

опасности государства : мат. VI съезда почвоведов и агрохимиков / Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси. – Минск, 2022. – С. 163–166.

5. Забулис Р.М. Модели миграции азотистых соединений в грунтовых водах в районах жи-вотноводческих комплексов / Р.М. Забулис // Изучение условий защищенности подземных вод: сб. науч. трудов. – Москва, 1986. – С. 69–80.

6. Коломієць С.С. Просторова оцінка ризику забруднення біогенними елементами ґрунтових вод агроландшафтів / С.С. Коломієць // Агроекологічний журнал. – 2013. – № 1. – С. 35–38.

7. Геохимия ландшафта / Н. К. Чертко [и др.]. – Минск : БГУ, 2011. – 303 с.

8. Амосов Н.А. Алгоритм здоровья / Н.А. Амосов. – М., АСТ, 2002. – 590 с.

9. Обухов А.И. Баланс тяжелых металлов в агроценозах дерново-подзолистых почв и проблемы мониторинга / А.И. Обухов, А.А. Попова // Вест. МГУ. Сер. 17, Почвоведение. – 1992. – № 3. – С. 31–39.

10. Шилькрот Г.С. О миграции фосфора и других химических элементов с грунтовым стоком в сельских ландшафтах / Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» : сб. науч. тр. / Карельский научный центр РАН. – Петрозаводск, 2015. – Том 1. – С. 386–394.

УДК 556.5

## **ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ГОДОВОЙ И МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК РЕК БЕЛАРУСИ: ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ**

***А. А. Волчек<sup>1</sup>, С. В. Сидак<sup>2</sup>, С. И. Парфомук<sup>3</sup>, Н. Н. Шешко<sup>4</sup>***

*<sup>1</sup> Доктор географических наук, профессор, профессор кафедры природообустройства факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : volchak@tut.by*

*<sup>2</sup> Ассистент кафедры информатики и прикладной математики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : harchik-sveta@mail.ru*

*<sup>3</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : parfom@mail.ru*

*<sup>4</sup> К. т. н., доцент, начальник научно-исследовательской части УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : optimum@tut.by*

### **Реферат**

В статье выполнена оценка изменений характеристик годового стока, максимального стока весеннего половодья и основных стокоформирующих факторов за период 1988–2018 гг. по отношению к периоду 1949–1987 гг. Установлено, что отмечаемые за последние десятилетия климатические изменения существенно меняют картину пространственно-временной изменчивости максимального стока. Изменения же годового стока для большинства водосборов Беларуси носят статистически незначимый характер. Основными климатическими факторами, определяющими сток весеннего половодья, являются осадки

за зимний и весенний периоды, температура воздуха зимнего периода. С учетом мультимодельного ансамбля из четырех сценариев изменения климата получены прогнозные оценки годового и максимального стока на период до 2035 г.

**Ключевые слова:** расходы речного стока, осадки, температура воздуха, прогнозные оценки, потепление климата, многолетняя изменчивость.

## **THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE ANNUAL AND MAXIMUM RIVER RUNOFF IN BELARUS: ASSESSMENT AND FORECAST**

**A. A. Volchak, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk, N. N. Sheshko**

### **Abstract**

The article evaluates the changes in the parameters of the annual runoff, the maximum spring flood runoff and the main runoff-forming factors for the period 1988-2018 in relation to the period 1949-1987. The observed over the past decades climatic changes significantly change the situation of the spatio-temporal variability of the maximum runoff. Changes in the annual runoff for most catchments of Belarus are statistically insignificant. The main climatic factors determining the spring flood runoff are precipitation during the winter and spring periods, and the air temperature of the winter period. Taking into account the multimodal ensemble of four climate change scenarios, the forecast estimates of the annual and maximum runoff for the period up to 2035 are obtained.

**Keywords:** river flow rates, precipitation, air temperature, forecast estimates, climate warming, long-term variability.

### **Введение**

Рациональное управление водными ресурсами в современных условиях является одной из приоритетных задач в области водных ресурсов не только в Беларуси, но и во всем мире. Надежное водообеспечение населения и отраслей экономики, заблаговременное предупреждение о опасных природных явлениях является необходимым условием устойчивого развития общества. В процессе разработки стратегии управления водными ресурсами, планировании и реализации водохозяйственных мероприятий, решении задач оптимального регулирования речного стока, необходимо, в первую очередь, иметь научно-обоснованные оценки происходящих и ожидаемых в будущем изменений гидрологических характеристик под влиянием непрерывного и возрастающего антропогенного воздействия, и меняющегося климата. Сложность решения этих вопросов на современном этапе развития общества в значительной мере обусловлена особенностями социально-экономических и климатических условий последних трех десятилетий. В последние 30 лет на территории Беларуси, как и во всем мире, наблюдается существенная динамика климатических показателей, которая вызывает ответную реакцию в гидрологических процессах [1–3]. Так как речной сток относится к климатически обусловленным возобновляемым водным ресурсам, изменение режима речного стока влияет не только на возможность его использования в качестве источников водоснабжения, но и на сохранение (или на нарушение) экологического равновесия водных объектов.

