

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

И. С. ДАНИЛОВИЧ^{1), 2)}, И. В. ТАРАСЕВИЧ^{2), 3)}

¹⁾Институт природопользования НАН Беларуси, ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Белгидромет, пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены оценка современных изменений водного режима рек Беларуси и возможные факторы его трансформации. Показаны продолжающиеся тенденции к увеличению зимнего меженного стока рек, высоты зимних паводков и одновременному уменьшению стока рек весной со снижением частоты наводнений в период весеннего половодья. Данные устойчивые тенденции изменения режима рек в зимне-весенний сезон связаны с усилением западного переноса в Атлантико-Европейском секторе с середины 1960-х гг., обусловившим установление мягких зим, уменьшение высоты снежного покрова и увеличение количества жидких осадков. Современные тенденции изменения режима рек в теплый период года связаны с усилением меридиональной циркуляции с середины 1990-х гг., повышением засушливости и одновременным ростом повторяемости ливневых осадков и, как следствие, увеличением минимальных расходов воды летне-осенней межени и высоты дождевых паводков в восточной половине страны. На всей территории Беларуси, но особенно в западной части республики отмечается рост повторяемости сильных гидрологических засух в связи с существенным недобором осадков в последние десятилетия.

Ключевые слова: межень; половодье; дождевой паводок; осадки; засуха; изменение климата.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № X23РНФ-122 и X24КИ-076).

Образец цитирования:

Данилович ИС, Тарасевич ИВ. Трансформация пространственно-временных закономерностей водного режима рек Беларуси в условиях изменяющегося климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2025;1:99–107.
EDN: HARZV

For citation:

Danilovich IS, Tarasevich IV. Transformation of spatio-temporal pattern of river regime in Belarus according to climate changes. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2025;1:99–107. Russian.
EDN: HARZV

Авторы:

Ирина Сергеевна Данилович – кандидат географических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории климатических исследований¹⁾, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики²⁾.

Ирина Владимировна Тарасевич – старший преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики³⁾, ведущий инженер-гидролог³⁾.

Authors:

Irina S. Danilovich, PhD (geography), docent; leading researcher at the laboratory of climate research^a and associate professor at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^b.
irina-danilovich@yandex.ru

Irina V. Tarasevich, senior lecturer at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^b, and leading hydrological engineer^c.
ira5582831@yandex.ru

TRANSFORMATION OF SPATIO-TEMPORAL PATTERN OF RIVER REGIME IN BELARUS ACCORDING TO CLIMATE CHANGES

I. S. DANILOVICH^{a, b}, I. V. TARASEVICH^{b, c}

^a*Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 F. Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus*

^b*Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

^c*Belhydromet, 110 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus*

Corresponding author: I. V. Tarasevich (ira5582831@yandex.ru)

Abstract. The paper presents an assessment of current changes in the water regime of rivers in Belarus and possible factors of its transformation. There were established the continuing trends towards an increase in winter low-water river flow, the height of winter floods and a simultaneous decrease in spring streamflow with a decrease in the frequency of floods during the spring flood. These stable trends in the change of river regime in the winter – spring season are associated with an increase in westerly across the Atlantic-European sector since the mid 1960s, which led to mild winters, a decrease in snow cover depth, and an increase in the liquid precipitation amount. Current trends in the change of river regime in the warm season are associated with increased meridional circulation since the mid 1990s, increased aridity and a simultaneous increase in the frequency of heavy rainfall, and, as a consequence, an increase in the minimum flow during the summer – autumn low-water period and the height of rain floods in the eastern half of the country. There has been an increase in the frequency of severe hydrological droughts throughout Belarus, but especially in the western part of the republic due to a significant precipitation deficit in recent decades.

Keywords: low-flow period; snow-melting flood; rain flood; precipitation; drought; climate change.

Acknowledgements. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grants No. X23RNF-122 and X24KI-076).

Введение

Исследование водного баланса речных водосборов на глобальном уровне показывает, что в 1985–2014 гг. более половины основных бассейнов мира демонстрировали тенденции к значительному снижению годового стока со скоростью 0,15–0,30 % в год [1]. Данное явление связано с неравномерностью выпадения осадков и ростом повторяемости погодных аномалий, таких как сильные ливни и атмосферные засухи. Для водосборов Восточно-Европейской равнины наблюдаются разнонаправленные тенденции динамики водных ресурсов. Так, для речных бассейнов на территории Беларуси, а также в верховье бассейна р. Дон, граничащего с бассейном р. Днепр, изменения годового стока варьируют в пределах ± 10 % и являются статистически незначимыми, но далее на юго-восток отмечается снижение годового стока, которое в устье р. Дон достигает 25 %. В то же время на реках в северо-западной части Восточно-Европейской равнины наблюдается выраженное увеличение годового стока на 20–50 % [2]. Снижение годового стока характерно также для рек на севере Украины [3], поскольку последние годы в стране были засушливыми [4]. Для большинства рек Польши годовое стока в 1988–2020 гг. уменьшился на 15–20 % [5]. В странах Балтии преимущественно прослеживаются тенденции к увеличению годового стока [6], но на водосборах южной части бассейна Балтийского моря отмечается его устойчивое снижение [7; 8].

Наиболее значительные изменения речного стока в Восточной Европе происходят в зимний и весенний сезоны. В европейской части России (Ленинградская область и Южная Карелия) преобладает положительная динамика годовых максимальных расходов воды (Q_{\max}) [2]. На западе России в 1950–2019 гг. отмечено снижение Q_{\max} на 10–20 %, на некоторых водосборах – на 20–50 % [2].

