








## Сток трансграничных рек Республики Беларусь и России в условиях изменяющегося климата

О.М. Таврыкина<sup>1</sup>  , М.В. Шмакова<sup>2</sup> , И.А. Булак<sup>1</sup> , А.О. Русина<sup>1</sup> ,  
Е.И. Громадская<sup>1</sup> 

 tavrykina@mail.ru

<sup>1</sup> Республиканское унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Институт озераведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В настоящее время в связи с растущей антропогенной нагрузкой и изменением климата востребованы исследования интенсивности и направленности динамики водных ресурсов, затрагивающих трансграничные водотоки, с целью их безопасного использования и сохранения. В связи с этим актуальным представляется анализ стока крупных трансграничных рек Беларуси и России – Западная Двина и Сож. **Методы.** Для расчетов использованы данные наблюдений на стационарных гидрометрических створах р. Западная Двина с 1877 по 2021 гг. и р. Сож с 1897 по 2021 гг. и данные наблюдений на метеостанции г. Смоленска за температурой воздуха и атмосферными осадками. Методами математической статистики проанализированы внутригодовое распределение и многолетние ряды стока и метеорологических величин. **Результаты.** Наиболее значимые перемены в стоке трансграничных рек определены в его внутригодовом распределении. Теплые зимы повлияли на повышение стока в зимний период, что привело к уменьшению объемов половодья исследуемых водотоков. При этом в результате роста температуры воздуха в регионе увеличился слой испарения с водосборной площади. Однако повышенное количество атмосферных осадков обусловило увеличение стока для исследованных рек.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трансграничные реки, р. Западная Двина, р. Сож, расход воды, климат, осадки, температура, внутригодовое распределение.

**Для цитирования:** Таврыкина О.М., Шмакова М.В., Булак И.А., Русина А.О., Громадская Е.И. Сток трансграничных рек Республики Беларусь и России в условиях изменяющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 101–114. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-101-114.

Дата поступления 29.12.2023.

## THE FLOW OF TRANSBOUNDARY RIVERS OF THE REPUBLIC OF BELARUS AND RUSSIA IN A CHANGING CLIMATE

Aksana M. Taurykina<sup>1</sup>  , Marina V. Shmakova<sup>2</sup> , Ivan A. Bulak<sup>1</sup> ,  
Anastasiya O. Rusina<sup>1</sup> , Alena I. Hramadskaya<sup>1</sup> 

 tavyrkina@mail.ru

<sup>1</sup>Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Institute of Limnology RAS, Saint-Petersburg, Russia

### ABSTRACT

**Relevance.** Currently, due to the growing anthropogenic load and climate change, studies of the intensity and direction of the dynamics of water resources affecting transboundary watercourses are in demand in order to use and preserve them safely. In this regard, it is relevant to analyze the flow of large transboundary rivers of Belarus and Russia – the Western Dvina and Sozh. **Methods.** For calculations, the data of observations at stationary hydrometric sites of the Western Dvina River from 1877 to 2021 and the Sozh River from 1897 to 2021 and observation data at the meteorological station were used. Smolensk for air temperature and precipitation. The methods of mathematical statistics were used to analyze the intraannual distribution and long-term series of runoff and meteorological values. **Results.** The most significant changes in the flow of transboundary rivers are determined in its intra-annual distribution. Warm winters determined an increase in runoff in winter, which led to a decrease in the volume of flooding of the studied watercourses. At the same time, as a result of the increase in air temperature in the region, the evaporation layer from the catchment area increased. However, the increased amount of precipitation caused an increase in runoff for the studied rivers.

**Keywords:** transboundary rivers, Western Dvina, Sozh, water drain, water discharge, climate, precipitation, temperature, intra-annual distribution.

**For citation:** Taurykina A.M., Shmakova M.V., Bulak I.A., Rusina A.O., Hramadskaya A.I. The flow of transboundary rivers of the Republic of Belarus and Russia in a changing climate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 101–114. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-101-114.

Received 29.12.2023.

### ВВЕДЕНИЕ

Вызванное изменением климата уменьшение водности рек в настоящее время относится к одному из наиболее актуальных направлений исследований гидрологии<sup>1</sup> [1]. Существенные преобразования водного режима рек понизили предсказуемость запасов воды и спроса на нее, привели к ухудшению качества воды, усугубили ее дефицит на засушливых территориях и поставили под угрозу устойчивое развитие, хозяйственную деятельность, безопасность и условия проживания населения на этих территориях [2, 3].

Как известно, формирование речного стока определяется выпавшими в течение года осадками, увлажненностью предшествующего периода, температурой и водохозяйственной деятельностью на водосборе и в пределах реки [4–7]. Многолетний водный режим рек характеризуется преобладающим типом питания, который, в свою очередь, зависит от физико-географического положения водного объекта и, как следствие, климата [8–14]. Наблюдаемые

<sup>1</sup> Изменение климата и вода. Аналитическая записка механизма «ООН – водные ресурсы», 2019. 8 с.

в последние десятилетия повышение температуры воздуха и количества атмосферных осадков, изменение внутригодового распределения этих величин обусловили уменьшение мощности снежного покрова, что определило существенные перемены внутригодового распределения стока водотоков [7–14].

