

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
WATER RESOURCES
ВОДНЫЯ РЭСУРСЫ

УДК 551.582, 551.583, 556,5

И. С. Данилович¹, Е. Г. Квач², Л. Н. Журавович², Н. Г. Пискунович¹

¹*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: irina-danilovich@yandex.ru*

²*Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения
и мониторингу окружающей среды (Белгидромет), Минск, Беларусь*

**СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА
И УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ЛЕТНЕ-ОСЕННЕЙ МЕЖЕНИ
НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ**

Аннотация. Выполнена оценка режима увлажнения территории Беларуси в теплый период года и как результирующего параметра – речного стока в период летне-осенней межени. Установлены тенденции изменения и пространственная дифференциация месячных сумм осадков, максимальных сумм осадков и продолжительность выпадения осадков; выявлены особенности формирования стока в период открытого русла – наименьших расходов воды за сезон и наибольших расходов во время прохождения дождевых паводков. Рассчитаны показатели засушливости территории страны на основании использования стандартизированных индексов (SPI и SSFI), рекомендованных ВМО. Показано, что несмотря на незначительные изменения годовых сумм осадков в период изменения климата Беларуси (1989–2018 гг.), отмечается увеличение интенсивности выпадения осадков и повторяемость засушливых явлений в летние месяцы. В режиме стока, несмотря на отсутствие четких тенденций изменения доли летне-осеннего стока, отмечается увеличение высоты дождевых паводков и/или рост значений наименьших расходов воды периода открытого русла и одновременно увеличение повторяемости очень маловодных периодов.

Ключевые слова: изменение климата, осадки, засухи, речной сток, летне-осенняя межень

I. S. Danilovich¹, E. G. Kvach², L. N. Zhuravovich², N. G. Piskunovich¹

¹*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: irina-danilovich@yandex.ru*

²*Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring (Belhydromet),
Minsk, Belarus*

**CURRENT CHANGES OF PRECIPITATION IN WARM SEASON
AND STREAMFLOW FORMATION DURING LOW-FLOW PERIOD OVER TERRITORY OF BELARUS**

Annotation. The study presents an assessment of the moistening regime over territory of Belarus in warm season and as resulting parameter – surface streamflow during low-flow season. The tendencies of monthly precipitation, maximal daily totals and duration of rainfall were detected; streamflow characteristics, such as the lowest discharges for the low-flow season and highest discharges of rain floods were estimated. The Standard Precipitation Index and Standard Streamflow Index were calculated to estimate the drying conditions over territory of Belarus. Despite the insignificant change of the annual precipitation during the period of 1989–2018, the intensification of rain falling has increased over territory of Belarus but at the same time the number of meteorological droughts growth in May–September. The streamflow rate didn't change significant but the highest rain floods discharges and/or the lowest discharges during low-flow season has growth (except the Neman River basin) while hydrological droughts repeatability also has increased in all river basins of the study region.

Keywords: climate change, precipitation, droughts, streamflow, low-flow season

I. S. Данилович¹, Е. Г. Квач², Л. Н. Журавович², Н. Г. Піскунович¹

¹*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: irina-danilovich@yandex.ru*

²*Рэспубліканскі цэнтр па гідраметэаралогіі, кантролю радыяактыўнага забруджвання
і маніторынгу навакольнага асяроддзя (Белгідрамет), Мінск, Беларусь*

**СУЧАСНЫЯ ЗМЯНЕННІ РЭЖЫМУ ўВІЛЬГАТНЕННЯ ў ЦЭПЛЫ ПЕРЫЯД ГОДА І УМОЎ ФАРМІРАВАННЯ СЦЁКУ
ЛЕТНЕ-АСЕННЕЙ МЕЖАНІ НА РЭКАХ БЕЛАРУСІ**

Анатацыя. Выканана адзнака рэжыму ўвільгатнення тэрыторыі Беларусі ў цёплы перыяд года і як вынікавага параметру – рачнога сцёку ў летне-асеннюю межань. Устаноўлены тэндэнцыі змены і прасторавыя адрозненні месячных сум ападкаў, максімальных сум ападкаў і працягласці выпадзення ападкаў; выяўлены асаблівасці фарміравання сцёку

ў перыяд адкрытага рэчышча – найменшых расходаў вады за сезон і найбольшых расходаў падчас праходжання дажджавых паводак. Разлічаны паказчыкі засушлівасці тэрыторыі краіны на падставе выкарыстання стандарызаваных індэксаў (SPI і SSFI), рэкамендаваных СМА. Паказана, што нягледзячы на ​​нязначныя змены гадавых сум ападкаў у перыяд змены клімату Беларусі (1989–2018 гг.), адзначаецца павелічэнне інтэнсіўнасці выпадзення ападкаў і паўтаральнасць засушлівых з’яў у летнія месяцы. У рэжыме сцёку, нягледзячы на ​​адсутнасць выразных тэндэнцый змены долі летне-асенняга сцёку, адзначаецца павелічэнне вышыні дажджавых паводак і/або рост значэнняў найменшых расходаў вады ў перыяд адкрытага рэчышча і адначасова павелічэнне паўтаральнасці вельмі малаводных перыядаў.

Ключавыя словы: змяненне клімату, ападкі, засухі, рачны сцёк, летне-асення межаны

Введение. Климатические изменения на территории Беларуси, отмеченные вначале 1970-х годов, наиболее значимо проявились с 1990-х [1] и отразились на режиме рек [2–4]. Формирование речного стока связано с множеством природных факторов, главным среди которых является режим увлажнения, от которого зависят запасы влаги на водосборах и приток воды в русла рек. Значительные повышения или понижения водности рек зависят от резких аномалий в режиме увлажнения.

В последние годы характерной чертой климата в регионе Европы, и в том числе территории Беларуси, являются засухи и засушливые условия в атмосфере, почве, водных системах, от которых ежегодно страдает значительная часть населения европейского региона. Тенденции частоты метеорологических засух в Европе, установленные на основе стандартизированного индекса осадков (Standard Precipitation Index, SPI) за три месяца (SPI-3) показывают увеличение их повторяемости с 1950 г. в южной Европе и большей части центральной Европы, однако во многих частях северной Европы частота засух снизилась [5]. Ожидается, что частота метеорологических засух (SPI-3) к середине XXI столетия (2041–2070 гг. по сравнению с 1981–2010 гг.) увеличится на большей части региона, в частности в южной части Европы, при этом уменьшение числа засух прогнозируется только для ограниченных частей северной Европы [6]. Тенденции стока в самый засушливый месяц за период 1950–2015 гг. показывают снижение в южной и большей части центральной Европы, но в северной части Европы минимальный сток увеличился [7, 8].