В равнинных частях речных бассейнов Украины максимальный сток характеризовался постепенным увеличением с 1947 по 1980 г. [9]. В дальнейшем почти на половине водосборов наблюдалось постоянное снижение годовых максимумов стока, что можно объяснить повышением зимних температур воздуха и частыми оттепелями. Однако при этом указанные факторы привели к увеличению расходов воды в период зимней межени [3]. Аналогичные тенденции были отмечены в бассейне р. Десны на севере Украины вблизи границы с Беларусью [10].

Снижение доли весеннего стока на 10–25 % выявлено на водосборах с наиболее суровыми климатическими условиями на северо-востоке Польши [5]. Тенденции изменения годовых максимальных расходов воды крупнейших рек стран Балтии (Даугава, Лиелупе, Вента, Гауя и Салаца) указывают на их статистически значимое снижение [8].

В период летне-осенней межени расходы воды на водосборах европейской части России в 1978–2010 гг. увеличились на 30–50 % по сравнению с таковыми в 1946–1977 гг. [11]. Однако увеличение минимального стока оказалось менее существенным (15 %) вплоть до его снижения в среднем течении р. Дон. В Украине речной сток в период летне-осенней межени в 2015, 2016 и 2020 гг. был очень низким [4]. На всей территории Польши в 1988–2020 гг. летний сток сократился на 15–20 %, а осенний – на 10–15 % [5].

Исследования режима рек в Литве не выявили четких тенденций к увеличению засушливости и экстремальных засух до 2000 г. [12]. С 1980-х гг. в период с апреля по август наблюдается повышенная засушливость в бассейне р. Неман из-за значительного снижения количества осадков и роста испарения с поверхности водосбора [13]. Кроме того, в странах Балтии в летние месяцы происходит уменьшение речного стока и усиление засушливости [14–16].

Учитывая разнонаправленный характер динамики различных видов стока на территории Восточно-Европейской равнины, цель данного исследования заключается в выявлении региональных тенденций изменения водного режима рек Беларуси в разные фазы гидрологического цикла и установлении его возможных причин.

Материалы и методы исследования

Для исследования гидрологического режима рек использованы данные государственного водного кадастра¹, включающие средние месячные и характерные расходы воды (наибольшие расходы воды весеннего половодья и паводков холодного и теплого периодов, наименьшие расходы воды зимней и летне-осенней межени) по 40 гидропостам сети наблюдений Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет).

Расходы воды обобщены с 1945 по 2020 г., оценка динамики водных ресурсов страны выполнена с 1900 по 2020 г. Отдельно выделяется период изменения климата Беларуси, за начало которого принимается 1989 г. [17], но изменения в режиме рек прослеживаются с 1970-х гг. [18], поэтому далее упоминается период, охватывающий последние 30–50 лет.

В ходе исследования для анализа пространственно-временного распределения величин стока оценивались средние значения и проводилась выборка экстремальных значений характерных расходов воды в разные фазы гидрологического цикла. Для изучения динамики различных видов речного стока рассчитывались величины трендов по методу наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратов разностей между значениями функции и соответствующими значениями данных. Статистическая значимость полученных величин трендов оценивалась по *t*-критерию Стьюдента.

Для картирования характеристик стока рек с разной площадью водосбора расходы воды пересчитывались в модули стока (т. е. расход воды с единицы площади) по формуле

$$M = 1000 \frac{q}{F},$$

где *M* – модуль стока, л/(с · км²); *q* – расходы воды, м³/с; *F* – площадь водосбора реки, км².

Карты построены в программе *ArcView* (версия 10.3) с использованием метода интерполяции *spline*.

Результаты и их обсуждение

Водные ресурсы, формирующиеся на территории Беларуси, находятся в сильной зависимости от количества выпадающих на речные водосборы осадков. Коэффициент корреляции между годовыми суммами осадков и годовыми запасами водных ресурсов составляет 0,7. Динамика выпадения осадков в последние десятилетия характеризуется малыми изменениями в сторону повышения (в пределах 5–7 %). Погодичные отклонения годовых сумм осадков в 1945–2010 гг. на территории Беларуси в большинстве лет были положительными, однако начиная с 2010 г. более часто отмечается недобор осадков (рис. 1). Годовые запасы водных ресурсов страны за рассматриваемый период оцениваются в 56 км³ и характеризуются чередованием периодов повышенной и пониженной водности. Наибольший объем водных ресурсов с 1945 по 2020 г. зафиксирован в 1998 г. Он был равен 88,88 км³ (второй по величине максимум с 1900 г.), что составило 154 % от многолетнего среднего значения. Минимальный объем водных ресурсов зарегистрирован в 2015 г. (51 % от нормы). Несмотря на небольшие изменения годового количества осадков, лишь с 2010 г. отмечается значительное сокращение водных ресурсов (до 40 % в отдельные годы).

¹Государственный водный кадастр [Электронный ресурс] : материалы наблюдений гос. сети гидрометеорол. наблюдений Респ. Беларусь : рег. свидетельство № 0870100022 / Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактив. загрязнения и мониторингу окружающей среды. Минск, 2020. Доступ из локальной сети.