Масштабы водопользования и его воздействия на окружающую среду в настоящее время достигли таких размеров, что экологические требования, предъявляемые к сохранению водных экосистем, и даже сама по себе возможность использования водных ресурсов становятся лимитирующим фактором социально-экономического развития. Увеличение потребления воды в сочетании с неравномерным распределением водных ресурсов по территории и, что крайне важно, во времени, практически неконтролируемое загрязнение водных объектов требуют более детальных исследований стока в лимитирующие периоды и сезоны.

Для предотвращения негативных последствий изменения климата, повышения эффективности предпринимаемых мер по смягчению его воздействия на водные объекты необходимо проводить совместные исследования по изучению изменений водного режима рек на трансграничных водотоках для выработки стратегических решений их сохранения и восстановления.

Цель данной работы – анализ влияния климатических изменений на сток трансграничных рек Беларуси и России – Западная Двина и Сож – за весь период наблюдений на этих водотоках.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования выбраны трансграничные водотоки Республики Беларусь и России – большие равнинные реки Западная Двина и Сож.

Западная Двина берет начало на Валдайской возвышенности из оз. Корякино (Тверская обл., Россия) на высоте 220 м над уровнем моря, впадает в Рижский залив Балтийского моря (Латвия). Ее длина от истока до устья – 1020 км, из которых в пределах Беларуси протекает 328 км среднего течения реки<sup>2,3</sup> [15]. Общая площадь водосбора – 87,9 тыс. км<sup>2</sup>. Питание реки смешанное, преимущественно снеговое с большой долей грунтового. Особенность режима – высокое весеннее половодье, низкая летне-осенняя межень с частыми дождевыми паводками, устойчивая зимняя межень. На территории Беларуси на р. Западная Двина функционируют две гидроэлектростанции – Витебская и Полоцкая ГЭС с проектной мощностью 40 МВт и 21,66 МВт соответственно.

Река Сож – крупнейший левый приток Днепра длиной 648 км, площадью водосбора 42,1 тыс. км<sup>2</sup>. В пределах Беларуси находится 493 км общей протяженности реки. Сож берет свое начало на Смоленско-Московской возвышенности в 12 км к югу от Смоленска<sup>4,5</sup>. Водосбор р. Сож асимметричный, более развит по левобере-

<sup>2</sup> Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 5. Белоруссия и верхнее Поднепровье / под редакцией Н.Д. Шека. Ленинград: ГИМИЗ, 1963. 304 с.

<sup>3</sup> Блакітная кніга Беларусі: Энцыкл. Мн.: БелЭн, 1994. 415 с.

<sup>4</sup> Сож // Большая советская энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

<sup>5</sup> Сож // Словарь современных географических названий. Рус. геогр. общество. под общ. ред. акад. В.М. Котлякова. Институт географии РАН. Екатеринбург: У-Фактория, 2006.

жью, грушевидной формы: верхняя его часть находится на юго-западной окраине Смоленской возвышенности, средняя – на Оршанско-Могилёвской равнине; нижняя – в границах Гомельского Полесья. Река используется для судоходства, частично для промышленного водоснабжения и рыбного промысла.

Анализ многолетних изменений стока воды и климатических показателей российской части бассейна Западной Двины за период 1966–2015 гг. показал повышение температуры воздуха с одновременным увеличением количества атмосферных осадков и речного стока, при этом изменение тренда слоя стока носило нелинейный характер относительно тренда количества выпавших осадков и всегда его превышало [16]. Однако сток на территории республики распределен неравномерно, в настоящее время наиболее уязвимым является южная часть территории, где наблюдается снижение стока, в особенности это характерно для малых рек.

Вместе с тем, исследования, проведенные А.А. Волчком [3] для минимального стока, показали, что для 16 % рек Беларуси отсутствует однородность данных летне-осеннего минимального стока и для 5 % – зимнего (возможная причина – интенсивная хозяйственная деятельность на водосборах рек). Частично ненарушенный режим наблюдался для летне-осеннего минимального стока на 21 % исследуемых рек, для зимнего – на 31 % (возможная причина – естественные колебания водности или сопоставимые с ними незначительные воздействия). Полностью однородные ряды для 63 % рек летне-осеннего минимального стока и 64 % рек зимнего стока могут свидетельствовать о ненарушенном водном режиме или синхронности антропогенных воздействий и колебаний водного режима.

В основу дальнейших расчетов легли данные наблюдений на гидрометрических створах р. Западная Двина – г. Витебск с 1877 по 2021 гг., р. Сож – г. Славгород с 1897 по 2021 гг., данные наблюдений на метеостанции г. Смоленска за температурой воздуха с 1888 по 2022 гг. и атмосферными осадками за период 1944 – 2022 гг.

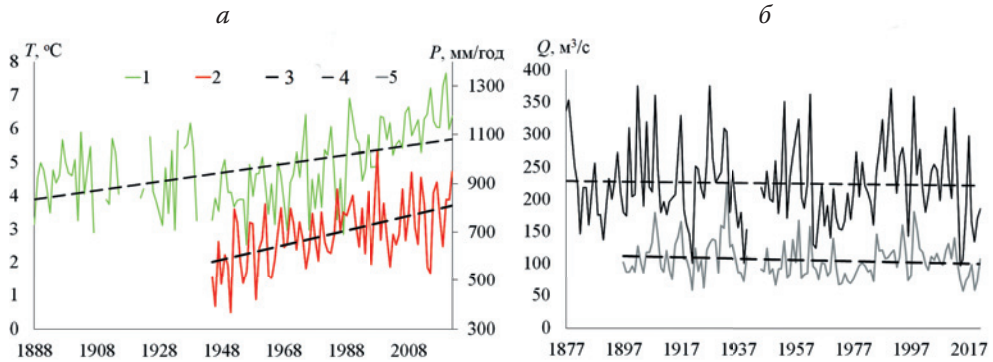
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Расчеты