Территория Беларуси располагается в переходной зоне между севером, где отмечается увеличение осадков и минимальный сток увеличивается, и югом, где наблюдается уменьшение осадков и минимального стока. За последние 30 лет, охватывающих период потепления климата Беларуси (1989–2018 гг.), отсутствуют значимые изменения годовых сумм осадков, но в то же время засушливые явления отмечаются более часто [9].

Водные ресурсы страны, которые тесно связаны с режимом выпадения осадков, в 12 % лет в период 1989–2018 гг. были ниже среднего многолетнего значения и составили от 51 до 93 % от средней многолетней величины. Максимальные значения водных ресурсов в этот период отмечены в 1998 г. – 88,88 км³ (второй по величине максимум за весь период наблюдений), что составляет 154 % от средней многолетней величины и в 2013 г. – 73,90 км³ или 128 % от среднего многолетнего значения. Минимальные значения водных ресурсов наблюдались в 2015 г. (51 % от средней многолетней величины). Водные ресурсы, отмеченные в 2015 г., явились абсолютным минимумом более чем за 100-летний период изучения.

В связи с продолжающимся периодом заметного изменения климата, неоднородным пространственным распределением трендов осадков по территории Беларуси и в прилегающих регионах и, как следствие, разнонаправленных изменений условий формирования речного стока, особенно в период открытого русла, актуальность детальных исследований пространственно-временных особенностей режима увлажнения в теплый сезон (май–сентябрь) и изменения стока в период летне-осенней межени на реках Беларуси является несомненной.

Исходные данные и методология. В работе использовали количественные характеристики Государственного климатического и Государственного водного кадастров Республики Беларусь, находящиеся в ведении Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, а также расчетные статистики и индексы, характеризующие гидроклиматический режим территории Беларуси. Описание исходных данных представлено на рис. 1.

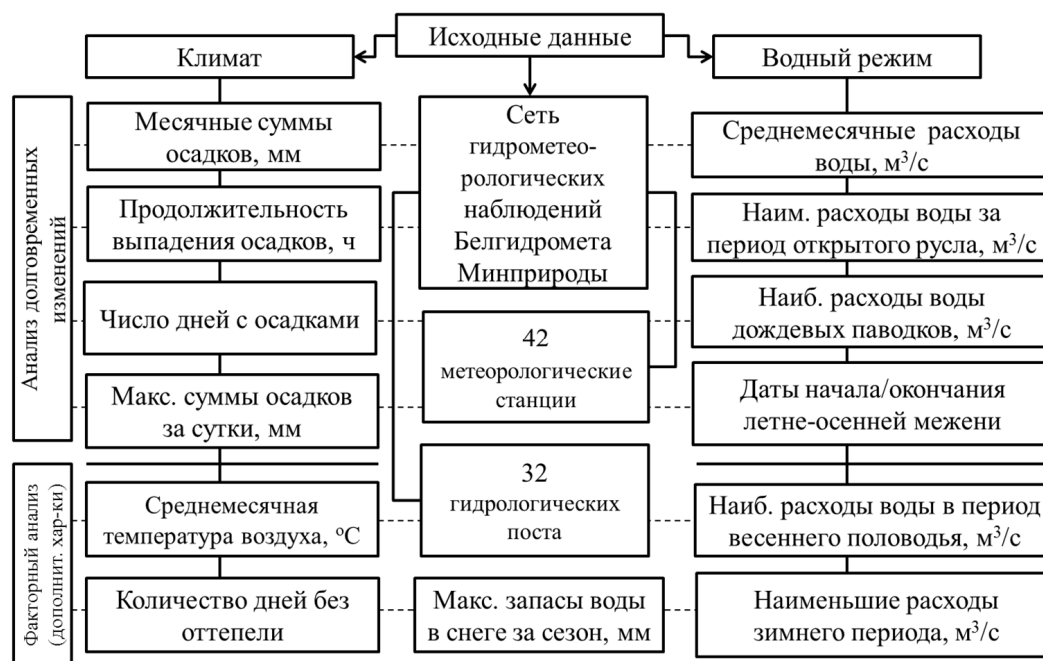


Рис. 1. Перечень климатических и гидрологических характеристик территории Беларуси, используемых в работе

Периоды. Для оценки многолетних колебаний в режиме увлажнения и выявления тенденций гидроклиматических изменений принят период 1948–2018 гг. Современные трансформации режима увлажнения и водного режима за период заметного изменения климата Беларуси рассчитаны за 1989–2018 гг. Для дополнительного анализа принимался 30-летний период 1958–1988 гг., как равнозначный по продолжительности и предшествующий периоду изменения климата Беларуси (1989–2018 гг.) и близкий к предыдущей климатической норме, рекомендованной Всемирной метеорологической организацией (ВМО) 1961–1990 гг.

В соответствии с целью исследования условий формирования речного стока летне-осенней межени на реках Беларуси внутригодовой период для исследования режима увлажнения охватывает май–сентябрь (так как осадки в этот период года обуславливают режим летне-осенней межени на реках страны) и для исследования речного стока – период от даты окончания половодья до даты начала зимнего периода (период открытого русла).

Методология. Для количественной оценки влияния метеорологических параметров на формирование речного стока выполнен факторный анализ, который включал следующие исходные метеорологические параметры: среднемесячные значения температуры воздуха (T_{1-12} , °C), месячные суммы осадков (P_{1-12} , мм), количество дней с осадками (P_p , дни), количество дней без оттепелей (N_{th} , дни), максимальные запасы воды в снеге за сезон (SWE, мм); гидрологические параметры: средние месячные расходы воды (Q_{1-12} , м³/с), наибольшие расходы воды в период весеннего половодья (Q_{max} , м³/с), наименьшие расходы зимнего периода (Q_{min_wint} , м³/с), наименьшие расходы в период открытого русла (Q_{min_sum} , м³/с).