Речной сток представляет собой сложный многофакторный процесс. В работах [4, 5] приведен подробный анализ влияния каждого из них. Несмотря на большое множество стокоформирующих факторов, в настоящих условиях именно климатический фактор выходит на передний план. Изучению закономерностей формирования стока рек Беларуси, изменчивости характеристик стока в пространственно-временном аспекте посвящено множество работ [6, 7]. Однако данные исследования не охватывают последние годы наблюдений, когда произошло глобальное изменение климата. Методы теории вероятностей и математической статистики, используемые в выполненных ранее исследованиях по оценке многолетней изменчивости стока и стокообразующих факторов, применимы преимущественно к однородным данным. Происходящие скачкообразные, ступенчатые изменения в рядах характеристик стока делают их неоднородными, или нестационарными, и требуют других подходов к анализу. В условиях нестационарного климата, антропогенной нагрузки на водосборы, неравномерного размещения гидрологических постов и станций, а также уменьшения их количества, оценка многолетней изменчивости стока, установление количественных связей между характеристиками стока и совокупностью определяющих его факторов, оценка изменений стока на перспективу является, несомненно, одной из наиболее актуальных проблем, решаемых современной научной и прикладной гидрологией.

Целью данного исследования является оценка современной трансформации годового стока, максимального стока весеннего половодья рек Беларуси, а также получение прогнозных оценок их изменений при вероятных климатических сценариях будущего.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение ряда задач:

- оценка изменений основных характеристик исследуемых в работе видов стока за период 1949–1987 гг. (базовый период) по отношению к периоду 1988–2018 гг. (современный период);
- анализ изменения основных климатических факторов формирования годового и максимального стока;
- получение прогнозных оценок изменения речного стока до 2035 г.

### **Исходные данные**

Для решения указанных выше задач в исследовании использованы материалы наблюдений Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по действующим гидрологическим постам за период инструментальных наблюдений, опубликованные в материалах государственных кадастров. Для выявления пространственно-временной изменчивости речного стока, температуры воздуха и атмосферных осадков обработаны временные ряды за период с 1949 по 2018 гг. ( $n = 70$  лет). В качестве исходной гидрометеорологической информации использованы данные наблюдений за месячными и годовыми суммами атмосферных осадков, среднемесячными и среднегодовыми температурами атмосферного воздуха на 50 метеостанциях,

среднемесячными расходами речного стока на 84 гидрологических постах, равномерно расположенных по территории Беларуси. Приведение рядов с малой продолжительностью периодов наблюдений по выбранным для исследования гидропостам произведено с помощью компьютерного программного комплекса «Гидролог-2» [8].

### Методы исследования

В основе методологии исследования лежит систематизация и анализ многолетних рядов наблюдений за среднегодовыми расходами и максимальными расходами весеннего половодья рек Беларуси. Анализ многолетней изменчивости характеристик стока изучаемых рек проводился дифференцированно, так как гидрологический режим средних и особенно малых рек не идентичен таковому крупных рек. Малые реки особенно чувствительны к условиям их формирования и служат интегральным индикатором сложных природно-антропогенных процессов, происходящих на их водосборах. Условно реки отнесены к следующим группам:

- реки с площадью водосбора более 30 000 км<sup>2</sup>;
- реки с площадью водосбора от 10 000 км<sup>2</sup> до 30 000 км<sup>2</sup>;
- реки с площадью водосбора от 2 000 км<sup>2</sup> до 10 000 км<sup>2</sup>;
- реки с площадью водосбора до 2 000 км<sup>2</sup>.

В силу того, что одним из основных факторов, определяющих общую величину и внутригодовое распределение стока, является климат, целесообразно изучать весь гидрологический цикл в речном бассейне, включая изменение во времени и пространстве количества атмосферных осадков и температуры воздуха.

### Полученные результаты

#### Наблюдаемые изменения климата

За период 1949–2018 гг. средняя скорость роста температуры на территории Беларуси составила около 0,31°C/10 лет, тогда как в течение периода с 1969 по 2018 гг. она увеличилась до 0,46°C /10 лет.