На рис. 1 представлен хронологический ход среднегодовой температуры воздуха и годовых слоев осадков по метеостанции г. Смоленска и среднегодовых расходов воды на створах р. Западная Двина – г. Витебск и р. Сож – г. Славгород, а также линии трендов для этих величин. Согласно линейным трендам за исследуемый период температура воздуха в г. Смоленске увеличилась на 1,8 °С, существенно повысился годовой слой осадков – на 237 мм/год, а среднегодовые расходы воды уменьшились на 8 м<sup>3</sup>/с и 12 м<sup>3</sup>/с для р. Западная Двина и р. Сож, соответственно.

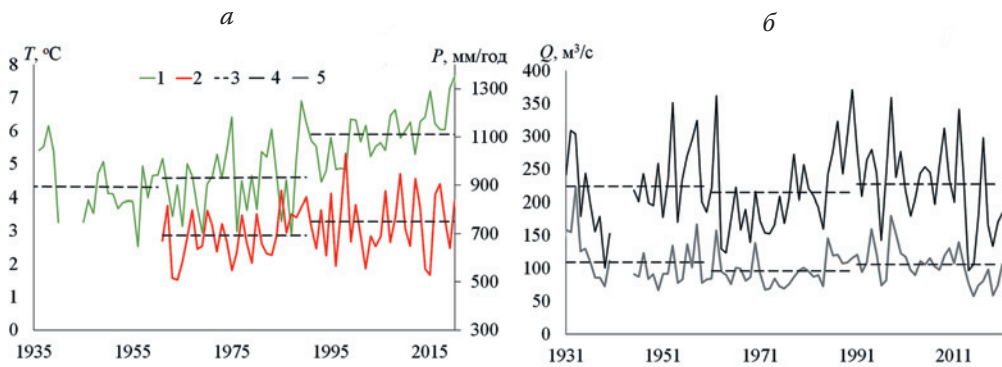
В соответствии с климатологическими базовыми нормами ВМО<sup>6</sup> на рис. 2 приведен хронологический ход исследуемых величин для трех 30-летних кли-

<sup>6</sup> Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.



**Рис. 1.** Хронологический ход метеорологических величин по м/ст г. Смоленска (а) и среднегодовых расходов воды (б): 1 – среднегодовая температура воздуха,  $T$ , °C; 2 – годовые слои осадков,  $P$ , мм/год; 4 – среднегодовые расходы воды р. Западная Двина – г. Витебск,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; 5 – среднегодовые расходы воды р. Сож – г. Славгород,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; 3 – линии трендов исследуемых величин.

Fig. 1. Chronological run of meteorological values at the Smolensk meteorological station (a) and average annual discharge of water (b): 1 is average annual air temperature,  $T$ , °C; 2 is annual precipitation layers,  $P$ , mm/year; 4 is average annual water discharge of the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk,  $Q$ , m<sup>3</sup>/s; 5 is average annual water discharge of the Sozh River – Slavgorod,  $Q$ , m<sup>3</sup>/s; 3 is the studied values trend lines.



**Рис. 2.** Хронологический ход метеорологических величин (а) и среднегодового расхода воды (б) для трех климатических периодов: 1 – среднегодовая температура воздуха,  $T$ , °C; 2 – годовые слои осадков,  $P$ , мм/год; 4 – среднегодовые расходы воды р. Западная Двина – г. Витебск  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; 5 – среднегодовые расходы воды р. Сож – г. Славгород  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; 3 – линии средних значений за периоды 1931–1960 гг., 1961 – 1990 гг. и 1991–2020 гг.

Fig. 2. Chronological run of meteorological values (a) and average annual water discharge (b) for three climatic periods: 1 is average annual air temperature,  $T$ , °C; is annual precipitation layers,  $P$ , mm/year; 4 is average annual water discharge of the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk,  $Q$ , m<sup>3</sup>/s; 5 is average annual water discharge of the Sozh River – Slavgorod,  $Q$ , m<sup>3</sup>/s; 3 is average values lines over the 1931–1960, 1961–1990, and 1991–2020 periods.

матических периодов: 1931–1960 гг., 1961–1990 гг. (исторический базовый климатический период) и 1991–2020 гг. (текущий базовый климатический период). В табл. 1 представлены статистические параметры исследуемых величин для базового и текущего климатических периодов, а также абсолютные и относительные отклонения исследуемых величин. Согласно данным табл. 1, температура воздуха ( $T$ , °C) в текущем климатическом периоде увеличилась по сравнению с базовым на 0,86 °C, годовые слои осадков – на 48 мм/год или на 6,9 %, среднегодовые расходы воды ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) увеличились на 12 м<sup>3</sup>/с (5,6 %) для створа р. Западная Двина – г. Витебск и на 9 м<sup>3</sup>/с (9,3 %) для створа р. Сож – г. Славгород.