Установление засушливых периодов (метеорологических и гидрологических засух) выполнено посредством расчетов стандартизированного индекса осадков (Standard Precipitation Index, SPI) и стандартизированного индекса речного стока (Standard Streamflow Index, SSFI) [10]. Выбор индексов связан с универсальностью при использовании в отношении осадков и речного стока (сходность методик расчета и интерпретации результатов), а также широким использованием данных индексов в мировой практике и сравнимостью полученных результатов с зарубежными исследованиями.

Использование индекса SPI рекомендовано ВМО в качестве основного метеорологического индекса засушливости, который следует использовать странам для мониторинга и отслеживания условий засушливости [11]. Для вычисления индексов SPI строится функция гамма-распреде-

ния и определяется кумулятивная вероятность наблюдаемых осадков, которая преобразуется далее с использованием обратной функции Гаусса к вероятности нормально распределенной случайной величины Z с нулевым средним и дисперсией, равной единице, которая и является значением SPI [12].

В качестве исходных данных при расчете SPI используются исторические данные об осадках, которые в настоящей работе вычислены с использованием временного масштаба в 1 месяц (SPI-1), т. е. рассчитаны за каждый месяц с мая по сентябрь в период 1948–2018 гг. по каждой метеорологической станции.

Стандартизированный индекс речного стока (SSFI) разработан с использованием месячных величин речного стока и методов нормирования, аналогичных расчетам SPI. Значения индекса SSFI характеризует периоды высокого и низкого стока, связанные с засухами и паводками. Положительные значения SPI и SSFI указывают на объем осадков/стока выше среднего, а отрицательные – ниже среднего. В работе использованы индексы, характеризующие засушливые условия: $-0,5...-1,0$ – слабовыраженная засуха; $-1,1...-1,5$ – умеренная засуха; $-1,5...-1,99$ – сильная засуха; $-2,0$ и менее – экстремальная засуха [10].

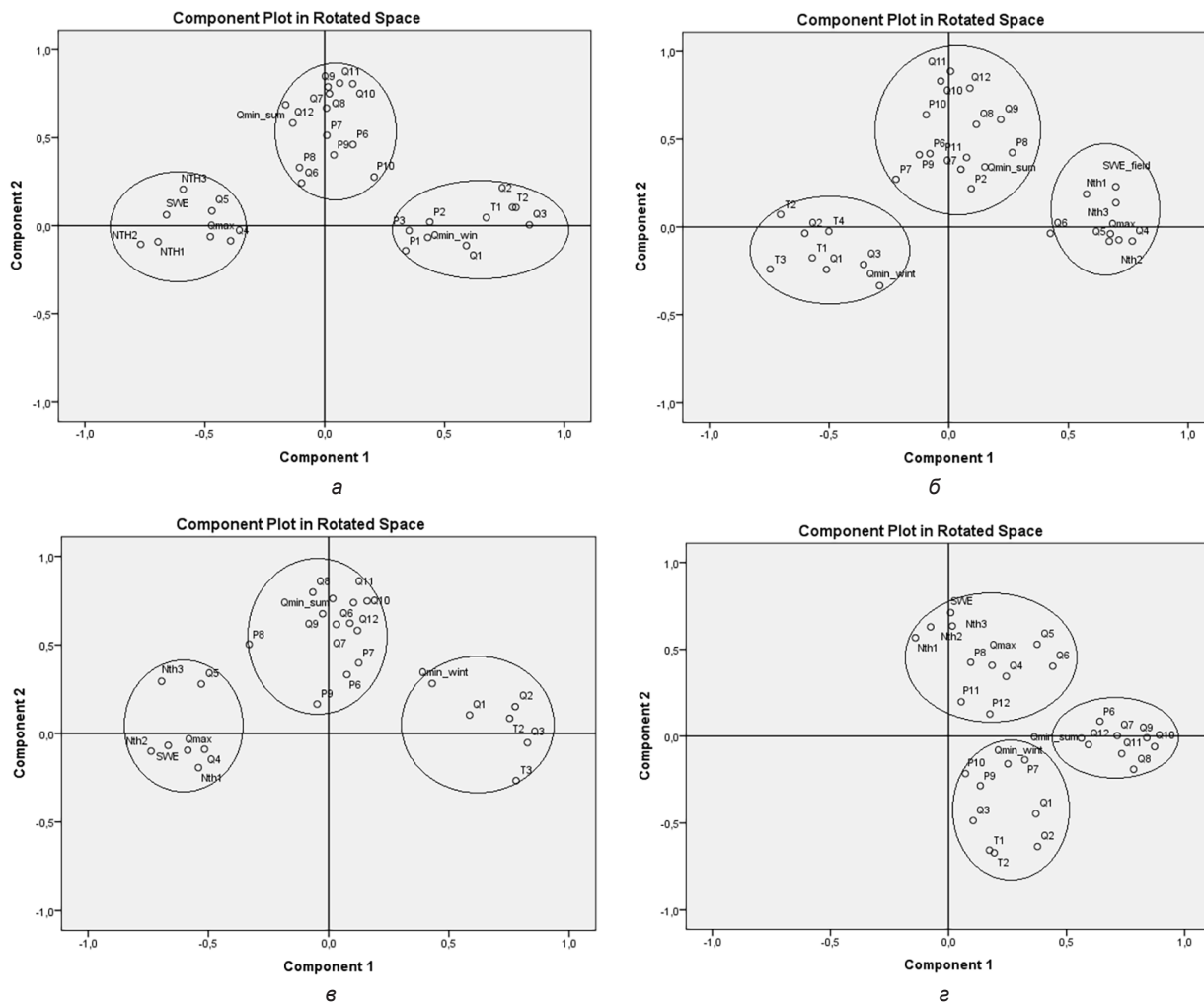
Результаты и их обсуждение. Оценка вклада метеопараметров в изменчивость речного стока. Для понимания причин изменения речного стока необходимо установить и подтвердить статистическими методами механизм влияния метеорологических параметров на формирование стока рек в различные фазы гидрологического цикла. Реки Беларуси характеризуются смешанным типом питания: снеговым, грунтовым и дождевым, т.е. так или иначе связанным с режимом увлажнения водосборов. При этом термический режим территории выступает в качестве регулятора преобладающего типа питания, особенно в зимний сезон, и, как следствие, ведущего фактора формирования внутригодового распределения стока, а также величины стока в различные фазы гидрологического цикла.

