

УДК 911.2; 551.583, 556

СОВРЕМЕННЫЕ И ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ:
ОСАДКОВ, ИСПАРЕНИЯ И РЕЧНОГО СТОКА

И. С. ДАНИЛОВИЧ^{1,2*}, И. В. ТАРАСЕВИЧ^{2,3**}, Ю. А. ГЛЕДКО^{2***}

¹ Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет (БГУ), Минск, Беларусь

³ Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды “Белгидромет”,
Минск, Беларусь

Представлены результаты анализа изменений гидрологического цикла на территории Беларуси за 1945–2025 гг. и прогноз на период 2025–2050 гг. для сценария SSP2 RCP4.5. Годовые осадки характеризуются отсутствием значимого тренда, но летом их количество снижается на 2–3 мм/декаду при одновременном росте повторяемости ливней на 30%. Суммарное испарение увеличивается с 2004 г., что не синхронизировано с началом потепления климата. Водные ресурсы, формирующиеся на территории страны, снизились на 17% за последние 10–15 лет. В режиме рек продолжает увеличиваться зимний сток и снижаться весеннее половодье, в теплый период года вдвое возросла частота гидрологических засух. Прогнозируется уменьшение летних осадков на 20%, варьирование испарения в пределах 10% и средний годовой сток около нормы, но с широкими доверительными интервалами 30–70%, что сохраняет риск экстремальных явлений, особенно в 2030-е гг.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2026.60.2.184>

Keywords: climate change, extremes, rainfall, drought, streamflow, flood.

Введение. Гидрологический цикл играет важную роль в обеспечении водной безопасности, функционировании экосистем и устойчивости климатической системы Земли. В условиях глобального изменения климата наблюдается увеличение частоты и интенсивности таких экстремальных гидрологических явлений, как засухи, ливневые паводки и наводнения. Современные тенденции гидрологического цикла имеют сходные тенденции на глобальном уровне, а именно испарение усиливается при повышении температуры, меняется режим осадков и их пространственное распределение, речной сток становится более

* E-mail: irina-danilovich@yandex.ru

** E-mail: tarasevich@bsu.by

*** E-mail: gledko74@mail.ru

изменчивым. Но на региональном уровне тенденции различны. Исследование гидрологического цикла на региональном уровне необходимо для прогнозирования водности рек, предотвращения неблагоприятных гидрологических явлений и адаптации водохозяйственных систем. Без количественной оценки испарения, осадков и стока невозможно рационально управлять водными ресурсами и разрабатывать стратегии устойчивого развития регионов.

Региональные тенденции осадков в Европе отличаются значительной неоднородностью. Наиболее выраженный рост отмечается в Северной и Центральной Европе, особенно зимой, с интенсификацией как в зимний, так и в летний сезоны [1]. В Центральной Европе статистически значимо увеличиваются кратковременные зимние экстремумы, но летние тренды менее однородны [2]. В Восточной Европе и, в частности, на территории Беларуси осадки значимо не изменяются, но интенсифицируются, наблюдается дифференциация водного баланса [3]. На севере Беларуси, северо-западе России и в Прибалтике рост испарения частично компенсируется увеличением осадков, однако учащаются летние засухи [4, 5]. На Украине засушливые условия возникают даже в ранее не засушливых районах [6]. В бассейне р. Дебед установлены устойчивые тенденции роста среднегодовой температуры и уменьшения количества осадков, свидетельствующие об усилении засушливости региона [7]. На всех действующих в настоящее время метеостанциях бассейна оз. Севана наблюдается тенденция роста температур воздуха и атмосферных осадков [8, 9].

Тренды испарения разнонаправлены. На территории Европейской России рост испарения с почвы до середины 1980-х сменился снижением [10]. В Беларуси в последние два десятилетия уже прослеживаются признаки аридизации, динамика испарения неоднородна под влиянием роста температуры и уменьшения ветра, а также мелиорации [5].

В режиме стока на глобальном уровне более половины речных бассейнов в 1985–2014 гг. испытывали снижение годового стока на 0,3–0,15% в год [11]. Для Восточно-Европейской равнины, речных бассейнов Беларуси [12] и в верховьях Дона [13] изменения стока оцениваются в пределах $\pm 10\%$ и статистически незначимы, но к юго-востоку снижение стока достигает 25%, а на северо-западе равнины сток увеличился на 20–50%.