**Таблица 1.** Статистические параметры исследуемых величин для двух климатических периодов

Table 1. Statistical parameters of the studied values for two climatic periods

Величина	Среднее			Среднее квадратичное отклонение			Отклонения между базовым и текущим климатическими периодами	
	1931–1960 гг.	1961–1990 гг.	1991–2020 гг.	1931–1960 гг.	1961–1990 гг.	1991–2020 гг.	абс.	относительное, %
$T$ , °C	4,33	5,03	5,89	0,96	1,07	0,76	0,86	
$P$ , мм/год	–	693	741	–	99	129	48	6,9
$Q$ , м <sup>3</sup> /с р. Западная Двина – г. Витебск	224	215	227	59	64	63	12	5,6
$Q$ , м <sup>3</sup> /с р. Сож – г. Славгород	110	97	106	36	23	29	9	9,3

Ряды исследуемых величин подчиняются нормальному закону распределения (согласно критерию Колмогорова-Смирнова при уровне значимости  $\alpha=0,3$ ), поэтому в дальнейших оценках использованы методы параметрической статистики. В табл. 2 представлены статистические параметры исследуемых метеорологических рядов и рядов среднегодовых расходов воды. Проверка этих рядов для двух климатических периодов на однородность<sup>7,8,9</sup> [17] показала, что по дисперсии (критерий Фишера) все ряды однородны для уровня значимости  $\alpha=0,10$ , по средним значениям (критерий Стьюдента) ряды

<sup>7</sup> Новый двухуровневый подход к «климатическим нормам» // Гидрометцентр России. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-1-r> (дата обращения 03.02.2020).

<sup>8</sup> Статистические методы. Статистическое представление данных. Ч. 4. Выявление и обработка выбросов. ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. М.: Стандартинформ, 2017. 53 с.

<sup>9</sup> Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. ГОСТ Р 50779.22 2005. М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.

неоднородны лишь для среднегодовой температуры воздуха для того же уровня значимости (табл. 2). При этом для уровня значимости  $\alpha=0,1$ , согласно критерию Стьюдента, незначительными являются тренды среднегодовых расходов воды, тогда как тренды годовых слоев осадков и среднегодовой температуры воздуха значимы (табл. 2).

**Таблица 2.** Проверка статистических гипотез\*

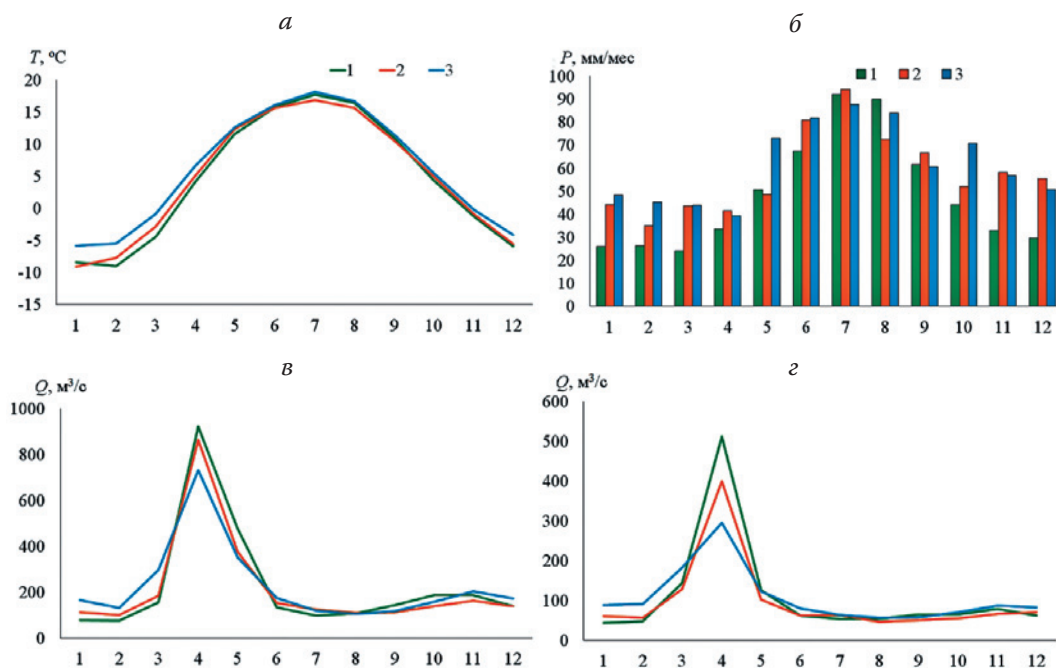
Table 2. Checking of statistical hypothesis

Величина	$H_0 (I)$	$H_0 (II)$	$H_0 (III)$
м/ст г. Смоленск			
T, °C	$t > t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t > t_{\alpha} = 0.1$
P, мм/год	$t < t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t > t_{\alpha} = 0.1$
р. Западная Двина – г. Витебск			
Q, м <sup>3</sup> /с	$t < t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t < t_{\alpha} = 0.1$
р. Сож – г. Славгород			
Q, м <sup>3</sup> /с	$t < t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t < t_{\alpha} = 0.1$

*Примечание:* \* –  $H_0 (I)$  и  $H_0 (II)$  – гипотезы о равенстве выборочных средних и дисперсии (критерии Стьюдента и Фишера);  $H_0 (III)$  – гипотеза о значимости тренда (критерий Стьюдента);  $\alpha$  – уровень значимости;  $t$  и  $F$  – статистики Стьюдента и Фишера;  $t_{кр}$  и  $F_{кр}$  – критические значения статистик Стьюдента и Фишера.