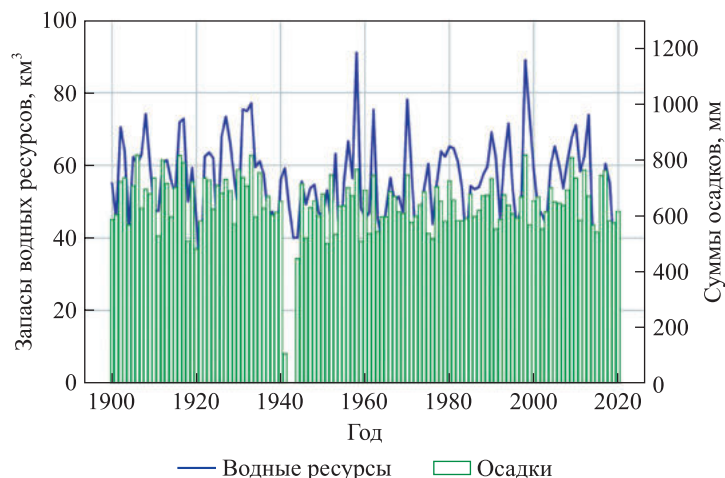


Рис. 1. Динамика годовых сумм осадков и запасов водных ресурсов на территории Беларуси в 1900–2020 гг.

Fig. 1. Dynamics of annual precipitation and water resources in Belarus in 1900–2020

Зимняя межень. Климатические изменения в холодный период года характеризуются устойчивыми положительными трендами температуры воздуха. Рост температуры воздуха, особенно в зимний период, на территории Беларуси превышает 2°C [19]. Увеличение температуры воздуха обусловило смещение сроков наступления фаз гидрологического цикла, повышение зимнего меженного стока и одновременно снижение стока в период весеннего половодья.

С 1990-х гг. начало зимней межени сдвинулось на 5–13 дней позже, в результате чего ее продолжительность во всех бассейнах сократилась в среднем на 14–26 дней, колеблясь от 89–99 дней на южных реках до 113–123 дней на северных реках.

Пространственное распределение величин минимального стока зимней межени соответствует распределению годового стока: наибольшие значения минимальных расходов воды в зимний сезон отмечаются на севере страны. Здесь они составляют около $4 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, постепенно снижаясь к югу до $2 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (рис. 2, а). Изменения зимнего меженного стока в последние десятилетия сохраняют тенденцию к увеличению с наибольшим ростом (на 13–18 и 30 % соответственно) на севере Беларуси в бассейне р. Западной Двины и северо-востоке страны в бассейне р. Днепр (верховье бассейна р. Сож). Наименьшее увеличение зимнего меженного стока (в пределах 7–9 %) зафиксировано на юге республики в бассейне р. Припяти (рис. 2, б). Такое распределение связано с более высокими показателями осадков в зимний период на севере страны, а также с сокращением продолжительности выпадения осадков в твердом виде и увеличением количества жидких осадков.

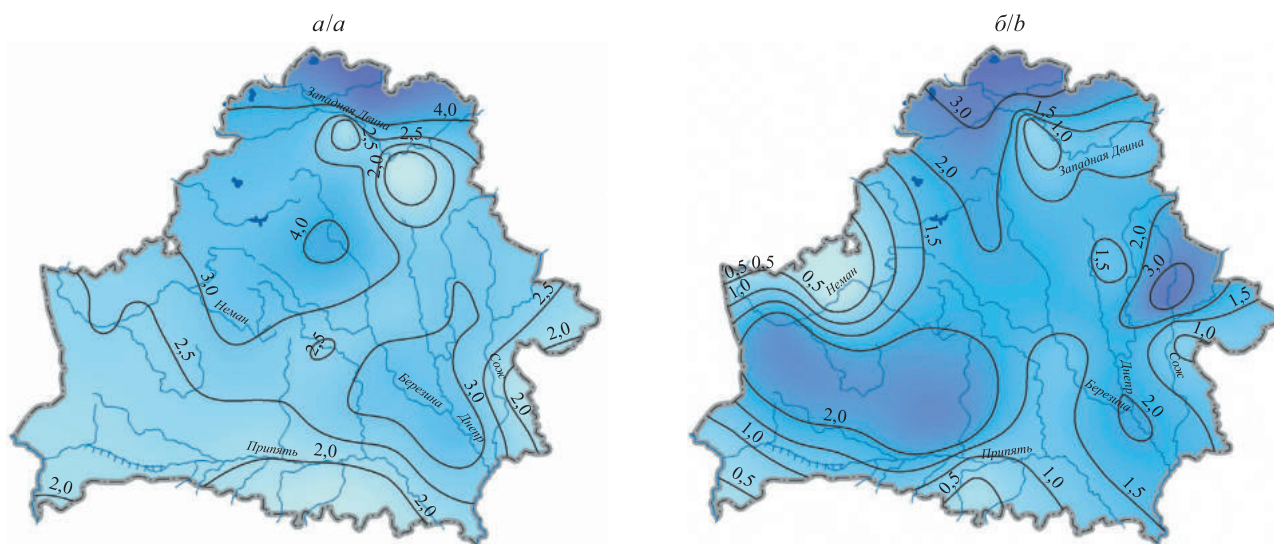


Рис. 2. Распределение наименьших расходов воды зимнего периода (а) и пространственное распределение трендов минимальных расходов воды зимнего периода с 1945 по 2020 г. (б), $\text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$

Fig. 2. Distribution of the minimal discharge in winter (a) and spatial distribution of minimal discharge trends in winter since 1945 to 2020 (b), $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$

Увеличение зимнего стока на территории Беларуси [20; 21] синхронизировано с его изменениями в южной части бассейна Балтийского моря [6; 22; 23], что обусловлено повышением температуры воздуха, увеличением частоты оттепелей, более ранними сроками начала интенсивного таяния снега и весеннего половодья.