В более ранних работах [3, 13, 16], посвященных изучению водного режима рек Беларуси, отражены ведущие факторы изменения речного стока в различные сезоны. Но для количественной оценки вклада метеорологических параметров на формирование стока в разные фазы водного режима, выполнен факторный анализ, который показал следующее распределение факторных нагрузок (рис. 2).

Для анализа отобраны исходные признаки с величинами факторных нагрузок от 0,88 до 0,30, которые можно разделить на группы в соответствии с основными фазами гидрологического цикла: (1) зимняя межень, (2) весеннее половодье и (3) летне-осенняя межень.

Согласно проведенному анализу формирование наименьшего расхода зимнего периода (Q_{\min_wint}) и стока зимней межени (Q_{12-3}) в большей степени по сравнению с другими факторами обусловлено влиянием температуры воздуха (T_{12-3}) и величиной осадков (P_{1-3}) в зимние месяцы. Сток весеннего половодья (Q_{4-5}), который отмечается в апреле–мае на территории Беларуси, и наибольший расход весеннего половодья (Q_{\max}) наиболее тесно связаны с максимальными запасами воды в снеге (SWE) и числом дней без оттепелей (N_{th}). Меженный сток в летне-осенний период – июль–ноябрь (Q_{7-11}) и наименьший расход в период открытого русла (Q_{\min_sum}) формируется преимущественно в результате выпадения осадков в июне–сентябре (P_{6-9}).

Отдельно стоит отметить причинно-следственные связи гидроклиматических параметров в бассейне р. Припять. Вследствие преобладания плоского рельефа, высокого залегания грунтовых вод и значительной заболоченности водосбора, режим реки характеризуется плавным изменением расходов воды во времени, более инертными колебаниями водности и растянутыми паводками, что отразилось на группировке исходных признаков для бассейна. Водность рек в рассматриваемом бассейне в каждую из фаз гидрологического цикла обусловлена водностью предшествующего сезона, т. е. отмечается пролонгированное влияние метеорологических факторов на формирование стока. Например, наименьший расход зимней межени связан (кроме температуры и осадков в декабре–феврале) с осадками в сентябре–октябре ($P_{9,10}$). Наибольший расход весеннего половодья (кроме числа дней без оттепелей) обусловлен величинами осадков и температуры в ноябре–декабре (T_{11} , $P_{11,12}$).



Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization

Рис. 2. Компонентная диаграмма факторов для пунктов наблюдений на реках, отражающих режим 4 основных речных бассейнов в пределах территории Беларуси

Особенности изменения режима увлажнения. Факторный анализ показал, что сток летне-осенней межени в большинстве бассейнов рек страны связан с особенностями выпадения осадков в июле–сентябре. При этом летне-осенняя межень на реках территории Беларуси начинается в зависимости от метеорологических условий сезона, в марте–мае и продолжается до ноября–декабря, но минимальные значения уровней воды и стока отмечаются преимущественно в летние месяцы – июль–сентябрь. В связи с этим особенности режима увлажнения рассматриваются за период с мая по сентябрь.

Более ранние исследования режима увлажнения [9, 14, 17] показали отсутствие значимых изменений годовых сумм осадков на территории Беларуси. Согласно выполненным расчетам сумм осадков с мая по сентябрь за различные периоды отмечается временная и пространственная дифференциация их выпадения (табл. 1). В период 1989–2018 гг. в мае на всей территории и июле в центральной и южной частях страны отмечено увеличение осадков по сравнению с предшествующими периодами (1948–1988 и 1958–1988 гг.) в пределах 6–23 %. В июне и сентябре режим увлажнения характеризовался незначительным снижением месячных сумм осадков. В августе за последние 30 лет зафиксирован существенный недобор осадков в центральной части и на юге страны на 14–22 %. В пространственном отношении недобор осадков за рассматриваемый сезон отмечен на западе и юго-западе страны, и на востоке и центре Беларуси (рис. 3).

Таблица 1. Изменение (%) месячных сумм осадков за различные периоды, обобщенные по трем регионам территории Беларуси

Период	Район	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Май–сентябрь
1948–1988/1989–2018	Север	6	1	–2	–2	–4	–1
1958–1988/1989–2018		10	1	2	12	2	27
1948–1988/1989–2018	Центр	6	–6	10	–15	–1	–6
1958–1988/1989–2018		10	–8	13	–22	–1	–8
1948–1988/1989–2018	Юг	10	–5	17	–17	7	12
1958–1988/1989–2018		13	–7	23	–14	14	29

Примечание. Под изменением понимается разность месячных сумм осадков за периоды 1989–2018–1948(58)–1988 гг., выраженная в %.

Расчеты трендов месячных сумм осадков за период 1948–2018 г. (рис. 3) в мае показали увеличение месячных сумм осадков в пределах 2–3 мм за десятилетие, лишь на западе и частично в центральном регионе тренды осадков в мае отрицательные до –1...–2 мм за десятилетие. В июне для западной и центральной части страны получены отрицательные тренды до –4 мм за десятилетие, на юге и севере преобладают положительные тренды от 1 до 7 мм за десятилетие.

В июле отмечается наибольший рост осадков в рассматриваемый период – на большинстве станций положительные тренды составляют 6–10 мм за десятилетие. В августе режим увлажнения характеризовался отрицательными трендами –1...–4 мм за десятилетие в центральной и южной части страны, в северной части – положительные тренды в пределах 1–2 мм за десятилетие. В сентябре установлены отрицательные тренды месячных сумм осадков, которые составляют от –1...–3 мм за десятилетие в северной и центральной (бассейн Березины) части страны, на остальной территории преобладают положительные тренды до 1–2 мм за десятилетие.