Внутригодовое распределение исследуемых величин для трех климатических периодов отражено на рис. 3. Как следует из представленных данных, среднемесячная температура воздуха заметно увеличивается во втором и третьем климатических периодах с ноября по май. Месячные слои осадков увеличиваются в течение всего года в сравнении с первым климатическим периодом. Исключение составляют июль, август и сентябрь, когда слои осадков текущего климатического периода несколько ниже. Половодье рек Западная Двина и Сож значительно уменьшилось последовательно для второго и третьего климатических периодов, тогда как зимний период, наоборот, характеризуется увеличением стока.

На рис. 4 представлены квартильные диаграммы внутригодового распределения среднемесячных значений уровня воды исследуемых рек для двух климатических периодов, совмещенные с линией медианы этой величины. В данном построении рассматривается 1,5 интерквартильный размах  $IQR$ , за пределами которого данные наблюдений интерпретируют как возможные выбросы [17–19]. Согласно полученным результатам заметных изменений в интерквартильном размахе среднемесячных значений расхода воды для р. Западная Двина не наблюдается, тогда как для р. Сож фиксируется значительное уменьшение размаха в период половодья в апреле в текущем климатическом периоде.



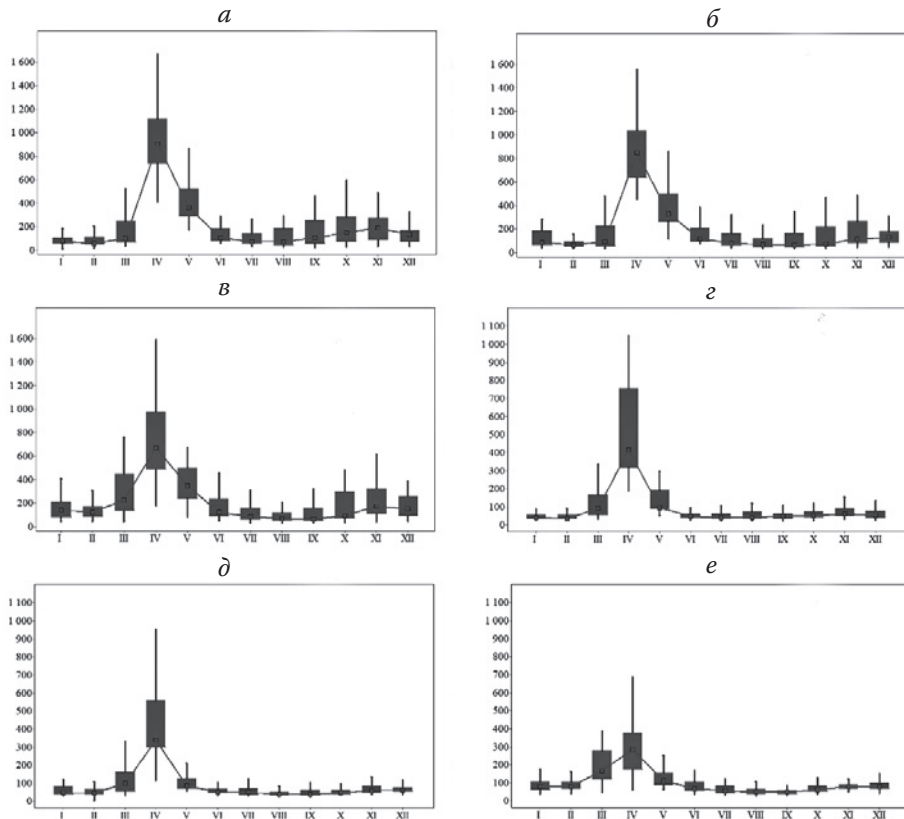
**Рис. 3.** Внутригодовое распределение среднемесячной температуры воздуха (а), месячных слоев осадков (б) на м/ст г. Смоленск; среднегодовых расходов воды р. Западная Двина – г. Витебск (в) и р. Сож – г. Славгород (г) для периодов 1931–1960 гг. (1), 1961–1990 гг. (2) и 1991–2020 гг. (3).

Fig. 3. Intra-annual distribution of the average monthly air temperature (a), monthly precipitation layers (б) at the Smolensk meteorological station; average annual water discharges of the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk (в) and the Sozh River – Slavgorod (г) for the 1931–1960 (1), 1961–1990 (2) and 1991–2020 (3) periods.

На рис. 5 представлены суммарные и разностные интегральные кривые исследуемых величин для определения дат нарушения однородности. Согласно этим кривым, для среднегодовых расходов воды исследуемых водотоков и слоев осадков характерно отсутствие резких скачков и изменений на графике (интегральная кривая практически укладывается в прямую линию, обозначенную пунктиром), что свидетельствует об отсутствии отдельных дат нарушения однородности. При этом для ряда среднегодовой температуры воздуха в 1926 и 1997 годах можно увидеть выраженные переломные точки сначала на понижение, а затем на повышение температуры. В целом следует заметить, что водность рек хорошо сопряжена с количеством осадков, за исключением нескольких последних лет рассматриваемого периода. Это объясняется существенным увеличением температуры воздуха, определившим рост испарения, что обусловило уменьшение водности водотоков.