Для выявления особенностей колебания температуры воздуха в бассейнах крупных рек Беларуси построены разностные интегральные кривые за 1949-2018 гг. по 8 метеостанциям (рисунок 1).

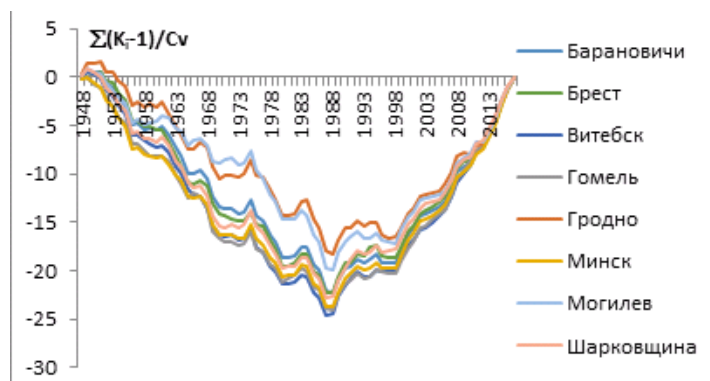


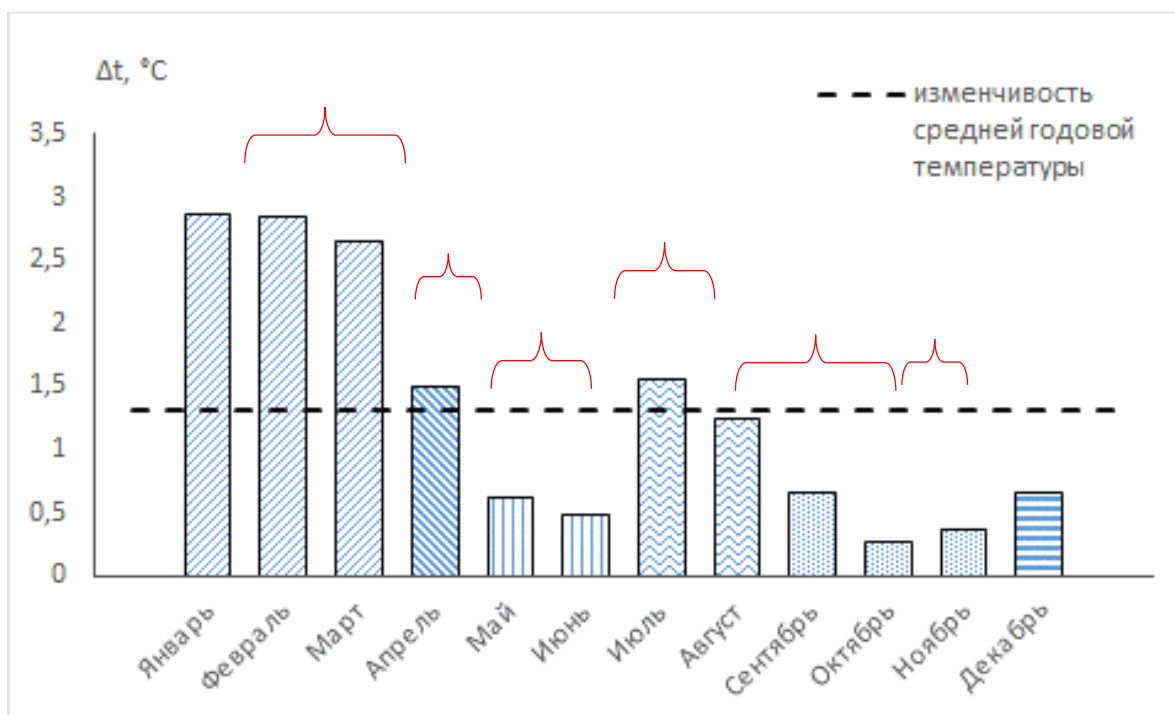
Рисунок 1 – Разностные интегральные кривые среднегодовых температур воздуха по метеостанциям Беларуси

Ординаты разностно-интегральных кривых вычислены как нарастающая сумма  $\sum(K_i - 1)/c_v$ , где  $K_i = Q_i/\bar{Q}$  – модульный коэффициент,  $Q_i$  – среднегодовые температуры воздуха,  $i$  – номер вычисляемого члена последовательности,  $\bar{Q}$  – среднемноголетнее значение температуры воздуха,  $c_v$  – коэффициент вариации.