Зимние паводки. Предыдущее исследование зимних паводков [24] показало увеличение паводочных расходов воды в 1988–2010 гг. по сравнению с таковыми в 1966–1987 гг. на большинстве рек Беларуси (от 10–20 % в бассейне р. Припяти до 20–40 % в бассейне р. Западной Двины). В бассейне р. Западный Буг отмечено снижение величины зимних паводков на 20–40 %.

Представленные расчеты свидетельствуют о продолжающемся росте повторяемости зимних паводков преимущественно в восточной половине страны в верховьях бассейнов рек Западная Двина, Днепр и на левобережье бассейна р. Припяти. В этих бассейнах в центральной части Беларуси наибольшие зимние расходы воды увеличились на 1–6 л/(с · км²), или 5–20 %. На юго-востоке республики их рост составил до 30–40 %.

В западной и южной частях страны наблюдается уменьшение высоты зимних паводков на 1–10 л/(с · км²). В бассейнах рек Неман, Вилия, Западный Буг и низовье бассейна р. Западной Двины снижение пиков паводков достигает 15–30 %, тогда как на правобережье бассейна р. Припяти оно превышает 40 %. Данные изменения связаны с более сильным повышением температуры воздуха на западе и юге Беларуси и, как следствие, низким снегонакоплением на водосборах. Например, в бассейнах указанных рек запасы воды в снеге в 1945–1990 гг. колебались в пределах 50–70 мм. С 1990-х гг. преобладающие запасы воды в снеге находились на уровне 40–50 мм, а высота снежного покрова зимой уменьшилась на 10–15 см.

Зимние паводки отмечались в отдельные годы только в бассейне р. Припяти и на ее притоках. Катастрофические наводнения (повторяемость 1 раз в 55–100 лет) при прохождении зимних паводков наблюдались в 1974–1975, 1980–1981 и 1998–1999 гг.; большие наводнения (повторяемость 1 раз в 10–50 лет) были зафиксированы в 1947–1948, 1974–1975, 1981–1982, 1988–1989, 1990–1991, 1992–1993, 1993–1994, 1997–1998, 1998–1999, 1999–2000, 2002–2003, 2008–2009, 2009–2010, 2010–2011 и 2012–2013 гг. [18; 21]. Наибольшее количество зимних паводков пришлось на 1990–2020 гг. Однако начиная с 2000 г. продолжается рост расходов воды в период зимней межени без резких паводков.

Весеннее половодье. Анализ опасных гидрологических явлений на реках Беларуси, зафиксированных с 1880 по 2000 г.², показывает, что наибольшее количество наводнений, вызванных весенними половодьями, произошло в 1951, 1953, 1956, 1958, 1962–1968, 1970, 1979, 1994, 1996 и 1999 гг. (впоследствии в 2004 и 2010 гг.). Высокие половодья наиболее часто наблюдались в период с 1950 по 1970 г., а с 1970-х гг. отмечается снижение их повторяемости, что связано с усилением западного переноса с 1960-х гг. [25], преобладанием оттепельного характера погоды и, как следствие, малыми запасами воды в снеге перед началом половодья. Для сравнения: на реках Украины повышенный сток наблюдался в 1931–1933, 1958, 1970, 1980 и 1998 гг. Наибольшие расходы воды весеннего половодья на равнинных реках этой страны были зафиксированы в 1932, 1970 и 1979 гг. [4]. В бассейне р. Десны на севере Украины отмечено снижение частоты весенних паводков [10]. Аналогичные тенденции наблюдались в Польше [26].

Динамика опасных явлений на реках связана с трансформацией внутригодового распределения стока, которое существенно изменилось за последние десятилетия [21; 27–30]. Объем весеннего стока снижается из-за раннего расходования запасов воды в снеге перед началом снеготаяния и половодья, что, в свою очередь, обусловлено преобладанием с середины 1960-х гг. зональных процессов в атмосфере с мягкими и влажными зимами и повышенной повторяемостью штормов в Центральной и Северной Европе [25].

На рис. 3 показаны распределение наибольших расходов воды весеннего половодья (см. рис. 3, а) и пространственное распределение трендов максимальных расходов воды весеннего половодья с 1945 по 2020 г. (см. рис. 3, б).

Тенденция к снижению максимального стока была устойчива на протяжении последних 30–50 лет. В 1989–2005 гг. оно достигало 20 % в бассейне р. Западной Двины и 50–60 % в бассейнах рек Неман, Днепр и Припять. В этот период начало половодья сместилось на 11–22 дня раньше [21].

Наибольшие изменения максимального стока рек характерны для северо-запада Беларуси [30]. Так, в бассейне р. Западной Двины снижение стока составило от 15 до 18 л/(с · км²). В бассейне р. Вилии в 1989–2009 гг. сток уменьшился на 50–80 % по сравнению с таковым в 1951–1987 гг., что объясняется его частичным перебросом в бассейн р. Свислочи [27].

² Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси : справочник / Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», Респ. гидрометеорол. центр ; [под общ. ред. М. А. Гольберга]. Минск : Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», 2002. 131 с.