Согласно данным наблюдений за более чем вековой период, сток рек Западная Двина и Сож уменьшался со средней скоростью 18 и 10 м³/с в год соответственно. В целом, такое уменьшение стока водотоков рассматриваемого региона определено повышением температуры воздуха и увеличением вследствие этого испарения с подстилающей поверхности водосбора. При этом в текущем кли-



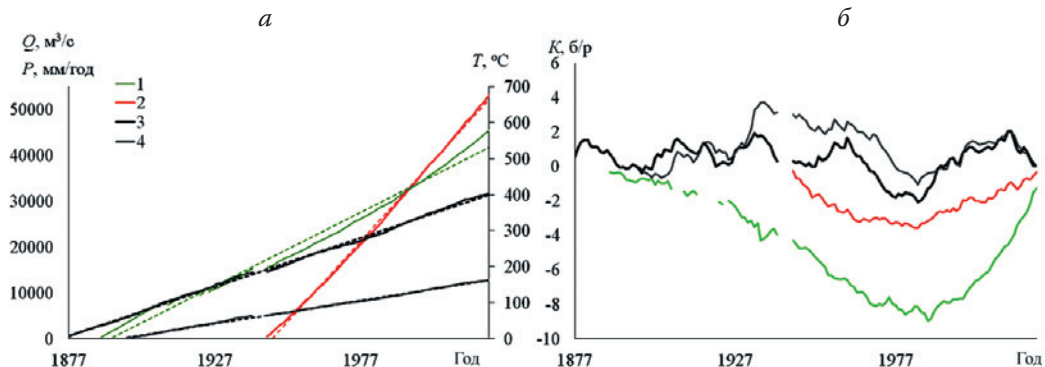


**Рис. 4.** Квартильные диаграммы среднемесячных значений расхода воды с обозначенной линией медианы: *a* – р. Западная Двина – г. Витебск, 1931–1960 гг.; *б* – 1961–1990 гг.; *в* – 1991–2020 гг.; *з* – 1931–1960 гг.; *д* – 1961–1990 гг.; *е* – 1991–2020 гг. для створа р. Сож – г. Славгород.

Fig. 4. Quartile diagrams of average monthly water discharges with the designated median line: *a* – is the Zapadnaya Dvina – Vitebsk, 1931–1960; *б* – is 1961–1990; *в* – is 1991–2020; *з* – is 1931–1960; *д* – is 1961–1990; *е* – is 1991–2020.

матическом периоде в сравнении с базовым среднегодовые расходы воды незначительно увеличились на 5,6 % для р. Западная Двина и на 9,3 % для р. Сож.

Наиболее существенные изменения пришлось на внутригодовое распределение стока, что связано с увеличением расхода воды в зимний период и его уменьшением в период половодья. Подобные тенденции во внутригодовом распределении характерны для водотоков средней полосы России и Беларуси и объясняются заметными повышениями температуры воздуха в зимний период. Так, температура в январе по м/ст г. Смоленска увеличилась более, чем на 2,5 °С в последнем климатическом периоде по сравнению с базовым. В результате перераспределения стока в течение года среднемесячные расходы воды за январь и февраль повысились почти в два раза, тогда как максимальные среднемесячные расходы воды за половодье уменьшились на 73 % для р. Западная Двина и на 26 % для р. Сож. Сток весеннего половодья при этом уменьшился на 8 % и 12 % соответственно.



**Рис. 5.** Суммарные (а) и разностные (б) интегральные кривые среднегодовой температуры воздуха (1) и слоев осадков (2) по м/ст г. Смоленска, средних годовых расходов воды, р. Западная Двина – г. Витебск (3) и р. Сож – г. Славгород (4).

Fig. 5. Total (a) and differential (b) integral curves of average air temperature (1) and precipitation layers (2) at the Smolensk meteorological station, average annual water discharges, the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk (3) and the Sozh River – Slavgorod (4).

Полученные данные хорошо сопоставимы с исследованиями других авторов [3, 4, 12], где приведена информация о повышении зимних температур, увеличении периода оттепелей, месячных слоев осадков и, как следствие, перераспределении внутригодового стока. При этом водность меженных периодов увеличилась, а максимальные расходы и слои половодья снизились. В зимний период наблюдается повышение стока для всех водотоков республики, в то время как в весенний, летний и осенний периоды на территории Беларуси прослеживается разная направленность стока, отмечается его снижение по югу и западу территории и увеличение по северу и северо-востоку. Подобные изменения в большей степени проявляется на малых и средних реках.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдающиеся в последние годы современные климатические изменения проявляются, помимо изменения средних значений метеорологических величин, также в увеличении частоты встречаемости аномальных климатических явлений. Вслед за повышением температуры, экстремальным характером выпадения осадков, проявляющимся в увеличении повторяемости периодов с большим количеством выпадающих осадков и их продолжительным отсутствием, уменьшением мощности снежного покрова, оттепелями и т. д., закономерно происходит более резкое изменение стока рек в течение года, что потенциально повышает риск возникновения опасных гидрологических явлений.

Проведенный анализ данных наблюдений для трех тридцатилетних климатических периодов 1931–1960 гг., 1961–1990 гг. (исторический базовый климатический период) и 1991–2020 гг. (текущий базовый период) по м/ст г. Смоленска показал повышение температуры в текущем базовом периоде на 0,86 °C с одновременным увеличением годовых слоев осадков на 48 мм/год (6,9%). При этом отмечается незначительное увеличение среднегодовых рас-

ходов воды рек Западная Двина и Сож – на 5,6 % для створа р. Западная Двина – г. Витебск и на 9,3 % для створа р. Сож – г. Славгород.