Построенные разностные интегральные кривые среднегодовой температуры атмосферного воздуха показывают, что расчетный период 1949–2018 гг. включает периоды понижения и повышения температуры, причем с 1988 года находится в положительной фазе – тенденции повышения. Из рисунка 1 видно, что 1988 год соответствует началу интенсивного роста среднегодовых температур воздуха. Для оценки климатических изменений в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации исходный ряд был разбит на два периода продолжительностью 30 лет и более: 1) с 1949 по 1987 гг. и 2) с 1988 по 2018 гг.

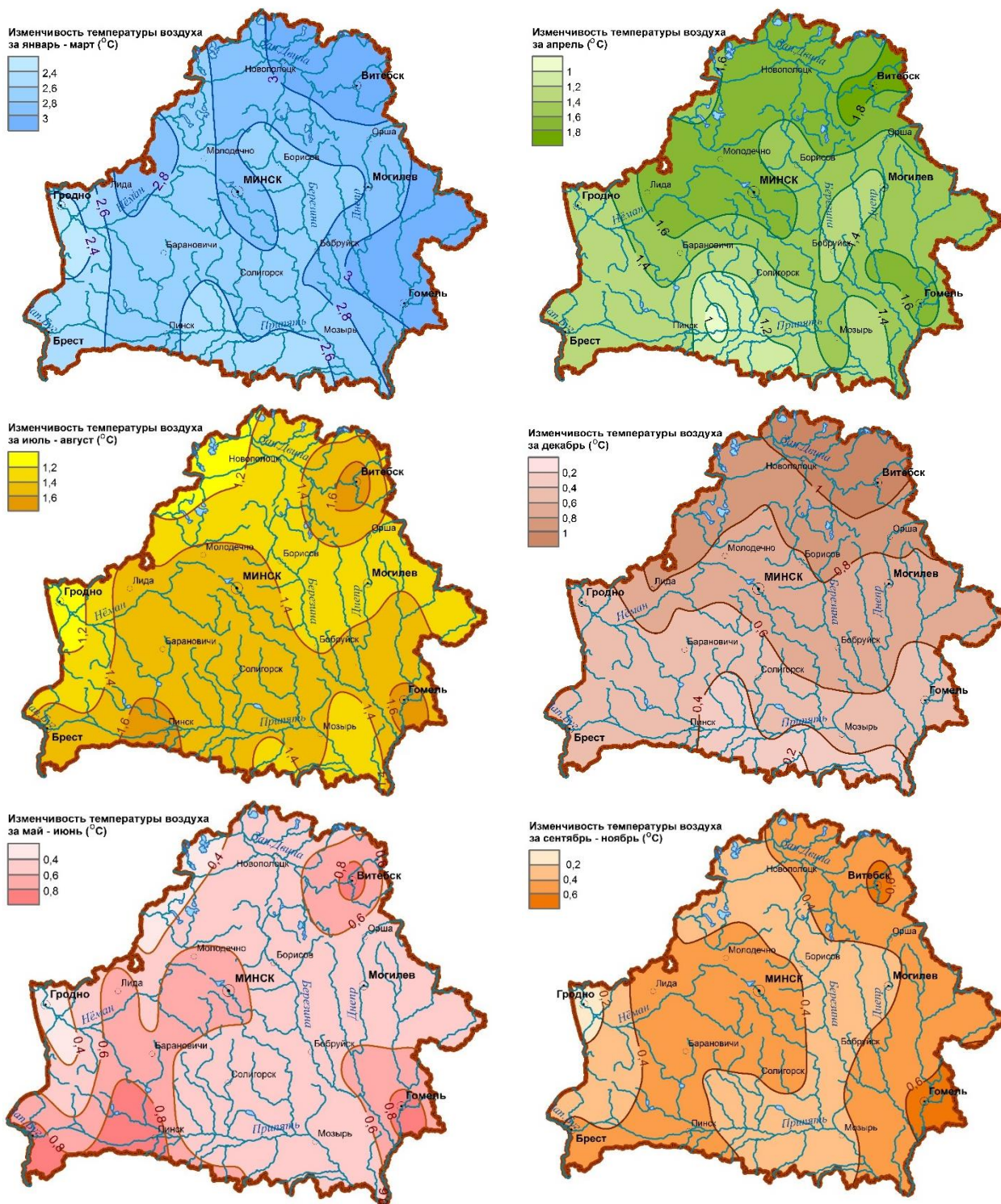
Анализ данных о температуре воздуха за период 1988–2018 гг. по сравнению с периодом 1949–1987 гг. указывает на её рост по всей территории Беларуси. Рост среднегодовой температуры по территории Беларуси за второй исследуемый период составил  $1,31^\circ\text{C}$ .