Для более детального анализа режима увлажнения рассмотрены колебания максимальных сумм осадков за сутки и продолжительность выпадения осадков в период с мая по сентябрь. Установлено, что в мае–сентябре отмечается в основном снижение продолжительности выпадения осадков по территории страны: суммарно на 5–12 ч, при средних многолетних значениях

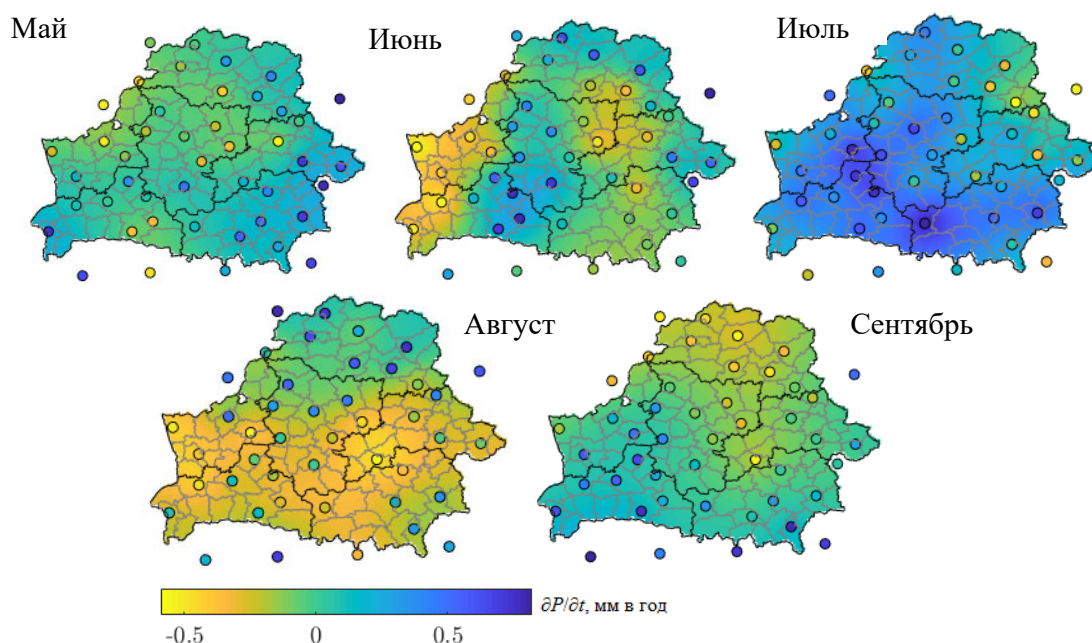


Рис. 3. Величины трендов (мм в год) месячных сумм осадков за период 1948–2018 гг. (точки на карте показывают станционные данные, фон – интерполированные данные)

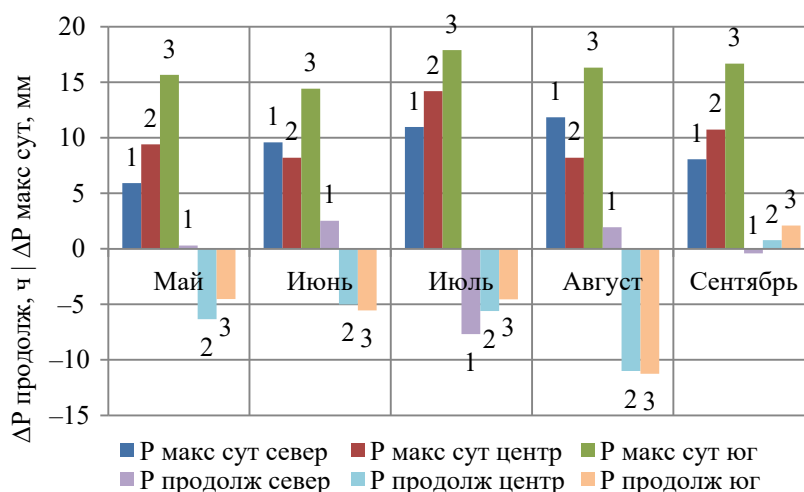


Рис. 4. Величины изменения максимальных сумм осадков за сутки (мм) и продолжительности выпадения осадков (ч) за периоды 1958–1988/1989–2018 гг. по территории Беларуси, условно разделенной на три части: 1 – север, 2 – центр, 3 – юг

в пределах 45–55 ч. Лишь на севере Беларуси в большинстве из рассматриваемых месяцев продолжительность осадков сохранилась на прежнем уровне (рис. 4). На фоне снижения продолжительности выпадения осадков зафиксировано увеличение максимальных сумм осадков за сутки (рис. 4), величины которых возросли по всей территории страны в мае–сентябре.

Рост максимальных сумм составляет от 5 до 18 мм (при средних многолетних значениях до периода потепления 16–25 мм, увеличение составило около 30 % во все рассматриваемые месяцы), наибольший рост отмечен в июле для всех станций, и наиболее значительное увеличение суточных максимумов осадков зафиксировано в южной части страны.

Уменьшение продолжительности выпадения осадков и рост максимальных сумм осадков может свидетельствовать об увеличении продолжительности периодов без осадков и более частом формировании засушливых условий. Эту гипотезу подтверждает анализ стандартизированных индексов осадков SPI-1, согласно которым в период потепления отмечается рост повторяемости метеорологических засух на территории страны (табл. 2).

Повторяемость сильных засух (SPI-1 < -1,5) в период 1948–1988 гг. и 1958–1988 гг. с мая по сентябрь отмечалась в 20–43 % лет, в период потепления (1989–2018 гг.) в 31–62 % лет. Экстремальные засухи (SPI-1 < -2,0) отмечались в период 1948–1988 и 1958–1988 гг. в 7–23 % лет, в период потепления климата экстремальные метеорологические засухи отмечены в 14–31 % лет периода потепления.

Таблица 2. Повторяемость (%) сильных и экстремальных метеорологических засух, определенных на основе индекса SPI-1

Станция	SPI-1 < -1,5			SPI-1 < -2		
	1948–1988	1958–1988	1989–2018	1948–1988	1958–1988	1989–2018
Брест	28	23	31	13	7	14
Гродно	33	30	48	13	17	27
Горки	33	37	31	15	20	24
Марьино Горка	43	33	52	15	7	28
Минск	35	33	41	18	13	14
Пинск	30	27	41	13	10	14
Полесская	25	20	62	15	10	21
Шарковщина	40	37	59	18	13	31
Василевичи	40	43	35	20	23	17
Верхнедвинск	30	23	52	13	13	24

Таким образом, при отсутствии значимых трендов годовых сумм осадков в период 1989–2018 гг., осадки теплого периода (май–сентябрь) характеризуются пространственной неоднородностью, при этом снижается продолжительность их выпадения на 10–20 % (за исключением севера страны) и рост максимальных сумм осадков на 30 % во все месяцы, что свидетельствует об увеличении повторяемости засушливых периодов и подтверждается расчетами индексов SPI, которые показали рост повторяемости сильных и экстремальных засух в воздухе в период потепления климата.

