevicha. 2014. 1018 p. (in Russ).
2. Georgiyevskiy V.Y., Shalygin A.L. Hidrologicheskiy rezhim i vodniye resursy [Hydrological regime and water resources]. Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem. M.: Rosgidromet, 2012. P. 53–86. (in Russ)
3. Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M. & Kjeldsen T.R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*. 2014. T. 519. P. 3634–3650.
4. Alfieri L., Burek P., Feyen L. & Forzieri G. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015. Vol. 19. No. 5. P. 2247–2260.
5. Blöschl G., Hall J., Parajka J., Perdigão R. A., Merz B., Arheimer B. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*. 2017. Vol. 357. No. 6351. P. 588–590.
6. Matti B., Dahlke H. E., Lyon S. W. On the variability of cold region flooding. *Journal of hydrology*. 2016. Vol. 534. P. 669–679.
7. Dzhamaalov R.G., Frolova N.L., Krichevets G.N., Safronova T.I., Kireyeva M.B., Igonina M.I. Formirovaniye sovremennykh resursov poverkhnostnykh i podzemnykh vod Evropeyskoy chasti Rossii [Formation of the current resources of surface waters and ground waters of the European part of Russia] *Vodniye resursy [Water Resources]*. 2012. V. 39. No. 6. P. 571–589 (in Russ).
8. Koronkevich N.I., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Izmeneniye stoka snegovogo polovodya na yuzhnom makrosklone

- Russkoy ravniny v period 1930-2014 [The snow flood changes at the southern macro/slope of the Russian plain during the 1930-2014 period] *Led i Sneg* [Ice and snow]. 2018. Vol. 58. No. 4. P. 498–506 (in Russ).
9. Zaykov B.D. Ocherki gidrologicheskikh issledovaniy v Rossii [Studies of hydrological investigations in Russia] *Gidrometeoizdat*, 1973. 512 p. (in Russ).
 10. Lavrov S.A., Kalyuzhnyi I.L. Vliyaniye klimaticheskikh izmeneniy na stok vesennego polovodya i faktory yego formirovaniya v bassejne Volgi [The climate change impact upon the spring high-water flood and factors of its formation in the Volga River basin]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 6. P. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4 (in Russ).
 11. Podzemniy stok na territorii SSSR [Groundwater runoff on the territory of the USSR]. Pod red. B. I. Kudelina. M.; Izd. MGU, 1966. 303 p. (in Russ).
 12. Osnovniye gidrologicheskiye kharakteristiki rek basseyna Verkhney Volgi [The main hydrological characteristics of the Upper Volga basin rivers]. Pod redaktsiey Georgievskogo V.Y. Livny: Izdatel Mukhametov G.V., 2015. 112 p. (in Russ).
 13. Kireyeva M.B., Rets E.P., Samsonov T.E., Frolova N.L. Izucheniye sovremennogo vodnogo rezhima rek evropeyskoy territorii Rossii s pomoshchyu avtomatizirovannogo algoritma raschleneniya gidrografa GrWat [Studying of the current water regime of the European territory of Russia rivers with GrWat automated algorithm of the hydrograph partitioning] *Sb. dokl. mezhd. nauchnoy konf. "Nauchniye problemy ozdorovleniya rossiyskikh rek i puti ikh resheniya"* 2019. P. 160–165 (in Russ).
 14. Rybski D., Neumann J. A review on the Pettitt test. *In extremis*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. P. 202–213.
 15. Varentsova N.A., Kireyeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A. Prognoz pritoka vody k Tsimlyanskomu vodokhranilishchu v period polovodya v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh: problemy i vosproizvodimost [Forecast of water inflow to the Tsimla reservoir during the high-water period in contemporary climatic conditions: problems and repeatability] *Vodniye resursy* [Water Resources]. 2020. Vol. 47. No. 6. P. 694–709 (in Russ).

Сведения об авторах:

Горбаренко Артем Валентинович, студент, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1; ORCID: 0000-0002-6815-5928; e-mail: gorbarenko.ar@gmail.com

Варенцова Наталья Александровна, инженер, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1; начальник отдела гидрологических прогнозов, ФГБУ «Центральное УГМС», Россия, 127055, Москва, ул. Образцова, д. 6; ORCID: 000-0002-7608-6328

Киреева Мария Борисовна, доцент, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1; ORCID: 0000-0002-8285-9761

About the authors:

Artem V. Gorbarenko, 4th year student, M.V. Lomonosov Moscow State University Geographic Department Chair of Inland Hydrology, Leninskiye Gory, 1, GSP-1, Moscow, 119991, Russia; ORCID: 0000-0002-6815-5928; e-mail: gorbarenko.ar@gmail.com

Natalya A. Varentsova, Engineer, M.V. Lomonosov Moscow State University Geographic Department Chair of Inland Hydrology, Leninskiye Gory, 1, GSP-1, Moscow, 119991, Russia; ORCID: 000-0002-7608-6328

Maria B. Kireeva, Associate Professor, M.V. Lomonosov Moscow State University Geographic Department Chair of Inland Hydrology, Leninskiye Gory, 1, GSP-1, Moscow, 119991, Russia; ORCID: 0000-0002-8285-9761