Так как изменение температуры носит неравномерный характер как внутри года, так и в пространстве, дальнейшее исследование температур атмосферного воздуха выполнено по группам, показанным на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Изменение среднегодовой и среднемесячных температур воздуха по за период 1988–2018 гг. по отношению к периоду 1949–1987 гг., °C**

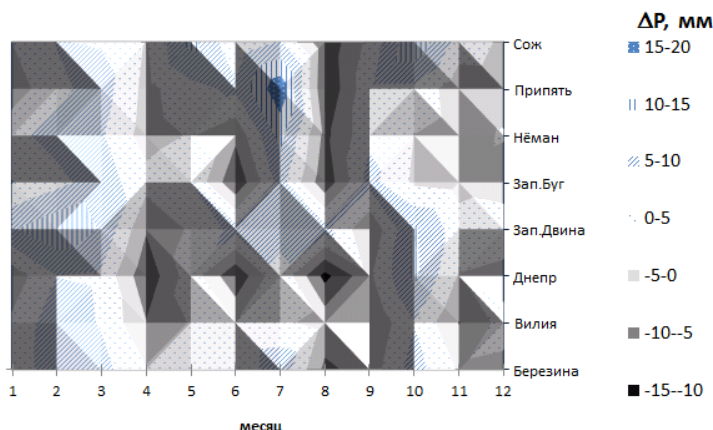
Результаты пространственного обобщения изменений температуры воздуха по выделенным группам представлены в виде карт, подготовленных в ArcGIS (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Изменчивость температур воздуха за период 1988–2018 гг. по отношению к периоду 1949–1987 гг., °C**

В отличие от изменения температуры воздуха, существенного изменения суммарного количества осадков в годовом разрезе не произошло. Стоит отметить, что изменение количества осадков, как и температуры, характеризуется неоднозначностью по бассейнам и месяцам. Наибольшая положительная динамика в изменении осадков ( $\Delta P$ ) наблюдается в феврале, марте, июле. В октябре увеличение осадков наблюдается в бассейнах рек Березина, Днепр, Западная Двина и Сож. Отрицательная тенденция в изменении количества

осадков характерна для апреля и августа (кроме бассейна реки Западная Двина).



**Рисунок 4 – Изменение количества осадков по месяцам для бассейнов рек Беларуси за период 1988–2018 гг. по отношению к периоду 1949–1987 гг.**

*Изменение годового и максимального стока*

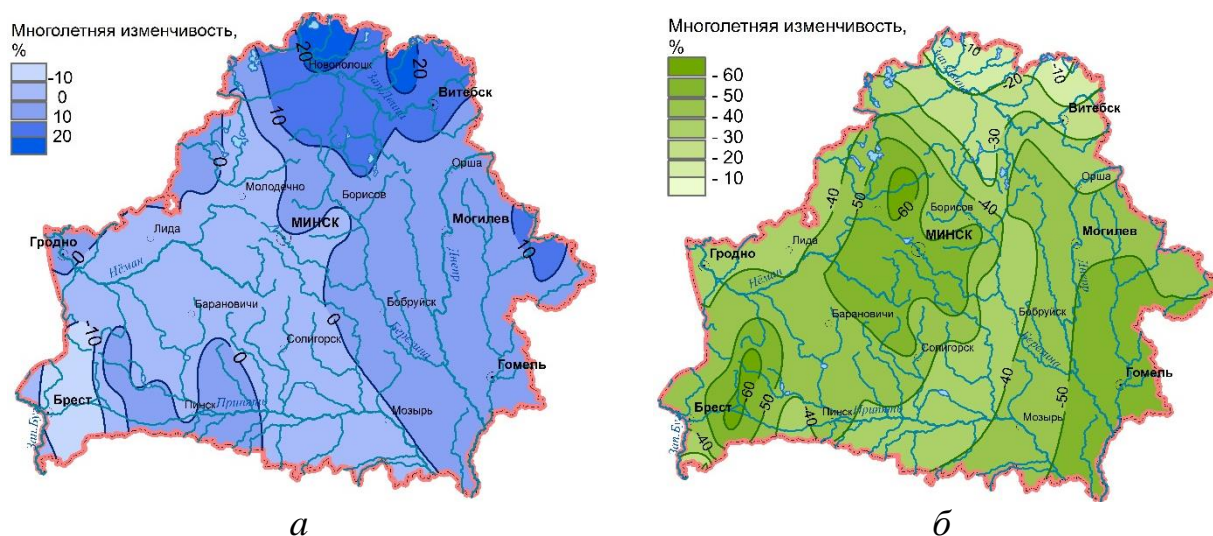
Количественные показатели изменчивости стока за два исследуемых периода приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Изменчивость исследуемых видов стока рек Беларуси за современный период по отношению к базовому периоду, %**