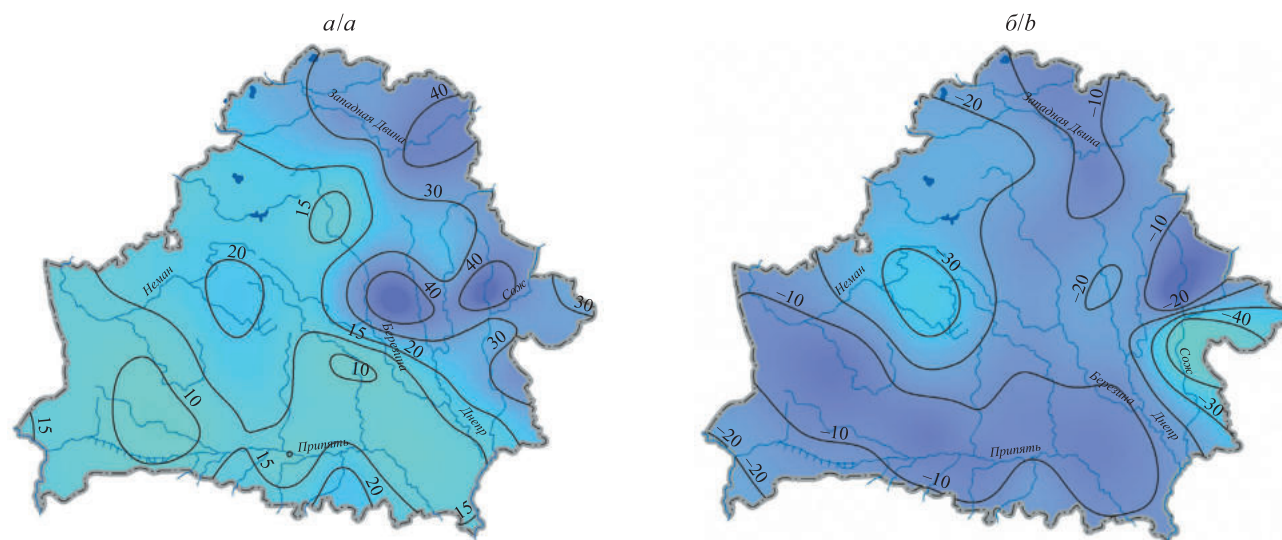


Рис. 3. Распределение наибольших расходов воды весеннего половодья (а) и пространственное распределение трендов максимальных расходов воды весеннего половодья с 1945 по 2020 г. (б), $\text{м}^3/\text{с}$

Fig. 3. Distribution of the maximal discharge during spring floods (a) and spatial distribution of maximum discharge trends during spring floods since 1945 to 2020 (b), m^3/s

Наименьшее снижение весеннего стока характерно для южной и центральной частей страны, главным образом для бассейна р. Припяти, где изменения составили от 4 до 18 л/(с · км²), или от 0 до 10 % [30], что связано с более интенсивными мелиоративными работами на водосборе, особенно в его верхней части [27]. В то же время в 1986–2015 гг. отмечался рост весеннего стока на юго-востоке республики на 15–40 % и его снижение на юго-западе страны на 6–30 % по сравнению с величинами стока в 1961–1985 гг. [28].

С учетом наблюдений последних лет установлено продолжающееся снижение максимальных расходов воды во всех речных бассейнах в 1989–2020 гг. [31]. Наибольшие изменения обнаружены в водосборах малых рек (от 5–6 до 1–3 л/(с · км²)) из-за их большей чувствительности к климатическим аномалиям, таким как экстремальные осадки или засухи (см. рис. 3, а).

Однако, несмотря на устойчивую тенденцию к снижению максимального стока и уменьшению повторяемости наводнений, в южной части страны в бассейне р. Припяти было отмечено несколько высоких половодий. Для этого бассейна характерно наименьшее снижение весеннего стока за последние 30–50 лет. Высокая повторяемость гидрологических экстремумов в данном бассейне объясняется равнинным рельефом и большими площадями заболоченных территорий. В последние десятилетия высокие половодья в бассейне р. Припяти были зафиксированы в 1979 и 1999 гг. Небольшие по высоте половодья зарегистрированы в 2005, 2006, 2010, 2013, 2018 и 2019 гг., при этом небольшие наводнения отмечаются практически каждый год.

Летне-осенняя межень. Речной сток в период летне-осенней межени на реках Беларуси в большей степени зависит от осадков и в меньшей степени – от температуры воздуха.

С устойчивым повышением температуры воздуха в последние десятилетия связано смещение начала летне-осенней межени на 7–22 дня раньше, в результате чего ее продолжительность увеличилась в среднем на 12–29 дней. Аналогичные тенденции характерны и для центральной части Польши, где максимальная продолжительность меженного периода возросла до 171 дня [32].

Режим увлажнения в теплый период года характеризуется ростом количества осадков в северо-восточной части Беларуси и его снижением на западе страны, а также усилением экстремальности климата, что выражается в увеличении повторяемости и продолжительности засушливых периодов и одновременном росте повторяемости ливневых осадков. В период изменения климата происходит сокращение продолжительности выпадения осадков в летний сезон на 15–20 % на большинстве метеостанций республики и увеличение количества дней с низкой относительной влажностью на 1–4 дня за 10 лет [19]. При этом наблюдается увеличение суточных максимумов осадков на 20–30 %, особенно на юге страны [33]. Но, несмотря на регулярный дефицит осадков и увеличение их интенсивности, как отмечено выше, годовое количество осадков с 1990-х гг. существенно не изменилось.

Чередование периодов с атмосферными засухами и ливнями с середины 1990-х гг. может быть обусловлено перестройкой атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе, сменой фазы североатлантического колебания с положительной на отрицательную и усилением меридиональных процессов в атмосфере [34–36].