Особенности изменения режима минимального стока. Детальная оценка формирования минимального стока рек Беларуси приведена в работе [13]. Авторами установлено, что минимальный летне-осенний сток в период 1966–2000 гг. по сравнению с 1932–1965 гг. увеличился на большинстве рек Беларуси. Снижение минимального стока отмечено лишь на реках бассейна Западного Буга и верховье бассейна Припяти. Анализ формирования дождевых паводков и их связь с максимальными суммами осадков представлен в [16], который показал, что на реках бассейнов Западной Двины, Немана и Днепра в период 1966–2010 гг. отмечается уменьшение величины дождевых паводков, в бассейне Припяти – в основном увеличение на 10–20 %.

С учетом накопленных материалов наблюдений и в связи с изменениями в структуре выпадения осадков в последние 30 лет, которые свидетельствуют о нарастании экстремальности климата, требуется проведение современной оценки режима увлажнения в период изменения климата и комплексного анализа влияния этих изменений на формирование речного стока.

За последние три десятилетия в связи со значительным увеличением температуры воздуха ($\Delta T_{\text{ср.год}} +1,3$ °C), и особенно в зимний период ($\Delta T_{12-2} +2,1...2,4$ °C), изменились сроки наступления и окончания фаз гидрологического режима. В связи с преобладанием оттепельного характера погоды зимой и увеличением доли зимнего стока и, как следствие, снижением доли весеннего стока и более раннего завершения весеннего половодья, начало летне-осенней межени сдвинулось на более ранние сроки [17]. Смещение дат начала меженного сезона для рек бассейна Западной Двины составило за период 1989–2018 гг. 7–22 дня, рек бассейнов Немана и Западного Буга – 6–13 дней, рек бассейна Днепра – 3–11 дней, рек бассейна Припяти – 4–22 дня. Наиболее ранние даты начала летне-осенней межени пришлись на середину–конец марта (1989, 1995, 1997, 2008), а на реках бассейна Западного Буга раннее начало летне-осенней межени отмечено в 2008 г. в середине февраля. Продолжительность летне-осенней межени во всех речных бассейнах на территории Беларуси увеличилась в среднем на 12–29 дней. Поздние даты окончания периода летне-осенней межени приходятся на конец декабря–середину января (2007, 2012). На реках всех бассейнов, кроме рек бассейнов Немана и Западного Буга, по сравнению с периодом до 1989 г. незначительно увеличилась доля летнего и осеннего стока.

Несмотря на положительные тренды месячных сумм осадков в мае и июле и увеличение интенсивности выпадения осадков, рост высоты дождевых паводков в теплый период года отмечается лишь в бассейнах рек Западной Двины и Днепра (рис. 5). В бассейне Немана отмечается значительное снижение высоты дождевых паводков, что связано с недобором осадков в период 1989–2018. В бассейне Припяти на главной реке отмечается небольшой рост высоты дождевых паводков, на притоках – снижение.

С другой стороны, изменение структуры выпадения осадков в последние десятилетия обусловили более частые периоды низкой водности в летне-осенний сезон. В годы, предшествующие периоду потепления, уровни воды летне-осенней межени были выше по сравнению с уровнями зимней межени [3, 17]. Но в связи с преобладанием оттепельного характера погоды в последние годы, уровни зимней межени превышают уровни летне-осенней, наблюдается тенденция снижения величины уровней летне-осенней межени в среднем на 32 см.

Формирование опасно низких уровней воды (ниже навигационных отметок) на реках страны отмечались в 1995, 1996, 2002–2005, 2007, 2010–2018 гг. или в 15 годах из 30 лет периода потепления. В среднем продолжительность стояния опасно низких уровней составляет от 3 (Припять – Мозырь, 1996) до 205 (Днепр – Могилев, 2018) дней. Понижение уровней воды ниже опасного низкого значения составило от 2 см (Березина – Светлогорск, 2011) до 147 см (Днепр – Могилев, 2015).

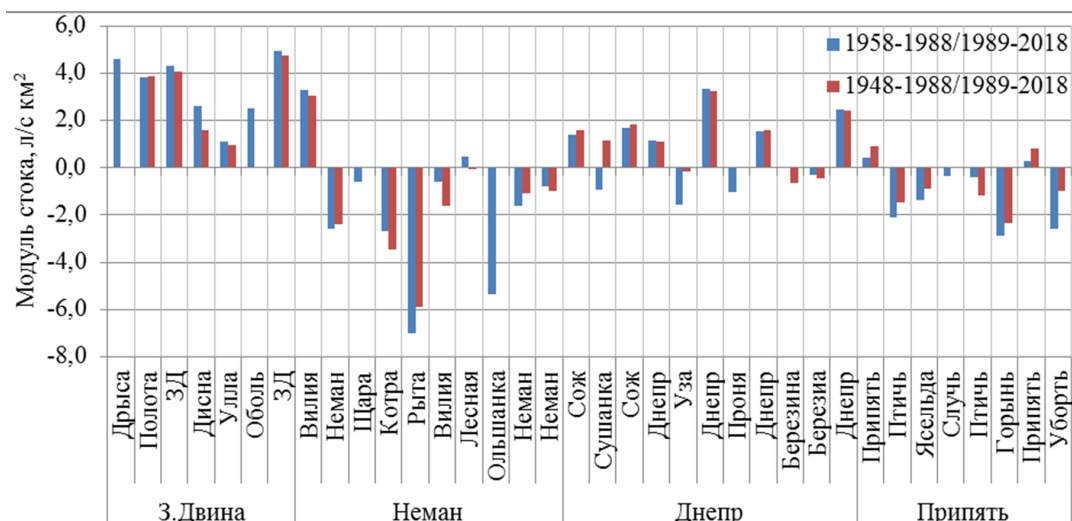


Рис. 5. Разности модулей наибольшего расхода воды (л/с км²) во время прохождения дождевого паводка в теплый период года за различные периоды

Оценка частоты периодов низкой водности на реках страны в летне-осенний период выполнена на основе стандартизированных индексов речного стока (SSFI). Для проверки частоты маловодных периодов, связанных с засушливыми явлениями в атмосфере, использованы среднемесячные расходы воды за май–сентябрь, на основе которых были рассчитаны индексы SSFI-1 (за каждый месяц с мая по сентябрь). Затем были отобраны индексы в диапазоне SSFI-1 < -0,5...-2,0. Отобранные индексы разделены по градациям за равные 30-летние периоды (рис. 6).