Учитывая разнонаправленные тенденции элементов гидрологического цикла, целью исследования являлись региональная оценка текущих изменений гидроклиматических параметров на территории Беларуси и их долгосрочный прогноз в контексте макрорегиональных трансформаций на территории Европы.

Материалы и методы исследования. Исходные данные включают результаты инструментальных измерений на государственной сети наблюдений Белгидромета и модельные данные консорциума CMIP6. Данные наблюдений представлены средними месячными значениями температуры воздуха, месячными суммами осадков и суммарного испарения, осредненными по территории Беларуси за период 1945–2025 гг.

Модельные данные в виде месячных сумм осадков, суммарного испарения и стока получены из архива Copernicus Climate Data Store по результатам вычислений 9–15 моделей CMIP6. Прогнозные оценки изменения

осадков, суммарного испарения и речного стока представлены на период 2025–2050 гг. Межсценарная разница в динамике и отклонениях от нормы в пределах рассматриваемого периода незначительна, поэтому в работе использован один совмещенный сценарий социально-экономического развития и репрезентативных траекторий концентрации парниковых газов SSP2-RCP4.5. Исторический период для обучения моделей включал 1970–2014 гг., период для проекций – 2025–2050 гг.

Основным методом коррекции смещения модельных данных относительно наблюдений был выбран Random Forest. Это ансамблевый алгоритм машинного обучения, способный улавливать нелинейные зависимости между предикторами, в качестве которых выступили расчетные суммы всех моделей и целевой переменной – наблюдаемые суммы. Коррекция выполнялась отдельно для каждой переменной (осадки, испарение, сток).

Для оценки неопределенности использовались предсказания всех деревьев решений, вычислялись 10-й и 90-й процентиля, которые служили нижней и верхней границами доверительного интервала. По скорректированным рядам были построены линейные тренды (метод наименьших квадратов) и оценена их статистическая значимость.

Результаты исследований и их обсуждение. Среднегодовая сумма осадков, осредненная по территории Беларуси, за период 1945–2025 гг. составила 640 мм, в режиме их выпадения характерна умеренная межгодовая изменчивость, стандартное отклонение равно 75 мм. Экстремальные значения отмечены в 1998 г., наибольшее годовое количество осадков достигало 817 мм, наименьшая годовая сумма 489 мм отмечена в 1951 г. Линейный тренд годовых сумм осадков положительный, но статистически незначим и оценивается в 5 мм/декаду ($p = 0,27$). Т.е. за указанный период наблюдений достоверного увеличения или уменьшения общего годового увлажнения не произошло. Хотя за более короткие периоды отмечаются междекадные колебания осадков, их величина изменения варьирует в пределах 5–8% (рис. 1).

В динамике сезонных сумм осадков статистически значимое изменение установлено только для летнего сезона, отмечается снижение летних сумм со скоростью 2,4 мм/декаду ($p=0,04$). Хотя абсолютная величина тренда мала, его значимость на фоне отсутствия тренда в другие сезоны показывает перераспределение внутригодового хода осадков, т.е. летнее увлажнение слабо, но достоверно уменьшается, в то время как зимние, весенние и осенние суммы остаются стабильными.

Несмотря на снижение осадков летом, количество дней с ливневыми осадками увеличивается. Отмечается рост повторяемости осадков высокой интенсивности, число случаев с количеством осадков ≥ 20 мм увеличилось за последние 25 лет на 30–50% на более чем 90% метеорологических станций.

Суммарное испарение на территории Беларуси имеет выраженный сезонный ход. В холодный период года (ноябрь–март) суммы испарения незначительны и составляют менее 10–20 мм. С апреля начинается интенсивный рост и суммы увеличиваются до 45–50 мм, максимум достигается в июне – 80–90 мм, затем происходит постепенное снижение до 20–25 мм в октябре.

За период апрель–октябрь суммарное испарение составляет примерно 424 мм на севере, 450 мм в центре и 480 мм на юге страны.

В период 1960–2000 гг. существенного роста испарения не наблюдалось, несмотря на потепление, которое климатологи Беларуси фиксируют с 1989 г. (рис. 1). Однако анализ более длинных рядов за 1945–2025 гг. выявил статистически значимый сдвиг в 2004 г. Средняя сумма испарения за апрель–октябрь увеличилась с 465 мм (1945–2004) до 490 мм (2005–2025), рост оценивается около 5% ($p=0,022$).