В связи с пространственной неоднородностью выпадения осадков изменения в режиме рек в период летне-осенней межени характеризуются различными тенденциями в разных речных бассейнах. Колебания летне-осеннего стока неустойчивы во времени в отличие от стабильного повышения зимнего стока и снижения весеннего стока в период потепления климата.

Вследствие разнонаправленных краткосрочных колебаний летне-осеннего стока его доля во внутригодовом распределении стока существенно не изменилась (от увеличения на 1–4 % в бассейне р. Днепр до снижения на 1–2 % в бассейне р. Неман) из-за значительного недобора осадков на западе страны в последние десятилетия [33].

Несмотря на малые изменения во внутригодовом распределении стока, в бассейнах рек Западная Двина, Днепр и Припять отмечается рост минимальных расходов воды в период открытого русла (рис. 4). В бассейнах рек Западная Двина и Днепр наблюдается увеличение максимумов дождевых паводков, вызванных обильными ливнями в теплое время года. В бассейне р. Припяти существенных изменений паводков как в основной реке, так и в ее притоках не произошло. Частота паводков в бассейне р. Неман снизилась из-за значительного дефицита осадков в последние десятилетия.

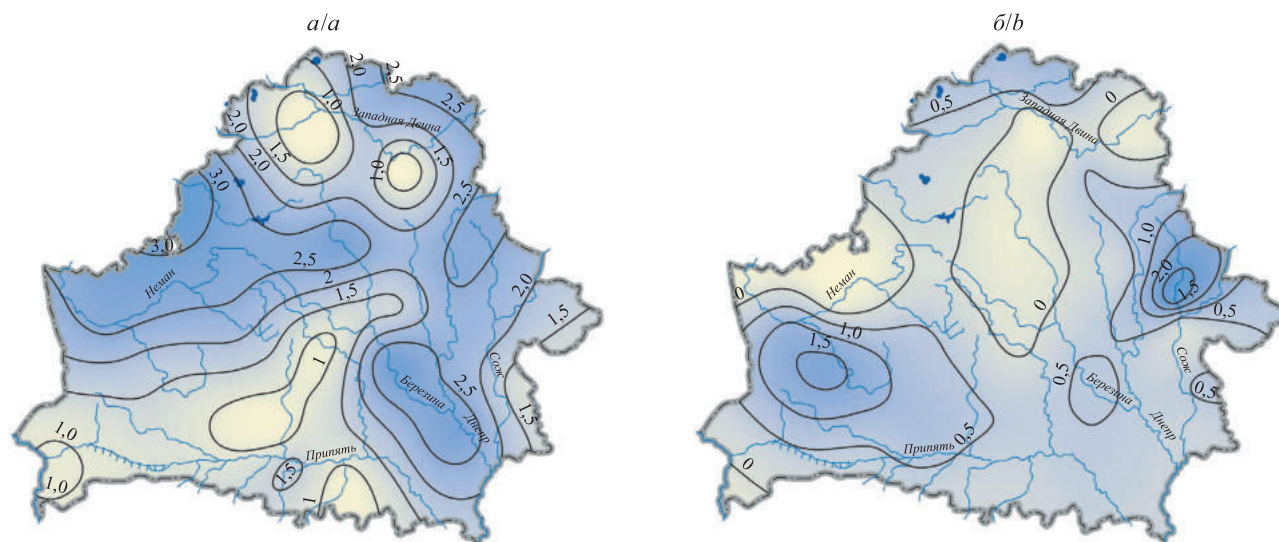


Рис. 4. Распределение наименьших расходов воды летне-осенней межени (а) и пространственное распределение трендов минимальных расходов воды летне-осенней межени с 1945 по 2020 г. (б), $\text{м}^3/\text{с}$

Fig. 4. Distribution of the minimal discharge in summer – autumn low-water season (a) and spatial distribution of minimal discharge trends in summer – autumn low-water season since 1945 to 2020 (b), m^3/s

Начиная с 1990-х гг. пространственное распределение осадков за июнь – август указывает на рост засушливости в теплый период года на большей части территории Беларуси. Наибольший дефицит осадков характерен для западной половины страны, где отмечены наименьшие годовые и летние суммы осадков за исследуемый период. Бассейны рек Неман, Западный Буг и верховье бассейна р. Припяти (т. е. запад и юго-запад республики) были наиболее засушливыми районами с 1990-х гг., дефицит осадков здесь составил 20–30 % по сравнению с их количеством в предыдущие десятилетия. Как следствие, повторяемость гидрологических засух, определенных по стандартизированным индексам осадков (SPI), на реках страны увеличилась на 15–20 % [37].

С 1990-х гг. отмечается уменьшение количества слабых и умеренных гидрологических засух, но двукратное увеличение количества сильных и экстремальных гидрологических засух. На р. Неман за послевоенные годы до начала периода потепления гидрологических засух не наблюдалось. В бассейне р. Неман на территории Литвы в 1961–2010 гг. признаков усиления засух также не выявлено [12]. Однако за последние десятилетия отмечено семь сильных засух на р. Неман у г. Гродно.

В центральной части Беларуси в бассейне р. Днепр повторяемость гидрологических засух увеличилась на 5–10 %. В районе г. Могилёва до 1990 г. сильных засух не наблюдалось, а в период с 1990 по 2020 г. было зафиксировано три сильные гидрологические засухи. В бассейне р. Припяти рост маловодных периодов менее значим, что связано с более медленными колебаниями речного стока из-за равнинного рельефа и заболоченных территорий. Однако в районе г. Мозыря зафиксировано увеличение числа сильных засух с трех до шести явлений.