По состоянию внутригодового распределения стока отмечено его значительное перераспределение, выражающееся в увеличении расхода воды в зимний период и его снижении в период половодья. Так, среднемесячные расходы воды за зимние месяцы повысились почти в два раза, тогда как максимальные среднемесячные расходы воды за половодье уменьшились на 73 % для р. Западная Двина и на 26 % для р. Сож. Сток весеннего половодья при этом уменьшился на 8 % и 12 % соответственно.

Проведенный анализ динамики речного стока за более, чем столетний период (144 года для р. Западная Двина и 124 года для р. Сож) показал, что, согласно линейному тренду, сток исследуемых водотоков уменьшался со средней скоростью 18 и 10 м<sup>3</sup>/с в год соответственно. Однако в последнем климатическом периоде по сравнению с базовым наблюдается незначительное увеличение расходов воды на реках Западная Двина и Сож вместе с повышением температуры и количества атмосферных осадков и существенное перераспределение стока в течение года. Также следует отметить, что по отношению к многолетнему периоду количество маловодных лет в последнем климатическом периоде для исследуемых водотоков не увеличилось, тогда как количество многоводных лет для р. Западная Двина стало больше, а для р. Сож осталось прежним.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.А., Антонова М.М., Игонина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // *Вода: химия и экология*. № 4. 2013. С. 3–12.
2. Жапаркулова Е.Д. Тенденция изменения климата на современном этапе, прогноз на период до 2050 г. и его влияние на водность рек ледниково-снегового питания (на примере трансграничной реки Куркуреу-Суу, Таласский бассейн) // *Гидрометеорология и экология*. № 4. 2019. С. 70–82.
3. Волчек А.А., Грядунова О.И. Минимальный сток рек Беларуси. Брест: БрГУ. 2010. 300 с.
4. Парфомук С.И. Анализ многолетних колебаний годового стока воды реки Западная Двина // *Вестник Полоцкого государственного университета*. Сер. В: Прикладные науки. 2006. № 3. С. 178–182.
5. Гольберг М.А., Волобуева Г.В., Комаровская Е.В. Изменение основных климатических характеристик Беларуси в XX веке // *Доклад Национальной академии наук Беларуси*. Т. 47. 2003. № 1. С. 119–123.
6. Логинов В.Ф., Некрасова А.А., Данилович И.С. Поверхностные воды Беларуси // *Экологический бюллетень*. 2003. С. 21–25.
7. Карягин Ф.А. Об изменениях речных систем малых рек под влиянием антропогенной деятельности в условиях Чувашской Республики // *Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: сб. докл. Межд. научн. конф.* Минск, 2015. С. 63–65.
8. Фролова Н. Л. Гидрология рек. Антропогенные изменения речного стока: уч. пособие для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2023. 115 с.
9. Фролова Н.А., Киреева М.Б., Джамалов Р.Г. Изменения водного режима и сезонного стока рек ЕТР и их влияние на экстремальные гидрологические ситуации // *V Всероссийская научн. конф. «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов»*. М., 2015. С. 345–348.

10. Лопух П.С., Герменчук М.Г., Партасенок И.С. Основные направления гидрометеорологических исследований в условиях нестабильного климата // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы Межд. научн. конф. Минск, 2015. С. 34–40.
11. Лопух П.С., Партасёнок И.С. Влияние атмосферной циркуляции на формирование гидрологического режима рек Беларуси. Минск: БГУ, 2013. 216 с.
12. Сикан А.В., Байдук О.В. Влияние изменения климата на водный режим рек южной и восточной частей Республики Беларусь // Гидрология. 2015. № 40. С. 61–70.
13. Кошелева Е.Д. Водность рек Алтайского края в условиях изменения климата // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 2 (69). С. 5–16.
14. Шайдылдаева Н.М., Усубалиев Р.А., Мандычев А.Н. Влияние изменения климата на водность рек Чычкан и Бала-Чычкан Кетмен-Тюбинской котловины // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2022. № 3. С. 87–92.
15. Физическая география Витебской области: уч. пособие / под ред. А.Н. Галкина. Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2021. 235 с.
16. Домнин Д.А. Многолетние и внутригодовые изменения стока воды с российской части бассейна реки Западная Двина как отклик на колебания климатических параметров / Ученые записки РГГМУ. 2018. Вып. № 51. С. 63–70.
17. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. Т. 2. Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГГМУ, 2020. 196 с.
18. McGill R., Tukey J. W., Larsen W.A. Variations of Box Plots. *The American Statistician*. 1978. Vol. 32. No. 1. P. 12–16.
19. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis*. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co, 1977. 711 p.