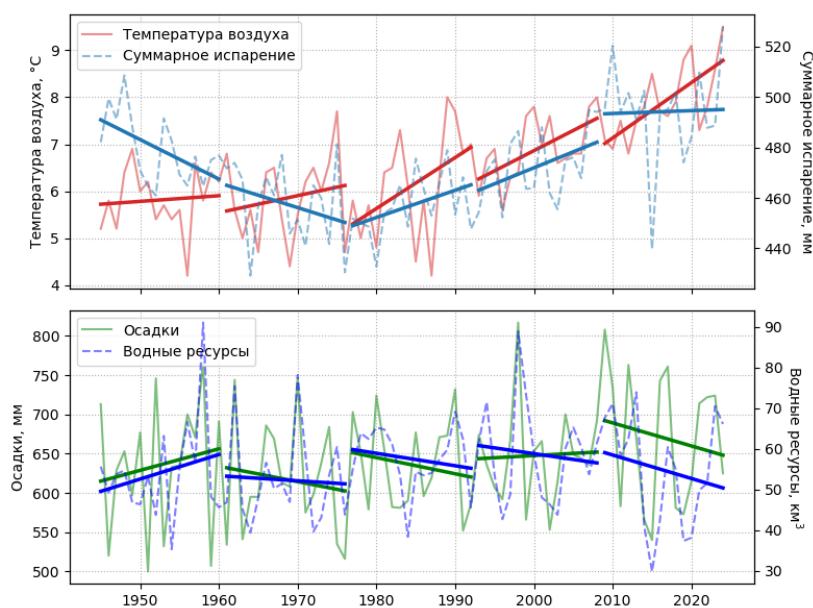


Рис. 1. Динамика основных гидроклиматических параметров (фактические значения температуры воздуха, осадков, суммарного испарения и водных ресурсов), осредненных по территории Беларуси за период 1945–2025 гг.

Динамика *водных ресурсов* на территории Беларуси тесно связана с выпадением атмосферных осадков и увлажнением водосборов. Эта связь оценивается коэффициентом корреляции 0,7. Но несмотря на незначительные изменения годовых сумм осадков в последние десятилетия и отсутствие значимых трендов, колебания водных ресурсов более чувствительны к климатическим аномалиям. В течение рассматриваемого периода междекадные тренды не превышали 10%, отмечается межгодовая изменчивость, но в последние 10–15 лет отмечается снижение водных ресурсов на 17% (рис. 1).

Современные тенденции в режиме рек в различные фазы гидрологического цикла показывают продолжающиеся тенденции увеличения речного стока в зимний период, рост наименьших расходов зимней межени и пиков холодных паводков, а также снижение стока в период весеннего половодья и уменьшение повторяемости наводнений. Эти тенденции стабильны в последние 30–50 лет, охватывающие период заметного изменения климата на территории Беларуси.

С 2000-х гг. увеличилась повторяемость летних засух на территории Беларуси и одновременный рост суточных максимумов осадков, связанных с конвективными процессами в атмосфере [12]. В гидрологическом режиме изменения связаны с увеличением наименьших расходов воды в восточной половине страны – бассейнах рек Западная Двина, Днепр, Припять, с увеличением максимумов дождевых паводков в теплый период года в бассейнах рек Западная Двина и Днепр, а также с двукратным увеличением повторяемости сильных гидрологических засух во всех речных бассейнах [3]. Характерные изменения в режиме рек в теплый период года менее устойчивы во времени и зависят от изменчивости выпадения осадков.

Прогнозные оценки. В работе проведена оценка будущих изменений годовых сумм осадков, суммарного испарения и речного стока на территории Беларуси на основе ансамбля моделей СМIP6 для сценария антропогенного воздействия SSP2-RCP4.5, отражающего умеренное развитие, стабилизацию радиационного воздействия к концу текущего столетия (рис. 2).