Противоположные тенденции (т. е. переувлажнение в июне – августе) наблюдались на востоке страны в верховьях бассейнов рек Днепр и Сож, где отмечено уменьшение повторяемости гидрологических засух на 3–5 %.

Заключение

Проведенное исследование раскрывает современные тенденции изменения режима рек в различные фазы гидрологического цикла: зимнюю межень, включающую холодные дождевые паводки, весеннее половодье, связанное со снеготаянием, и летне-осеннюю межень с теплыми дождевыми паводками. Выполненные оценки указывают на продолжающиеся увеличение речного стока в зимний сезон, рост наименьших расходов воды зимней межени и повышение пиков холодных паводков, а также снижение стока в период весеннего половодья и уменьшение повторяемости наводнений. Эти тенденции стабильны на протяжении последних 30–50 лет, охватывающих период заметного изменения климата на территории Беларуси. Устойчивые тенденции в холодное время года объясняются преобладанием положительной фазы североатлантического колебания с 1960 по 1990 г. и усилением западного переноса в этот период. Зональные процессы обусловили интенсивное повышение температуры воздуха зимой, частые оттепели и рост количества осадков в Европе [38].

С середины 1990-х гг. возрастает интенсивность меридиональной циркуляции, связанной со скандинавским блокированием ведущего потока в атмосфере [39], вдоль которого происходит движение циклонов, в результате чего с 2000-х гг. на территории Беларуси наблюдаются увеличение повторяемости засух и одновременный рост суточных максимумов осадков, обусловленных конвективными процессами в атмосфере [33]. Изменения в гидрологическом режиме вызваны увеличением наименьших расходов воды в восточной половине страны (бассейны рек Западная Двина, Днепр, Припять), ростом максимумов дождевых паводков в теплый период года в бассейнах рек Западная Двина и Днепр, а также двукратным увеличением повторяемости сильных гидрологических засух во всех речных бассейнах, но особенно в бассейне р. Неман, где зафиксирован существенный недобор осадков в последние десятилетия. Характерные изменения в режиме рек в теплый период года менее устойчивы во времени и зависят от изменчивости выпадения осадков.

Библиографические ссылки

1. Xiong J, Yin J, Guo S, He S, Chen J, Abhishek. Annual runoff coefficient variation in a changing environment: a global perspective. *Environmental Research Letters*. 2022;17(6):064006. DOI: 10.1088/1748-9326/ac62ad.
2. Frolova NL, Magritskii DV, Kireeva MB, Grigor'ev VYu, Gelfan AN, Sazonov AA, et al. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water Resources*. 2022;49(3):333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.
3. Lobodzinskyi O, Vasylenko Y, Koshkina O, Nabyvanets Y. Assessing the impact of climate change on discharge in the Horyn River basin by analyzing precipitation and temperature data. *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2023;11(1):93–106. DOI: 10.26491/mhwm/163286.
4. Вишневський ВІ, Куций АВ. *Багаторічні зміни водного режиму річок України*. Київ: Наукова думка; 2022. 251 с.
5. Brzezińska W, Wrzesiński D, Świątek S. Wpływ ocieplenia klimatu na odpływ rzek w Polsce w latach 1951–2020. W: Kost-rzewski A, Abramowicz D, Cichoń M, Hildebrandt-Radke I, Kicińska D, Kolendowicz L, et al., redaktorzy. *Geoprzestrzeń. Numer 7, Kompleksowe badania środowiska geograficznego*. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe; 2023. s. 59–74.
6. Wilson D, Hisdal H, Lawrence D. Has streamflow changed in the Nordic countries? Recent trends and comparisons to hydrological projections. *Journal of Hydrology*. 2010;394(3–4):334–346. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.09.010.
7. Hansson D, Eriksson C, Omstedt A, Chen D. Reconstruction of river runoff to the Baltic Sea, AD 1500–1995. *International Journal of Climatology*. 2011;31(5):696–703. DOI: 10.1002/joc.2097.
8. Gailiūšis B, Kriaučiūnienė J, Jakimavičius D, Šarauskienė D. The variability of long-term runoff series in the Baltic Sea drainage basin. *Baltica*. 2011;24(1):45–54.
9. Obodovskiy O, Lukianets O, Korohoda N. Estimation of long-term fluctuations of river water flow by observation data. In: Obodovskiy O, editor. *River runoff in Ukraine under climate change conditions*. [S. l.]: Lambert Academic Publishing; 2020. p. 79–109.
10. Snizhko S, Bertola M, Ovcharuk V, Shevchenko O, Blöschl G. Climate change impact on seasonality of flood in the Desna River catchment, North Ukraine. In: *16th International scientific conference on monitoring of geological processes and ecological condition of the environment; 2022 November 15–18; Kyiv, Ukraine. Volume 2*. [S. l.]: European Association of Geoscientists and Engineers; 2022. p. 588–592.
11. Kireeva MB, Frolova NL, Winde F, Dzhamalov RG, Rets EP, Povalishnikova ES, et al. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards. *Geography, Environment, Sustainability*. 2016;9(4):33–47.
12. Rimkus E, Stonevičius E, Korneev V, Kažys J, Valiūškevičius G, Pakhomau A. Dynamics of meteorological and hydrological droughts in the Neman River basin. *Environmental Research Letters*. 2013;8(4):045014. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/045014.
13. Stonevičius E, Rimkus E, Kažys J, Bukantis A, Kriaučiūnienė J, Akstinas V, et al. Recent aridity trends and future projections in the Nemunas River basin. *Climate Research*. 2018;75:143–154. DOI: 10.3354/cr01514.
14. Poljanšek K, Marín Ferrer M, De Groeve T, Clark I, Faivre N, Peter D, et al. *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*. Poljanšek K, Marín Ferrer M, De Groeve T, Clark I, editors. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2017. 60 p. DOI: 10.2760/451402.
15. Stahl K, Tallaksen LM, Hannaford J, van Lanen HAJ. Filling the white space on maps of European runoff trends: estimates from a multi-model ensemble. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012;16(7):2035–2047. DOI: 10.5194/hess-16-2035-2012.
16. Gudmundsson L, Seneviratne SI, Zhang X. Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources. *Nature Climate Change*. 2017;7(11):813–816. DOI: 10.1038/nclimate3416.

17. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. 2-е издание. Минск: Энциклопедикс; 2020. 263 с.
18. Данилович ИС, Журавович ЛН, Нагибина МЕ, Квач ЕГ. Особенности формирования водности рек Беларуси в последние десятилетия. *Природные ресурсы*. 2017;2:5–12.
19. Данилович ИС, Логинов ВФ. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси. *Центральноазиатский журнал географических исследований*. 2021;1–2:35–48.
20. Danilovich I, Zhuravlev S, Kurochkina L, Groisman P. The past and future estimates of climate and streamflow changes in the Western Dvina River basin. *Frontiers in Earth Science*. 2019;7:204. DOI: 10.3389/feart.2019.00204.
21. Полищук АИ, Чекан ГС, редакторы. *Гидрологический мониторинг Республики Беларусь*. Минск: Книгазбор; 2009. 267 с.
22. Reihan A, Koltsova T, Kriauciūnienė J, Lizuma L, Meilutytė-Barauskienė D. Changes in water discharges of the Baltic states rivers in the 20th century and its relation to climate change. *Nordic Hydrology*. 2007;38(4–5):401–412. DOI: 10.2166/nh.2007.020.
23. Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, et al. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2010;14(12):2367–2382. DOI: 10.5194/hess-14-2367-2010.
24. Волчек АА, Шелест ТА. *Паводки на реках Беларуси*. Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина; 2016. 199 с.
25. Gillett NP, Fyfe JC. Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*. 2013;40(6):1189–1193. DOI: 10.1002/grl.50249.
26. Wrzesiński D. Flow regime patterns and their changes. In: Zelenáková M, Kubiak-Wójcicka K, Negm AM, editors. *Management of water resources in Poland*. Cham: Springer; 2021. p. 163–180 (Kostianoy A, Shirshov PP, editors. Springer water). DOI: 10.1007/978-3-030-61965-7_9.
27. Логинов ВФ, Волчек АА, Волчек АН. *Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз*. Минск: Беларуская навука; 2014. 244 с.
28. Волчек АА, Корнеев ВН, Парфомук СИ, Булак ИА. *Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата*. Волчек АА, Корнеев ВН, редакторы. Брест: Альтернатива; 2017. 239 с.
29. Лопух ПС, Партасёнок ИС. *Влияние атмосферной циркуляции на формирование гидрологического режима рек Беларуси*. Минск: Белорусский государственный университет; 2013. 216 с.
30. Partasenok IS, Groisman PY, Chekan GS, Melnik VI. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*. 2014;9(9):095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005.
31. Danilovich IS, Loginov VF, Groisman PY. Changes of hydrological extremes in the center of eastern Europe and their plausible causes. *Water*. 2023;15(16):2992. DOI: 10.3390/w15162992.
32. Wrzesiński D, Marsz AA, Sobkowiak L, Styszyńska A. Response of low flows of Polish rivers to climate change in 1987–1989. *Water*. 2022;14(18):2780. DOI: 10.3390/w14182780.
33. Данилович ИС, Пискунович НГ. Экстремальные проявления в режиме увлажнения на территории Беларуси в условиях трансформации климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2021;2:32–44. DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-32-44.
34. Marsz AA, Sobkowiak L, Styszyńska A, Wrzesiński D. Causes and course of climate change and its hydrological consequences in the Greater Poland region in 1951–2020. *Quaestiones Geographicae*. 2022;41(3):183–206. DOI: 10.14746/quageo-2022-0033.
35. Попова ВВ, Мацковский ВВ, Михайлов АЮ. Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария. *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. 2018;1:3–13. EDN: YPQIRP.
36. Данилович ИС, Логинов ВФ, Беганский АВ. Влияние циклогенеза в Атлантико-Европейском секторе на пространственно-временное распространение атмосферных осадков в Беларуси. *Природные ресурсы*. 2023;1:3–15.
37. Данилович ИС, Гледко ЮА, Тарасевич ИВ. Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе. *Метеорология и гидрология*. 2023;9:61–71. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-61-71.
38. Логинов ВФ, Данилович ИС, Китаев ЛМ, Акентьева ЕМ. Современные и ожидаемые гидроклиматические изменения в бассейнах Балтийского и арктических морей в пределах территорий Беларуси и России. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2022;66(3):338–347. DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347.
39. Попова ВВ. Современные тренды осадков и атмосферной циркуляции в речных бассейнах европейской части России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023;87(1):60–76. DOI: 10.31857/S2587556623010144.

Получена 20.05.2024 / исправлена 10.06.2024 / принята 06.03.2025.
Received 20.05.2024 / revised 10.06.2024 / accepted 06.03.2025.