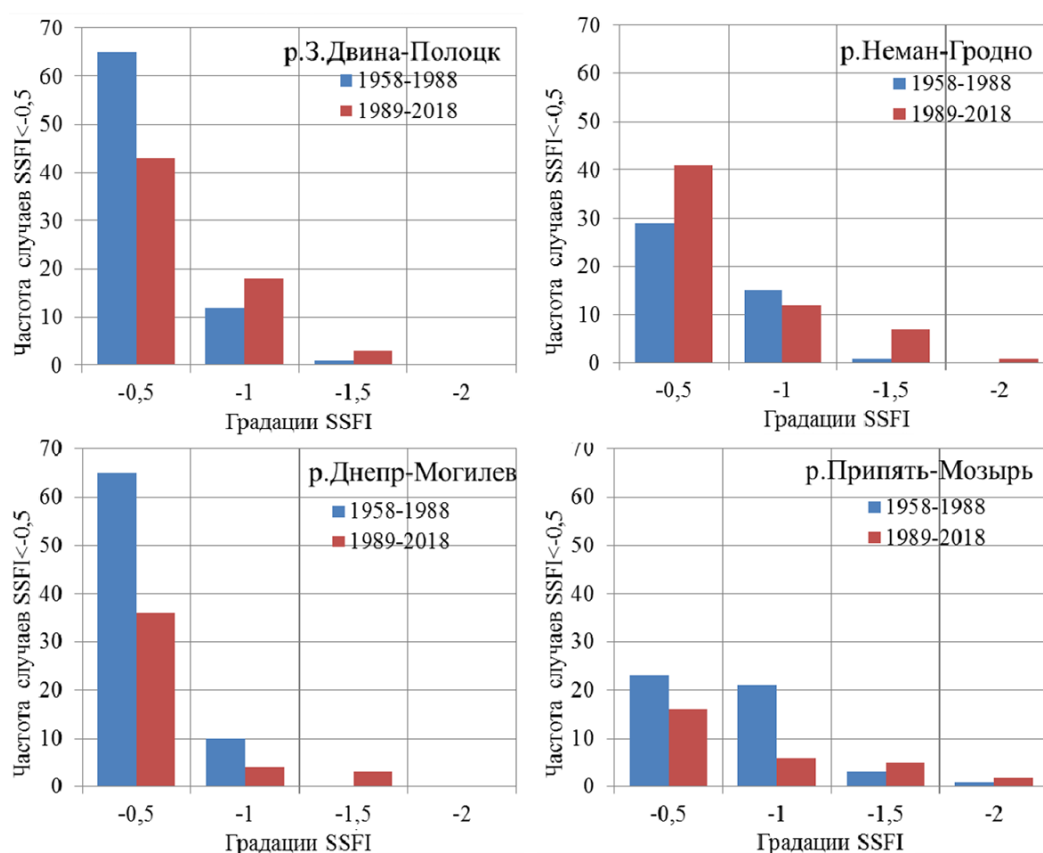


Рис. 6. Количество гидрологических засух различных градаций согласно значениям стандартизированного индекса стока (Standart Streamflow Index, SSFI) за различные периоды

Наиболее часто в течение 1958–2018 гг. маловодные периоды отмечались в бассейнах рек Западной Двины и Днепра, при этом слабовыраженные засухи ($SSFI-1 < -0,5$) наблюдались более часто в период, предшествующий потеплению. Реже низкая водность характерна для бассейнов Немана и Припяти. При этом в бассейне Немана слабовыраженные гидрологические засухи в период потепления отмечались чаще по сравнению с предшествующим периодом на 25 %, что объясняется недобором осадков на западе страны (рис. 3). Сильные и экстремальные засухи ($SSFI-1 < -1,5 \dots -2,0$, повторяемостью 1 раз в 20 и 50 лет соответственно [10]) для территории Беларуси менее характерны, но в период потепления климата стали отмечаться на реках страны. Во всех речных бассейнах их повторяемость возросла в 1,5–2 раза в последние десятилетия и составила от 2 до 8 случаев за последние 30 лет, наибольшее увеличение числа случаев сильной засухи отмечено в бассейне Немана (+8).

Таким образом, отмечено незначительное увеличение доли летне-осеннего стока в годовом объеме стока в бассейне рек Днепра и Припяти, но в то же время отмечается увеличение повторяемости очень маловодных периодов во всех речных бассейнах, и одновременно увеличение высоты дождевых паводков и/или рост наименьших расходов воды периода открытого русла (кроме бассейна Немана).

Взаимосвязь между метеорологическими и гидрологическими параметрами. Изменение условий увлажнения территории страны и речного стока в мае–сентябре в течение периода потепления (1989–2018) характеризуется дифференциацией во времени и пространстве (табл. 3). В бассейне реки Западной Двины, где отмечается увеличение месячных сумм осадков по сравнению с предшествующим 30-летним периодом, установлено увеличение повторяемости метеорологических засух на 30–50 %. Доля летне-осеннего стока значимо не изменилась вследствие компенсации роста числа сильных гидрологических засух увеличением высоты дождевых паводков теплого периода, что объясняется возрастанием продолжительности периодов без осадков и одновременным ростом суточных максимумов осадков.

Т а б л и ц а 3. Сводная таблица результатов обобщения метеорологических и гидрологических показателей увлажнения теплого периода

Речной бассейн	Суммарное изменение осадков за май–сентябрь	Доля летне-осеннего стока	Наименьший расход летне-осеннего периода	Метеозасухи (сильные)	Гидро-засухи (сильные)	Наибольший расход дождевого паводка
Западная Двина	До +27 %	-1...+1 %	Незначимые положительные тренды 1948–2018 гг.	На 30–50 % чаще	+1	+1,0...4,7 л/с км ²
Неман	До -8 %	-1...+1 %	Незначимые отрицательные тренды 1948–2018 гг.	На 30 % чаще	+1	-1,1...-5,9 л/с км ²
Днепр	В верхней и нижней частях бассейна +20 % В средней до -8 %	+1...+4 %	Положительный тренд за 1948–2018 гг.	На 30 % чаще	0	+1,1...3,2 л/с км ²
Припять	До +29 %	+1...+2 %	Положительный тренд за 1948–2018 гг.	На 50 % чаще	+3	-0,9...-2,4 л/с км ² на главной реке: +0,8...0,9 л/с км ²

П р и м е ч а н и е. Изменение показано за период 1989–2018 гг. по отношению к 1948(58)–1988 гг.