Река-створ	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средние годовые расходы воды	Максимальные расходы воды весеннего половодья
<i>реки с площадью водосбора &gt; 30 000 км<sup>2</sup></i>			
р. Припять – г. Мозырь	101000	11	-33
р. Днепр – г. Речица	58200	6	-42
р. Западная Двина – г. Полоцк	41700	12	-19
р. Сож – г. Гомель	38900	8	-49
р. Неман – г. Гродно	33600	4	-44
<i>реки с площадью водосбора &gt; 10 000 км<sup>2</sup></i>			
р. Березина – г. Бобруйск	20300	-2	-53
р. Днепр – г. Орша	18000	12	-31
р. Сож – г. Славгород	17700	13	-48
р. Неман – с. Белица	16700	-8	-53
р. Виляя – с. Михалишки	10300	-6	-57
<i>реки с площадью водосбора &gt; 2 000 км<sup>2</sup></i>			
р. Мухавец – г. Брест	6590	-18	-64
р. Березина – г. Борисов	5690	2	-42
р. Ясельда – д. Сенин	5110	-4	-49
р. Дисна – г. п. Шарковщина	4720	-2	-38
р. Неман – г. Столбцы	3070	-8	-59
<i>реки с площадью водосбора ≤ 2 000 км<sup>2</sup></i>			
р. Виляя – с. Стешицы	1230	4	-52
р. Цна – с. Дятловичи	1100	1	-4
р. Ясельда – г. Береза	1040	6	-67
р. Уза – с. Прибор	760	9	-55
р. Полота – с. Янково	618	15	-18

Как показал анализ изменения стока на исследуемых гидропостях наибольшее изменение среднегодового стока произошло для крупных рек (в среднем по Беларуси составляет 6%), а изменение максимального стока наиболее выражено для мелких и средних рек (снижение стока в среднем на 43%). Для крупных рек снижение максимального стока достигает 37%. Результаты пространственного обобщения изменений среднего годового стока и максимального стока весеннего половодья представлены на рисунке 5. Анализ полученных карт позволяет сделать вывод, что увеличение годового стока произошло для бассейнов рек Западной Двины и Днепра. Для остальной части Беларуси в основном характерно незначительное снижение годового стока.

Рассмотренные выше климатические изменения оказывают непосредственное влияние на водный режим рек Беларуси. Для оценки зависимости между величинами стока, температурами воздуха и осадками определены коэффициенты корреляции в рамках корреляционных матриц между этими величинами. Анализ тесноты связи расходов речного стока с метеопараметрами показал, что основными климатическими факторами, определяющими сток весеннего половодья, являются осадки за зимний и весенний периоды и температура воздуха за январь–март и август. Коэффициенты корреляции среднегодовых расходов с суммарным количеством осадков за январь–сентябрь для большинства рядов стока статистически значим и достигает наибольших значений.



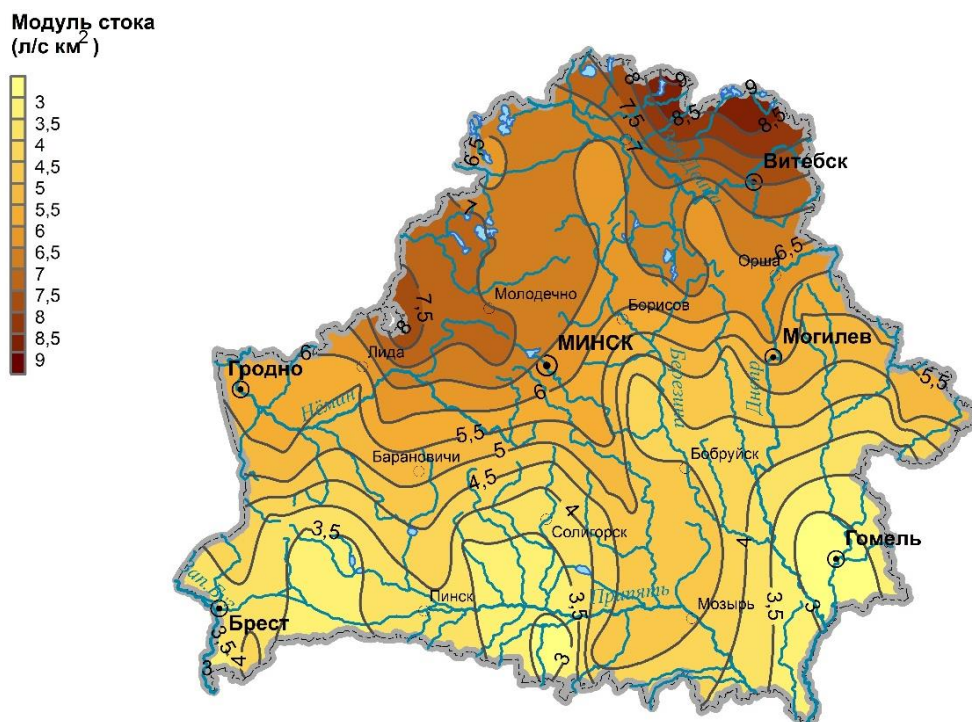
**Рисунок 5 – Изменение стока (%) за период 1988–2018 гг. по отношению к периоду 1949–1987 гг.: а – среднегодовой сток, б – максимальный сток весеннего половодья**