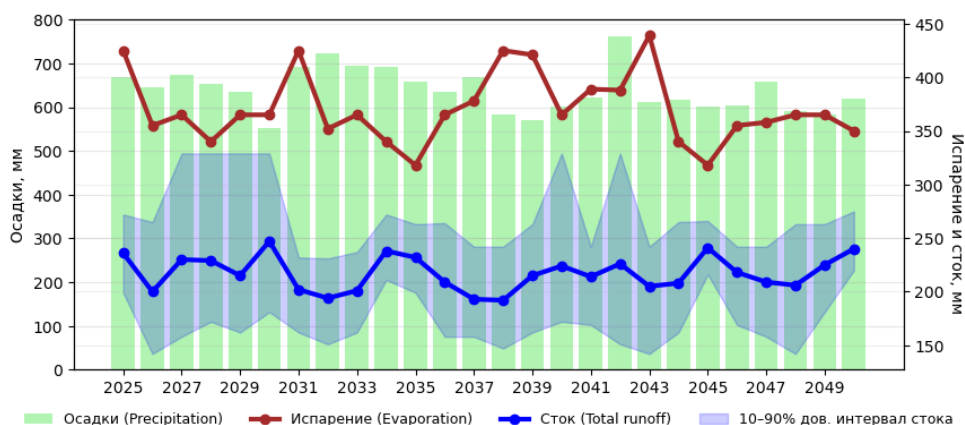


Рис. 2. Динамика годовых сумм осадков, суммарного испарения и стока на территории Беларуси в период 2025–2050 гг. по ансамблю моделей СМIP6 при сценарии SSP2-RCP4.5.

В течение периода 2025–2050 гг. годовые осадки на территории Беларуси ожидаются в пределах 560–750 мм, при этом наибольший вклад в годовую сумму будет приходиться по-прежнему на лето – в среднем около 225 мм. Анализ линейных трендов показывает статистически значимое снижение летних осадков примерно на 55–60 мм за период 2025–2050 гг. Это соответствует общим прогнозам для внутриконтинентальных районов Европы, где ожидается сокращение летних осадков из-за усиления блокирующих антициклонов и увеличения испаряемости [14]. Осенью осадки будут снижаться, но незначительно – около 10 мм/декаду. Весной, напротив, ожидается небольшой положительный тренд 4 мм/декаду, и он частично компенсирует потери в теплый сезон. Зимние осадки практически не изменятся. Годовые суммы будут слабо снижаться примерно на 5%.

Анализ проекций суммарного испарения за 2025–2050 гг. показывает, что годовые значения будут варьировать в диапазоне от 450 до 506 мм.

Ожидается относительно стабильный уровень испарения около 470–480 мм в первой половине рассматриваемого периода 2025–2034 гг., затем небольшое повышение до 480–486 мм в 2035–2042 гг. и последующее снижение до 469–474 мм в 2045–2050 гг. Общая тенденция заключается в слабом уменьшении интенсивности суммарного испарения к концу 2040-х годов по сравнению с серединой 2030-х гг.

Прослеживается определенная цикличность в динамике испарения в виде двух выраженных максимумов. Первый подъем испарения приходится на 2028–2029 гг. (507 и 498 мм соответственно), второй – на 2040–2041 гг. (504 и 501 мм соответственно). Между этими пиками ожидается минимум около 450 мм, после которого следует постепенный рост. В конце исследуемого периода также ожидается заметное снижение: после 2044 г. значения снизятся на 45–50 мм к 2045–2047 гг., а затем частично восстановятся до 493 мм в 2049 г.

Анализ изменения *стока* позволил сделать следующие выводы о будущем режиме водности. Средняя годовая величина стока за весь прогнозный период 2025–2050 гг. составляет 213 мм, что практически не отличается от многолетнего значения 214 мм за исторический период 1970–2014 гг. Однако ожидается снижение межгодовой изменчивости стока. К концу прогнозного периода намечается слабый положительный тренд – сток 2040-х годов на 2–3% выше исторической нормы и на 5–7% выше, чем в 2030-е годы. Минимальные значения последовательно возрастут от 193 мм в 2020-х до 205 мм в 2040-х гг. Максимальные значения, напротив, останутся стабильными в пределах 236–247 мм, то есть значительно ниже исторических максимумов. Таким образом, согласно выполненным расчетам, ожидается умеренная межгодовая изменчивость стока. Но необходимо понимать, что эти данные, обобщенные по всей территории страны, отражают лишь общую водность на ближайшие 25 лет. С учетом малых изменений в режиме годовых осадков и суммарного испарения за период до 2050 г. прогнозная динамика речного стока укладывается в общую схему гидроклиматических проекций для территории Беларуси. Но при этом нельзя исключать сильные отклонения от средних многолетних значений и формирование катастрофических наводнений или сильных засух и маловодий, о чем свидетельствуют значения доверительного интервала. Размах возможных отклонений остается значительным, особенно в 2030-е гг. Нижние границы интервала могут опускаться до 142 мм, что соответствует историческому минимуму засух, а верхние достигают 329 мм, то есть уровня катастрофических паводков. Несмотря на сужение многолетней дисперсии по сравнению с прошлым, отдельные годы могут приносить как экстремально маловодные, так и экстремально многоводные условия.