В бассейне Немана зафиксирован значительный недобор осадков в период потепления по сравнению с предшествующими периодами. Наиболее значимый дефицит осадков наблюдался в августе, частота метеорологических засух увеличилась в бассейне Немана на 30 %, наиболее значительно по сравнению с другими речными бассейнами увеличилась частота гидрологических засух: возросло число умеренных засух, что характерно только для бассейна Немана и отмечен самый значительный прирост числа сильных засух. На некоторых реках снизилась

доля летне-осенней межени и на большинстве рек существенно снизилась высота дождевых паводков теплого периода.

В бассейне Днепра верховье и нижняя часть характеризуются достаточным увлажнением в период потепления, в средней части отмечен недобор осадков за период май–сентябрь (бассейн Березины). Доля летне-осеннего стока по бассейну характеризуется увеличением (кроме Березины). Отмечается увеличение повторяемости сильных метеорологических (на 30 %) и гидрологических засух (+3), которые ранее в бассейне не фиксировались. Характерной особенностью для бассейна является увеличение значений наибольших расходов воды во время прохождения теплых дождевых паводков и наименьших расходов воды периода открытого русла.

В бассейне Припяти отмечено в целом увеличение осадков, несмотря на небольшой недобор осадков в июне и значительный недобор в августе (табл. 3), и увеличение частоты сильных метеорологических засух на 50 %. Доля летне-осенней межени значимо не изменилась, но отмечается увеличение значений наименьших расходов воды в период открытого русла и некоторое увеличение высоты дождевых паводков на главной реке и снижение их на притоках.

Выводы. Несмотря на отсутствие значимых изменений в режиме осадков в годовом разрезе в период потепления климата, отмечается трансформация структуры выпадения осадков в теплый период года (май–сентябрь) – значимый рост в мае и июле в центральной и южной частях страны и снижение в августе.

Пространственное распределение осадков в период 1989–2018 гг. характеризуется увеличением осадков (по сравнению с предшествующим 30-летним периодом) на севере страны в период май–сентябрь, что вызвало рост высоты дождевых паводков и компенсировало увеличение числа метеорологических и гидрологических засух в бассейне Западной Двины.

В бассейне Немана отмечено снижение осадков и наибольший рост числа метеорологических засух, как следствие, снизилась высота дождевых паводков, на некоторых реках снизилась доля летне-осеннего стока в годовом гидрологическом цикле, наблюдаются слабые отрицательные тренды наименьших расходов воды периода открытого русла.

В бассейне Днепра в целом режим увлажнения характеризуется приростом осадков, что обусловило рост высоты дождевых паводков (кроме бассейна Березины), положительные тренды наименьших расходов воды и увеличение доли летне-осенней межени, несмотря на увеличение числа засух.

В бассейне Припяти зафиксировано увеличение осадков и одновременно рост числа засух вдвое по сравнению с предшествующим периодом наблюдений. Несмотря на положительную динамику сумм осадков, высота дождевых паводков на большинстве рек снизилась, что можно объяснить морфологическими особенностями бассейна – плоским рельефом и высокой заболоченностью. Увеличение осадков выразилось в небольшом увеличении доли летне-осеннего стока и положительных трендах наименьших расходов воды периода открытого русла.

Список использованных источников

1. *Логинов, В. Ф.* Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник: 2-е изд. доп. – Минск: Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
2. *Волчек, А. А.* Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев. – Брест: Альтернатива, 2017. – 240 с.
3. Гидрологический мониторинг Республики Беларусь: под ред. А. И. Полищука, Г. С. Чекана. – Минск: Книгазбор, 2009. – 260 с.
4. Особенности формирования водности рек Беларуси в последние десятилетия / И. С. Данилович [и др.] // Природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 5–12.
5. Science for Disaster Risk Management 2017: Knowing Better and Losing Less', EUR 28034 EN / K. Poljanšek [et al.]. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.
6. Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections', JRC Technical Report / J. Spinoni [et al.]. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC100394/lb-na-27748-en-n.pdf>
7. Filling the White Space on Maps of European Runoff Trends: Estimates from a Multi-Model Ensemble / K. Stahl [et al.] // Hydrology and Earth System Sciences 16. – 2012. – N 7 (11 July). – P. 2035–2047. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2035-2012>
8. *Gudmundsson, L.* Observation-Based Gridded Runoff Estimates for Europe (E-RUN Version 1.1) / L. Gudmundsson, S. I. Seneviratne // Earth System Science. Data 8. – 2016. – N 2 (7 July). – P. 279–295.

9. Оценка влагозапасов и повторяемости почвенных засух на территории Белорусского Полесья в период современного потепления климата / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2020. – № 2. – С. 104–114.
10. WMO and GWP, 'Handbook of Drought Indicators and Indices', Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series, WMO-No. 1173. – Geneva: World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016.
11. The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended / M. Hayes [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2011. – Vol. 92(4). – P. 485–488.
12. *Guttman, N. B.* Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index / N. B. Guttman // Journal of the American Water Resources Association. – 1998. – Vol. 34(1). – P. 113–121.
13. *Волчек, А. А.* Минимальный сток рек Беларуси / А. А. Волчек, О. И. Грядунова. – Брест: БрГУ, 2010. – 300 с.
14. *Логинов, В. Ф.* Водный баланс речных водосборов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск: Тонпик, 2006. – 160 с.
15. *Данилович, И. С.* Особенности режима увлажнения территории Беларуси в связи с изменяющимся климатом / И. С. Данилович, В. И. Мельник // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 12–14 сент. 2019 г. – Брест, 2019. – С. 208–211.
16. *Волчек, А. А.* Паводки на реках Беларуси / А. А. Волчек, Т. А. Шелест; Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина. – Брест: БрГУ, 2016. – 199 с.
17. Разработать прогноз состояния окружающей среды Беларуси на период до 2035 года : отчет о НИР (промежут.) / Институт природопользования НАН Беларуси: рук. В. С. Хомич. – Минск, 2020. – 315 с. – № ГР 20192690.

Поступила 29.01.2021