### *Оценки возможных изменений стока рек Беларуси в XXI веке на основе моделей климата*

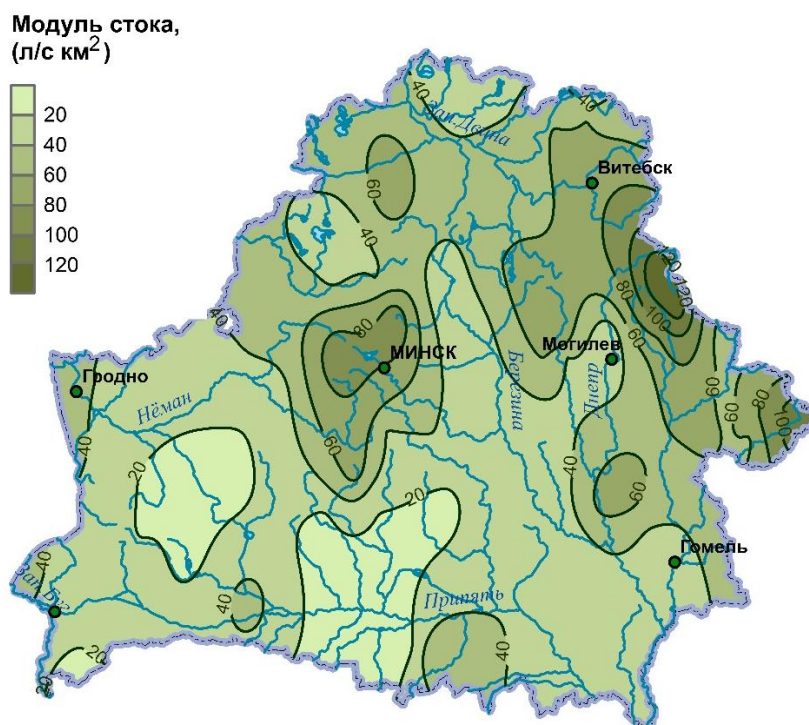
Для получения прогнозных оценок изменения стока рек Беларуси на период до 2035 г. адаптирован метод гидролого-климатических расчетов, предложенный В. С. Мезенцевым, основанный на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов [10]. Разработанная модель использована для оценки возможных изменений водных ресурсов рек в зависимости от климатических колебаний и антропогенных воздействий на характеристики водосборов. Обобщенные прогнозные оценки изменения стока получены с учетом



комбинации сценариев А1В и В1 изменения климата, а также уточнения с использованием мультимодельного ансамбля из четырех сценариев СМIP5, предложенного Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2013 году в Пятом докладе по изменению климата [11]. Карты прогнозных оценок стока рек Беларуси на период до 2035 года приведены на рисунке 6.



а



б

**Рисунок 6 – Прогнозные оценки изменения стока рек Беларуси до 2035 года:  
а – среднегодовой сток, б – максимальный сток весеннего половодья**

## Заключение

Из результатов оценок тенденций изменения климатических характеристик следует, что за период 1988–2018 гг. в среднем на 1,3°C произошло повышение температуры воздуха на территории Беларуси. При этом отмечается существенная неравномерность внутригодового распределения повышения температуры воздуха с максимальным повышением в зимний период (до 3,2°C в бассейне р. Западная Двина и до 2,4 °C на юго-западе Беларуси), с минимальным повышением в осенний период (до 0,8°C). В отличие от изменения температуры воздуха существенного изменения суммарного количества осадков в годовом разрезе не произошло.

В результате выполненных исследований по динамике стока установлено, что максимальный сток весеннего половодья рек Беларуси за 1988–2018 гг. уменьшился по сравнению со стоком базового периода (1949–1987 гг.) в среднем на 41%, а среднегодовой сток увеличился в среднем на 3,5%.