#### REFERENCES

1. Alekseevsky N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river flow in the Volga basin. *Water: chemistry and ecology*. No. 4. 2013. P. 3–12 [In Russ.].
2. Zhaparkulova E.D. The trend of climate change at the present stage, forecast for the period up to 2050 and its impact on the water content of glacial-snow supply rivers (on the example of the transboundary Kurkureu-Suu River, Talas basin). *Hydrometeorology and Ecology*. No. 4. 2019. P. 70–82 [In Russ.].
3. Volchek A.A., Gryadunova O.I. The minimum flow of the rivers of Belarus. A.S. Pushkin Brest State University. Brest: BrGU. 2010. 300 p. [In Russ.].
4. Parfomuk S.I. Analysis of long-term fluctuations in the annual water flow of the Western Dvina River. *Bulletin of the Polotsk State University. Series B: Applied Sciences*. 2006. No. 3. P. 178–182 [In Russ.].
5. Golberg M.A., Volobueva G.V., Komarovskaya E.V. Changes in the main climatic characteristics of Belarus in the twentieth century. *Dokl. The National Academy of Sciences of Belarus*. Vol. 47. 2003. No. 1. P. 119–123 [In Russ.].
6. Loginov V.F., Nekrasova L.A., Danilovich I.S. Surface waters of Belarus. *Environmental bulletin*. 2003. P. 21–25 [In Russ.].
7. Karyagin F.A. On changes in the river systems of small rivers under the influence of anthropogenic activity in the conditions of the Chuvash Republic. *Problems of hydrometeorological support of economic activity in a changing climate: materials of the International Scientific Conference, 5-8 May 2015 Minsk, 2015*. P. 63–65 [In Russ.].
8. Frolova N. L. Hydrology of rivers. Anthropogenic changes in river flow: a textbook for universities. M.: Yurait Publishing House, 2023. 115 p. [In Russ.].
9. Frolova N.L., Kireeva M.B., Jamalov R.G. Changes in the water regime and seasonal flow of rivers of the ETR and their impact on extreme hydrological situations. *In Russian Scientific Conference "Fundamental problems of water and water resources"*, Moscow, September 15–18, 2015. M., 2015. P. 345–348 [In Russ.].

10. Lopukh P.S., Hermenchuk M.G., Partasenok I.S. The main directions of hydrometeorological research in an unstable climate. *Problems of hydrometeorological support of economic activity in a changing climate: materials of the International Scientific Conference*, 5–8 May 2015 Minsk, 2015. P. 34–40 [In Russ.].
11. Lopukh P.S., Partasenok I.S. The influence of atmospheric circulation on the formation of the hydrological regime of the rivers of Belarus. Minsk: BSU, 2013. 216 p. [In Russ.].
12. Sikan A.V., Baiduk O.V. The influence of climate change on the water regime of rivers in the southern and eastern parts of the Republic of Belarus. *Hydrology*. 2015. No. 40. P. 61–70 [In Russ.].
13. Kosheleva E.D. The water content of the rivers of the Altai Territory in the context of climate change. *Proceedings of the Altai branch of the Russian Geographical Society*. 2023. No. 2 (69). P. 5–16 [In Russ.].
14. Shaidyldaeva N.M., Usabaliev R.A., Mandychev A.N. The impact of climate change on the water content of the Chychkan and Bala-Chychkan rivers of the Ketmen-Tyubinsk basin. *Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan*. 2022. No. 3. P. 87–92 [In Russ.].
15. Physical geography of the Vitebsk region: a textbook. Edited by A.N. Galkin. Vitebsk: VSU, 2021. 235 p. [In Russ.].
16. Domnin D.A. Many-year and intra/urban changes of the water runoff from the Russian part of the Zapadnaya Dvina River basin as a response to fluctuations of the climatic parameters. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2018. No. 51. P. 63–70 [In Russ.].
17. Malinin V.N. Statistical methods of analysis of hydrometeorological information: textbook. In 2 volumes: Vol. 2. Analysis of time series and random fields. St. Petersburg: RSHMU, 2020. 196 p. [In Russ.].
18. McGill R., Tukey J. W., Larsen W.A. Variations of Box Plots. *The American Statistician*. 1978. Vol. 32. No. 1. P. 12–16 [In Russ.].
19. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis*. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co, 1977. 711 p. [In Russ.].

#### Сведения об авторах:

**Таврыкина Оксана Михайловна**, канд. с.-х. наук, доцент, начальник отдела гидрологии и водоохранных территорий, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0009-0008-4662-0690; e-mail: tavrykina@mail.ru

**Шмакова Марина Валентиновна**, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория математических методов моделирования, Институт озероведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН), 196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9; ORCID 0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

**Булак Иван Александрович**, заведующий сектором использования водных ресурсов, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0000-0002-8275-3983; e-mail: i\_bulak@tut.by

**Русина Анастасия Олеговна**, научный сотрудник, сектор использования водных ресурсов, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0009-0002-8936-796X; e-mail: omgwk@cricuwr.by

**Громадская Елена Ивановна**, начальник отдела поверхностных вод, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0009-0000-3379-4167; e-mail: elena.gromadskaya@yandex.ru

**About the authors:**

**Aksana M. Taurykina**, PhD, Associate Professor, Head of hydrology and water protection areas department of the Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0009-0008-4662-0690; e-mail: tavyrkina@mail.ru

**Marina V. Shmakova**, Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling Methods Institute of Limnology RAS, ul. Sevastyanova, 9, Saint-Petersburg, 196105, Russia,; ORCID 0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

**Ivan A. Bulak**, Head of the water resources sector of the Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0000-0002-8275-3983; e-mail: i\_bulak@tut.by

**Anastasiya O. Rusina**, Researcher, Water Resources Sector, Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0009-0002-8936-796X; e-mail: omgwk@cricuwr.by

**Alena I. Hramadskaya**, Head of the Surface Water Department, Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0009-0000-3379-4167; e-mail: elena.gromadskaya@yandex.ru