Заключение. Годовая сумма осадков по территории Беларуси за многолетний период (1945–2025 гг.) составляет 640 мм, динамика осадков характеризуется отсутствием значимого тренда, однако летние осадки снижаются на 2,4 мм/декаду при одновременном росте повторяемости ливней на 30% за последние 25 лет. Суммарное испарение после 2004 г. увеличилось на 5% (с 465 до 490 мм), рост испарения не синхронизирован с началом потепления на территории страны. Водные ресурсы, коррелирующие с осадками ($r = 0,7$), за последние 10–15 лет снизились на 17% при отсутствии значимого тренда

годовых осадков. В режиме рек устойчиво растет зимний сток и снижается весеннее половодье, с 2000-х гг. вдвое возросла повторяемость гидрологических засух. Прогноз на 2025–2050 гг. при реализации сценария SSP2-RCP4.5 показывает снижение летних осадков на 55–60 мм, незначительный рост весенних и уменьшение годовых сумм осадков на $\approx 5\%$. Испарение ожидается от 450–506 мм с понижением к концу 2040-х до 469–474 мм. Средний годовой сток с большой долей вероятности останется близким к исторической норме 213 мм при уменьшении межгодовой изменчивости, но доверительные интервалы очень широкие, нижняя граница может опускаться до 142 мм (исторический минимум засух), верхняя достигать 329 мм (уровень катастрофических паводков), особенно в 2030-е гг. Таким образом, при общей стабилизации среднего стока сохраняется вероятность экстремальных гидрологических явлений.

Исследование выполнено в рамках НИР “Геоэкологические риски: прогнозы, оценки последствий, способы адаптации и снижения негативных последствий”, реализуемой в подпрограмме “Экология и радиационное использование природных ресурсов” ГПНИ “Рациональное природопользование” на 2026–2030 годы, грант № ГР 20260409.

Поступила 26.05.2026

Получена с рецензии 12.06.2026

Утверждена 26.08.2026

ЛИТЕРАТУРА

1. Médus E., Thomassen E., et al. Yang W. Characteristics of Precipitation Extremes over the Nordic Region: Added Value of Convection-Permitting Modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **22** (2022), 693–711.
<https://doi.org/10.5194/nhess-22-693-2022>
2. Zeder J., Fischer E. Observed Extreme Precipitation Trends and Scaling in Central Europe. *Weather and Climate Extremes* **29** (2020).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221209472030045X>
3. Данилович И., Гледко Ю., Тарасевич И. Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе. *Метеорология и гидрология* **9** (2023), 61–71.
<http://www.mig-journal.ru/component/content/article?id=5940>
4. Jaagus J., Briede A., et al. Spatiotemporal Variability of Precipitation and Drought in the Baltic Countries. *Theoretical and Applied Climatology* **128** (2017), 385–399.
<https://doi.org/10.1007/s00704-015-1712-7>
5. Логинов В., Лысенко С., Мельник В. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования (2-е изд.). Минск, УП “Энциклопедикс” (2020), 289.
6. Wilson L., New S., Daron J., Golding N. Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office (2021).
https://mepu.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/2_Vplyv-zminy-klimatu-v-Ukrayini.pdf
7. Маргарян В.Г., Ольчев А.В. Пространственная и временная изменчивость температуры воздуха и осадков бассейна р. Дебед. *Ученые записки ЕГУ. Геология и география* **56** (2022), 1–13.
<https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2022.56.1.001>

8. Маргарян В.Г. Расчет зимнего среднедекадного минимального стока рек бассейна озера Севан и анализ его временной изменчивости. *Журнал Белорусского государственного университета. География, геология* **1** (2020), 27–35.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-27-35>
9. Margaryan V., Tsibul'skii G., Raevich K. Dynamics of Changes in Long-Term Average Annual River Runoff in the Lake Sevan Basin. *E3S Web of Conferences* **149** (2020), 03009.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014903009>
10. Постников А. Об изменении испарения с суши и водной поверхности на территории России за последние десятилетия. *Ученые записки РГТМУ* **50** (2018), 88–96.
11. Xiong J. Y., Guo S., et al. Annual Runoff Coefficient Variation in a Changing Environment: A Global Perspective. *Environmental Research Letters* **17** (2022).
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac62ad>
12. Danilovich I., Loginov V., Groisman P. Changes of Hydrological Extremes in the Center of Eastern Europe and their Plausible Causes. *Water* **15** (2023), 2992.
<https://doi.org/10.3390/w15162992>
13. Frolova N., Magritskii D., 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* **49** (2022).
<https://doi.org/10.1134/S0097807822030046>
14. Bešťáková Z., Kyselý J., et al. Warm-Season Drying Across Europe and its Links to Atmospheric Circulation. *Earth and Space Science* **11** (2024), e2023EA003434.
<https://doi.org/10.1029/2023EA003434>

Ի. Ս. ԴԱՆԻԼՈՎԻՉ, Ի. Վ. ՏԱՐԱՍԵՎԻՉ, Յու. Ա. ՀԼԵԴԿՈ

ԲԵԼԱՌՈՒՍՈՒՄ ՀԻՌՈՒՆԱԳԻՍՏԱՆԻ ՑԻԿԼԻ ԲԱՂԱԴՐԻՉՆԵՐԻ
ԺԱՄԱՆԱԿԱԿԻՑ ԵՎ ԿԱՆԽԱՏԵՍՎՈՂ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ՝
ՏԵՂՈՒՄՆԵՐ, ԳՈՒՈՐԾԱՑՈՒՄ ԵՎ ԳԵՏԱՅԻՆ ՀՈՍՔ

Ամփոփում

Ուսումնասիրությունը ներկայացնում է Բելառուսի տարածքում հիդրոլոգիական ցիկլի բաղադրիչների բաշխման և փոփոխությունների ընդհանուր պատկերը 1945–2025 թվականների համար և SSP2 RCP4.5 սցենարի 2025–2050 թվականների կանխատեսումը: Տարեկան տեղումները էական միտում չեն ցուցաբերում, սակայն ամռանը դրանք նվազում են 2–3 մմ-ով տասնամյակի ընթացքում, մինչդեռ առատ տեղումների հաճախականությունը աճում է 30%-ով: Ընդհանուր գոլորշիացումը 2004 թվականից ի վեր աճել է, սակայն այս աճը համաժամեցված չէ գլոբալ տաքացման սկսվելու հետ: Ջրային ռեսուրսները, որոնք կապված են տեղումների հետ, վերջին 10–15 տարիների ընթացքում նվազել են 17%-ով: Գետերի հոսքի միտումները ներառում են ձմեռային սակավաջրության և ձմեռային հորդացումների պիկերի աճ, գարնանային հոսքի նվազման և գարնանային հորդացումների թվի կրճատումը: Ամառային տեղումները կանխատեսվում են 20%-ով նվազել, գոլորշիացումը կտատանվի 10%-ի սահմաններում, իսկ տարեկան միջին հոսքը կլինի նորմայի մոտ, բայց 30–70% լայն վատահության միջակայքերով՝ պահպանելով ծայրահեղ իրադարձությունների ռիսկը, մասնավորապես 2030-ական թվականներին:

I. S. DANILOVICH, I. V. TARASEVICH, Yu. A. HLEDKO

CURRENT AND PROJECTED CHANGES IN HYDROLOGICAL CYCLE
COMPONENTS ACROSS BELARUS:
PRECIPITATION, EVAPORATION AND RIVER RUNOFF

Summary

The study presents results of analyzing changes in the hydrological cycle across the territory of Belarus for 1945–2025 and projections for the period 2025–2050 under the SSP2 RCP4.5 scenario. Annual precipitation shows no significant trend, but summer precipitation decreases by 2–3 *mm* per decade, accompanied by a 30% increase in the frequency of heavy rainfall. Total evaporation has been increasing since 2004, which is not synchronized with the onset of climate warming. Water resources generated within the country have decreased by 17% over the last 10–15 years. In river regimes, winter runoff continues to increase while spring floods decrease; the frequency of hydrological droughts during the warm season has doubled. A 20% reduction in summer precipitation, a variation in total evaporation within 10%, and an average annual runoff close to the long-term norm are projected, but with wide confidence intervals of 30–70%, which maintains the risk of extreme events, especially in the 2030s.