По результатам полученных прогнозных оценок можно сделать следующие выводы о изменении стока рек Беларуси до 2035 года:

- среднемноголетнее значение годового стока рек Беларуси в целом изменится от -10% (в бассейне Припяти) до 10 % (в бассейне Западной Двины);
- для среднемноголетних значений максимального стока рек Беларуси характерно снижение до 5 % для бассейнов Днепра и Припяти, увеличение на 5 % в бассейнах Западной Двины и Немана.

*Работа выполнена в рамках задания 1.04 НИР «Оценка гидролого-климатических режимов территории Беларуси в современных условиях» (подпрограммы «10.1 Природные ресурсы и их рациональное использование» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021-2025 годы).*

### Список использованных источников

1. Логинов, В. Ф. Современные изменения климата Беларуси / В. Ф. Логинов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 51–74.
2. Лысенко, С. А. Пространственно-временные изменения начальной фазы современного потепления климата / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 618–627.
3. Георгиевский, В. Ю. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР / В. Ю. Георгиевский // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 11. – С. 89–99.
4. Комлев, А. М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока / А. М. Комлев. – Пермь : Изд-во ПГУ, 2002. – 162 с.
5. Волчек, А.А. Закономерности формирования элементов водного баланса речных водосборов Беларуси в современных условиях: автореф. дис. докт. геогр. наук: 25.00.27 / А.А. Волчек; Институт географии РАН. – М., 2006. – 38 с.
6. Волчек, А. А. Изменения стока рек Беларуси в условиях современного потепления / А. А. Волчек, О. П. Мешик // Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель : сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию мелиоративного образования в Горках, 14–15 марта 2019 г. / под ред. В. И. Желязко. – Горки : РПЦ «Печатник», 2019. – С. 14–18.
7. Бусько, Е. Г. Особенности трансформации стока рек Беларуси / Е. Г. Бусько, А. А. Волчек // Актуальные проблемы экологии : сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции, Гродно, 4–6 окт. 2017 г. / Гродн. гос.

ун-т ; ред. кол. : В. Н. Бурдь (отв. ред.), Г. Г. Юхневич, И. М. Колесник, О. М. Третьякова. – Гродно : ЮрСаПринт, 2017. – С. 173–178.

8. Волчек, А. А. Автоматизация гидрологических расчетов / А. А. Волчек // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды: Труды междунар. науч.-практ. конф. по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений / Брест. политехн. институт. – Биберах–Брест–Ноттингем, 1998. – С. 55–59.

9. Кузьменко, Я. В. Оценка и прогнозирование стока малых рек в условиях антропогенных воздействий и изменений климата / Я. В. Кузьменко, Ф. Н. Лисецкий, В. И. Пичура // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – Выпуск № 6. – С. 1–9.

10. Мезенцев, В.С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования / В.С. Мезенцев // Водные ресурсы, 1995. – Том 22, №3. – С. 299 – 301.

11. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата/ А. А. Волчек, В. Н. Корнеев, С. И. Парфомук, И. А. Булак // под общ. ред. А. А. Волчек, В. Н. Корнеева. — Брест : Издательство «Альтернатива», 2017. – 225 с.

УДК 502.63

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЧНЫХ ВОД

*А. А. Волчек<sup>1</sup>, М. А. Таратенкова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Доктор географических наук, профессор, профессор кафедры природообустройства факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : volchak@tut.by

<sup>2</sup> Старший преподаватель кафедры водоснабжение, водоотведение и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : taratenkava@mail.ru

### Реферат

Данная статья содержит сведения вероятностный прогноз гидрохимического режима речных вод на примере реки Мухавец. Анализ проведенных данные позволил получить закон распределения гидрохимических параметров и рассчитать 5 % и 95 % обеспеченные величины по таким показателям, как растворенный кислород, БПК<sub>5</sub>, взвешенные вещества, общая минерализация, удельная электропроводность, ХПК, рН, магний-ион, гидрокарбонат-ион, кальций-ион, сульфат-ион, хлорид-ион. Проведенные исследования также позволили выявить изменение законностей между макро-ионами и общей минерализацией по сравнению с фоновыми значениями. Выявленные закономерности распределения обеспеченности гидрохимических показателей позволяет проектировать водоочистные сооружения с необходимой степенью надежности и экономической обоснованности, а также дает возможность прогнозирования динамики гидрохимических параметров речных вод.

**Ключевые слова:** гидрохимический режим, обеспеченность, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии.