

УДК 556.166:551.577.38:551.578.3

РЕЗКИЕ ПЕРЕХОДЫ В СИСТЕМЕ «ВЕСЕННЕЕ ПОЛОВОДЬЕ – ЗАСУХА – ДОЖДЕВОЙ ПАВОДОК»

О. П. Мешик¹, А. А. Волчек², С. И. Парфомук³, С. В. Сидак⁴, М. В. Борушко⁵,
А. С. Протасевич⁶, Ю. П. Коляда⁷

¹ К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: omeshik@mail.ru

² Д. г. н., профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

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

⁴ К. г. н., старший преподаватель кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

⁵ Магистр, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail borushko.marina@mail.ru

⁶ Магистр, заместитель декана по идеологической и воспитательной работе факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: protasevichnastua@gmail.com

⁷ Магистр, старший преподаватель кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: julagirodniuk99@gmail.com

Реферат

В статье рассматривается гипотеза о том, что в Белорусском Полесье все чаще возникают резкие переходы в системе «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок». Эти переходы объясняются сочетанием трех причин. Во-первых, весна становится теплее и приходит раньше, половодье начинается и заканчивается раньше обычного, а затем быстро растёт испаряемость (PET), и почва резко теряет влагу. Во-вторых, для Полесья важным антропогенным фактором является осушительная мелиорация, которая обеспечивает быстрый отвод воды после половодья, влагозапасы к началу лета существенно снижаются. В-третьих, в теплый период возможны сильные ливни, которые на фоне сухой почвы и развитой гидрографической сети быстрее превращаются в поверхностный сток и создают риск дождевых паводков. Гипотеза проверена по данным р. Припять (створ Мозырь) и метеостанции Василевичи. Засушливость оценивалась суточным индексом SPEI30 (30-дневный водный баланс P–PET), а сильные ливни выделялись по порогам P95 = 12,1 мм/сут и P99 = 25,0 мм/сут (апрель – октябрь). Показано, что в 1991 году произошла статистически значимая перестройка режима: половодье стало начинаться раньше (тренд примерно – 4,7 дней за 10 лет; $p = 0,0007$). После окончания половодья засуха нередко наступает в течение 1–2 месяцев ($fast60 \approx 0,74$), а экстремальные осадки после засушливых периодов в период современного потепления выпадают чаще и интенсивнее. Полученные результаты важны для раннего предупреждения рисков наводнений и засух для управления водным режимом мелиорированных земель территории Белорусского Полесья.

Ключевые слова: Белорусское Полесье, наводнение, весеннее половодье, засуха, дождевой паводок, резкие переходы, потенциальная испаряемость, водный баланс, экстремальные осадки, лаг перехода, режимный перелом.

ABRUPT TRANSITIONS IN THE SYSTEM “SPRING FLOOD – DROUGHT – RAIN-INDUCED FLOOD”

O. P. Meshik, A. A. Volchak, S. I. Parfomuk, S. V. Sidak, M. V. Borushko, A. S. Protasevich, Ju. P. Koljada

Abstract

This study considers the hypothesis that rapid regime shifts in the sequence "spring flood → drought → rain-induced flood" system are occurring more frequently in the Belarusian Polesie. These transitions are explained by three interacting factors. First, spring is becoming warmer and arriving earlier advancing earlier onset and conclusion of spring floods followed by a rapid rise in potential evapotranspiration (PET) causing the soil to lose moisture sharply. Second, an important anthropogenic factor in Polesie is drainage reclamation which accelerates post-flood water runoff severely reducing moisture reserves by early summer. Third, during the warm season, intense rainfall events are possible which, exacerbated by dry soils and an extensive drainage network, more quickly generate surface runoff creating the risk of flash floods. The hypothesis was validated using data from the Pripyat River (Mozyr gauge) and the Vasilevichi meteorological station. Drought conditions were assessed using the daily SPEI30 index (30-day water balance P–PET) and heavy rainfall was identified using thresholds of P95 = 12,1 mm/day and P99 = 25,0 mm/day (April–October). The assessment shows that a statistically significant regime shift occurred in 1991 with spring floods now beginning earlier (the trend of approximately – 4,7 days per decade; $p = 0,0007$). After the end of the spring flood, drought often sets in within 1–2 months ($fast60 \approx 0,74$) and extreme rainfall events after drought periods during the current warming are becoming more frequent and intense.

These findings are critical for the early warning of flood and drought risks for adaptive water management of reclaimed lands in the Belarusian Polesie.

Keywords: Belarusian Polesie, flood, spring flood, drought, rainfall flood, abrupt transitions, potential evapotranspiration, water balance, extreme precipitation, transition lag, regime shift.

Введение

Наметившееся с конца XX века глобальное потепление оказывает большое влияние на гидрологический цикл и, как результат, на динамику речного стока. Изменение водного режима рек оказывает непосредственное воздействие на функционирование водных экосистем через изменение величин, продолжительности, времени

прохождения, частоты и скорости изменения расходов воды в реке. В условиях устойчиво меняющегося климата и постоянно меняющейся антропогенной нагрузки на водные ресурсы, актуальная гидрологическая информация по продолжительности половодья, максимальным расходам воды, продолжительности и интенсивности перехода от половодий/паводков к засухам, и наоборот, выступает

Геозкология

в качестве важного экономического фактора, который помогает субъектам хозяйствования выбрать правильную стратегию развития, своевременно принять защитные меры для предотвращения ущерба от неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений.

В последние годы в научной и прикладной повестке управления водными рисками все чаще обсуждается не только рост частоты отдельных экстремумов (наводнений либо засух), но и учащение их последовательных сочетаний – резких переходов от очень влажных фаз (половодий, дождевых паводков) к дефициту влаги (почвенной и гидрологической засухе) и обратно. В международной литературе такие «хлыстовые» смены режимов описывают как *hydroclimate/hydrological whiplash* или *hydroclimate volatility* – переходы между «очень сухо» и «очень влажно» на внутрисезонных и межгодовых масштабах. Современные исследования показывают, что усиление гидролого-климатической изменчивости связано с антропогенным потеплением: ростом влагосодержания атмосферы и потенциальной интенсивности осадков, смещениями траекторий циклонов и блокирующими антициклонами, а также повышением испаряемости и усилением обратных связей «почвенная влага – температура». В результате появляется риск ситуаций, когда системы водопользования и защиты от наводнений переключаются между взаимоисключающими режимами управления, испытывая дефицит времени на адаптацию [1].

Проблема резких переходов имеет отчетливо выраженный международный и национальный характер. По оценкам Всемирной метеорологической организации (ВМО), водные опасности в последние годы развиваются на фоне рекордных температур, что приводит к одновременному усилению рисков как засух (через рост испаряемости и дефицит влаги), так и половодий/паводков (через экстремальные осадки и поверхностный сток). Отчет ВМО по глобальным водным ресурсам отмечает, что водный режим становится более изменчивым: наблюдаются сильные аномалии речного стока и почвенной влаги, а также рост значимости мониторинга и раннего предупреждения для управления ущербом [2]. На этом фоне формируются и методические направления анализа последовательных экстремумов: обсуждаются критерии выделения переходов «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок», сравнимость алгоритмов и чувствительность результатов к выбору порогов и временных шкал [3].

С научно-методической точки зрения исследование резких переходов опирается на быстро развивающееся направление анализа последовательных гидрологических экстремумов. Важный вклад внесли работы, которые формализуют понятие резкого перехода и показывают, что результаты сильно зависят от выбора порогов, временного сглаживания, индикаторов и источников данных; это особенно критично при сравнении регионов и оценке трендов. В работе [4] подчеркивается, что прогнозирование и моделирование засух и паводков сталкивается с общими проблемами данных, понимания процессов, неопределенностей моделей и взаимодействия в системе «человек – вода», а значит требует интегрированных подходов. В итоге, «whiplash»-подход выступает как методологическая связь между классическими школами гидрологии суши (паводкообразование, русловые процессы и др.) и климатологией засух (метеорологические и почвенно-гидрологические механизмы, индексы SPI/SPEI и др.).

Для Европы исследование резких переходов особенно важно из-за высокой плотности населения и инфраструктуры, большой доли интенсивного землепользования и водозависимых отраслей экономики. Европейская оценка климатических рисков (EUCRA) фиксирует широкий спектр угроз для водных ресурсов, продовольственной безопасности, инфраструктуры и экосистем, подчеркивая необходимость стратегий адаптации, учитывающих каскадные и составные эффекты, включая последовательные засухи и наводнения [5]. В отчетах о состоянии климата в Европе отмечается, что 2024 год сопровождался широко распространенными наводнениями и сильными штормами на фоне рекордного тепла, при этом сохранялись контрасты влажных и сухих условий в разных частях континента, что соответствует логике роста гидролого-климатической изменчивости [6, 7]. Экономические последствия гидролого-климатических явлений существенны: в Европе наводнения исторически дают значительную долю прямого ущерба от погодных экстремумов, а ущерб от засух все чаще проявляется через потери урожая, ограничения водопользования, ухудшение состояния экосистем и повышение пожароопасности.

Международная исследовательская повестка по резким переходам активно развивается также в Китае, где переходы «засуха → дождевой паводок» рассматриваются как фактор риска для сельского хозяйства, водного хозяйства и качества воды. Показателен рост числа научных работ, посвященных оценке частоты и интенсивности исследуемых явлений на глобальном уровне и в условиях изменения климата, а также развитию статистических методов для оценки редких событий и рисков. В частности, в работе [8] показано усиление сухо-влажных резких чередований на глобальном фоне потепления, обсуждаются взаимосвязи и региональные особенности, что делает эту работу важной для сопоставления регионов Восточной Азии и Европы, в частности Беларуси. Развитие методического инструментария показывает работа [9], предлагающая подходы к оценке частоты и сочетаний экстремумов через «обратные» распределения и копулы, что важно для оценки риска резких переходов. Параллельно развиваются исследования связанных экстремумов (например, «сильная жара – засуха») и их последствий для социо-экосистем [10].

Белорусское Полесье представляет собой один из наиболее репрезентативных регионов Восточной Европы для анализа резких переходов, поскольку сочетает пойменно-болотную морфологию, высокую роль сезонности и русловых процессов в бассейне р. Припять, многолетнюю антропогенную трансформацию водосборов рек (мелиорация, гидротехническое строительство, распашка земель и др.) [11]. Сильные половодья и дождевые паводки могут быть скоротечными (с ограниченным пополнением почвенных влагозапасов, питанием грунтовых вод), а затем при установлении антициклонов и высокой испаряемости быстро формируются дефициты влаги и маловодье. В обратном направлении, после засушливого периода происходит деградация структуры поверхности почвы (корка, уплотнение), деградация растительного покрова, что повышает долю поверхностного стока при первых интенсивных осадках и ведет к «быстрым» дождевым паводкам.

Региональные исследования Полесья и бассейна Припяти показывают значимость как многоводий, так и маловодий для природных и хозяйственных систем региона. В работах белорусской гидрологической школы (А. А. Волчек и др.) рассматривается формирование наводнений на территории Полесья и подчеркивается роль региональных условий и режимных особенностей в развитии опасных уровней и расходов воды [12, 13]. Анализ рисков и трансформации стока в бассейне Припяти и водных ресурсов Белорусского Полесья в современных условиях [14, 15] дополняет картину оценкой изменений компонентов водного режима, важных для прогноза водообеспеченности и гидролого-климатических экстремумов. Значимый междисциплинарный аспект связан с торфяно-болотными экосистемами Полесья, в ряде работ по пожарной опасности и деградации ландшафтов отмечается, что необычно сухие периоды и трансформация гидрологического режима (включая снижение выраженности традиционных весенних разливов) могут усиливать восприимчивость к пожарам и деградации природных комплексов [16]. На уровне управления рисками Беларусь рассматривается международными институтами как страна, испытывающая разнообразные гидролого-климатические опасности (в том числе сильные ливни, засухи, пожары), что подчеркивается, например, в дорожной карте Всемирного банка по укреплению гидрометеослужб и систем раннего предупреждения [17].

Таким образом, актуальность исследования резких переходов между половодьями, засухами и паводками для Белорусского Полесья определяется одновременно глобальными тенденциями роста гидролого-климатической изменчивости и региональной спецификой водосбора Припяти, где природные пойменно-болотные ландшафты и антропогенно преобразованная территория могут ускорять смену режимов экстремальной теплообеспеченности. Настоящая работа позиционирует анализ территории Белорусского Полесья в международном контексте, используя современную методологию определения последовательных экстремумов, оценки ущерба и климатических рисков, опираясь на региональную белорусскую эмпирическую базу по наводнениям, половодьям, паводкам, водным и климатическим ресурсам.

Материалы и методы

Объект исследования – бассейн р. Припять и ее отдельные притоки, характеризующиеся выраженной сезонностью стока и значимой ролью весеннего половодья.

Исследование выполнено для территории Белорусского Полесья на основе совмещения данных гидрологических и метеорологических рядов наблюдений. Гидрологический блок включает: данные о расходах воды (Q) р. Припять в створе г. Мозырь за период наблюдений с 1882 по 2018 гг., фенологические характеристики весеннего половодья по створу Мозырь – дату начала половодья и продолжительность половодья в сутках. Метеорологический блок включает суточные (1960–2025 гг.) и месячные значения (1882–2025 гг.) атмосферных осадков (P) и температуры воздуха (T) по ближайшей репрезентативной метеостанции Василевичи.

Календарные преобразования и сезонная шкала (DOY)

Для фенологического описания половодья календарные даты переводились в порядковый день года *day-of-year* (DOY), что обеспечивает корректное сравнение сезонных сдвигов между годами и используется при стандартизации сезонности индексов засухи [18].

$$DOY = (\text{дата} - 1 \text{ января данного года}) + 1, \quad (1)$$

где DOY – порядковый день года (1...365/366).

DOY позволяет выявлять тренды в сроках начала половодья и корректно сравнивать внутрисезонные параметры между годами.

Фенология весеннего половодья

Для анализа климатических факторов, предшествующих половодью и сопровождающих его, задавались фиксированные окна: предполоводный период: 7, 10, 15 и 30 суток до даты начала половодья; период половодья от даты начала до даты окончания (включительно); послеполоводный период (для оценки резких переходов к дефициту влаги): 30, 60 и 90 суток после окончания половодья.

Такая схема позволяет оценивать как триггеры запуска половодья, так и условия, приводящие к быстрому развитию засушливости после прохождения пика половодья.

Для каждого года (y) задавались: день года начала половодья (DOY_{start(y)}) и длительность (dur(y)). Окончание половодья вычислялось по формуле

$$DOY_{\text{end}(y)} = DOY_{\text{start}(y)} + \text{dur}(y) - 1, \quad (2)$$

где DOY_{end(y)} – день года окончания половодья.

Дата окончания половодья нами используется как «точка отсчета» для вычисления лага перехода (половодье → засуха).

Потенциальная испаряемость (PET) и водный баланс P–PET

Потенциальная испаряемость PET оценивалась по методу Торнтвейта на месячных данных (m) с учетом широты станции, позволяющей скорректировать длину дня. Данный метод широко применяется при ограниченной метеорологической информации и его применение обосновывается рядом работ российских ученых [19 и др.], однако здесь могут иметь место систематические смещения относительно физически обоснованной стандартной международной методики *FAO Penman–Monteith* [20] (особенно при изменениях дефицита влажности воздуха, ветрового режима и облачности). Рассчитанные величины P–PET и производные индексы (SPEI30) интерпретируются в настоящем исследовании прежде всего как индикаторы относительной динамики влагодефицита и скорости переходов, а не как точная оценка испарения в миллиметрах. Формула Торнтвейта имеет вид [21]

$$PET_m = 16 k_m \left(10 \frac{T_m}{I}\right)^a, T_m > 0; PET_m = 0, T_m \leq 0. \quad (3)$$

Тепловой индекс (I) рассчитывается как

$$I = \left(\frac{T_1}{5}\right)^{1,514} + \dots + \left(\frac{T_{12}}{5}\right)^{1,514}. \quad (4)$$

Учитываются значения температур только при T_m > 0.

Показатель степени (a) определяется по формуле [21]

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 0,49239. \quad (5)$$

Климатический водный баланс определяется как

$$D_m = P_m - PET_m, \quad (6)$$

где D_m – водный баланс, мм; P_m – осадки, мм.

При полученных значениях D_m < 0 соответствует влагодефициту, D_m > 0 – избытку влаги.

Для внутрисезонного анализа месячная PET распределялась по дням месяца равномерно [20, 21]:

$$PET_{\text{day}(t)} = \frac{PET_m}{N_{\text{days}_m}}; D_{\text{day}(t)} = P_{\text{day}(t)} - PET_{\text{day}(t)}, \quad (7)$$

где t – номер дня во временном ряду; D_{day(t)} – суточный водный баланс, мм; P_{day(t)} – суточная сумма осадков, мм; PET_{day(t)} – суточная потенциальная испаряемость, мм.

Данное приближение позволяет выявить краткосрочные периоды влагодефицита при отсутствии суточной PET.

Индексы засухи SPI/SPEI и внутрисезонный индекс SPEI30

SPI (*Standardized Precipitation Index*) характеризует аномалии осадков на выбранном временном масштабе [22]. SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) расширяет SPI, используя баланс P–PET, и тем самым учитывает влияние потепления на засушливость [23]. Для исследования быстрых переходов в пределах сезона использован суточный индекс SPEI30 на 30-дневной шкале.

$$D30(t) = D_{\text{day}(t)} + D_{\text{day}(t-1)} + D_{\text{day}(t-2)} + \dots + D_{\text{day}(t-29)}, \quad (8)$$

где D_{day(t)} = P_{day(t)} – PET_{day(t)}.

D30 отражает накопленный за 30 суток влагодефицит/избыток влаги и служит основой стандартизованного индекса.

Для корректного сравнения D30 в разные дни года выполнена стандартизация сезонности непараметрической ранговой нормализацией по DOY [23]:

$$SPEI30(t) = \Phi^{(-1)}\left(\frac{\text{rank}(D30|DOY) - 0,5}{n_{DOY}}\right), \quad (9)$$

где Φ⁽⁻¹⁾ – обратная функция стандартного нормального распределения (квантиль нормального распределения); rank(D30|DOY) – ранг значения D30(t) среди всех лет для того же дня года DOY(t); n_{DOY} – число наблюдений (лет) для данного DOY.

Получаемый SPEI30 имеет следующую интерпретацию: около 0 – норма; ≤ -1 – умеренная засуха; ≤ -1,5 – сильная; ≥ +1 – влажные условия.

В работе [24] нами ранее проведен анализ индикаторов и индексов засух и в настоящем исследовании обосновано использование SPI и SPEI.

Экстремальные осадки и пороги P95/P99

Экстремальные суточные осадки оценивались непараметрическими порогами (процентилями) для теплого сезона (апрель – октябрь), что соответствует подходам к анализу экстремальных индексов осадков и кратковременных ливневых экстремумов [25, 26].

$$P95 = \text{Quantile}_{0,95}(P_{\text{day}}); P99 = \text{Quantile}_{0,99}(P_{\text{day}}), \quad (10)$$

Экстремальный дождь фиксируется при P_{day} ≥ P95 (или ≥ P99).

Диагностика резких переходов

Переход «весеннее половодье → засуха» определялся как лаг (в днях) от окончания половодья до первой даты после окончания половодья, когда SPEI30 ≤ -1,0 (умеренная засуха). Дополнительно анализировался порог SPEI30 ≤ -1,5.

$$\text{lag}_{\text{wd}(y)} = t_{\text{drought}(y)} - t_{\text{end}_{\text{flood}(y)}}, \quad (11)$$

где t_{end_{flood(y)}} – дата окончания половодья; t_{drought(y)} – первая дата после окончания половодья, когда SPEI30 ≤ порог.

Малые значения lag_{wd(y)} (например ≤ 30–60 дней) тракуются как быстрый переход к влагодефициту.

Переход «засуха → дождевой паводок» трактовался как климатическая предпосылка дождевого паводка: после засушливого периода (SPEI30 ≤ -1 длительностью ≥ 20 суток) в течение 90 суток фиксировалась первая дата экстремального дождя P_{day} ≥ P95. Однако для строгого гидрологического подтверждения паводка требуется сопоставление событий с суточным рядом расходов Q (время до пика и величина пика).

Тренды и смена режимов (MK+Sen и Pettitt)

Долгосрочные изменения фенологии половодья и производных индикаторов оценивались тестом Манна–Кендалла (значимость тренда) и наклоном Сенна (величина тренда) [27, 28].

$$\text{Sen} = \text{median}\left(\frac{(x_j - x_i)}{(t_j - t_i)}\right), \text{ для всех } i < j, \quad (12)$$

где i и j – индексы наблюдений во временном ряду.

Смена режима для ряда начала половодья DOY_{start} выявлялась тестом Петтитта [29]. Смена режима указывает на переход системы

формирования весеннего стока в иной режим сезонности (более раннее/позднее наступление половодной фазы).

$$U_t = 2 * \sum_{i=1}^t R_i - t * (n + 1),$$

$$K = \operatorname{argmax}_{1 < t <= n-1} \operatorname{abs}(U_t), \quad (13)$$

где R_i – ранг значения x_i среди всех $x_1 \dots x_n$ (от 1 до n); K – точка перелома.

Полученное малое значение (p) указывает на статистически значимый перелом.

Все вычисления выполнялись в единой аналитической среде Python с фиксированными параметрами обработки, порогами событий и правилами расчета индикаторов. Это обеспечивало сопоставимость полученных результатов между разделами анализа и воспроизводимость итоговых оценок.

Результаты исследования и их обсуждение

Половодье/наводнение и засуха в Беларуси (краткий обзор 2023 года)

В гидрологическом режиме Беларуси наибольшее практическое значение имеют периоды аномально высокой и аномально низкой водности, поскольку именно они определяют основные риски для населенных пунктов, транспортной инфраструктуры, сельскохозяйственных земель и водохозяйственных систем. Для равнинных речных бассейнов республики наиболее характерны весенние подъемы воды, однако в отдельные годы существенную роль начинают играть и дождевые паводки теплого периода. В последние десятилетия все более важным становится не изолированное рассмотрение отдельных экстремумов, а анализ их последовательной смены в пределах одного года.

К катастрофическим наводнениям на реках республики за период регулярных наблюдений относятся три наводнения. Одно из них произошло в 1931 году на реках Западная Двина, Днепр, Березина и Сож. Второе – в 1958 году на реках Неман и Щара. Кроме этого, для бассейна реки Припять катастрофическим стало наводнение 1845 года.

С 1990 года на территории Беларуси значительно увеличивается повторяемость засух в теплый период, увеличивается также площадь их распространения, интенсивность и продолжительность данных явлений [30]. Наиболее сильные засухи отмечались в Беларуси в 1992, 1999, 2002, 2010, 2015, 2018 гг. Следует отметить засуху в мае 2023 года, когда по республике выпало осадков около 19 % климатической нормы на фоне превышения климатической нормы температур воздуха на 1–2 °C.

События 2023 года можно рассматривать как показательный пример резкой сезонной перестройки гидролого-климатического режима. Именно поэтому дальнейший анализ этого года важен не только как описание отдельного экстремального сезона, но и как иллюстрация механизма перехода от избытка влаги к ее дефициту.

Половодье (наводнение) 2023 года

Предпосылки весеннего половодья 2023 года начали формироваться еще в конце 2022 года. Повышенное увлажнение предшествующего периода способствовало сохранению сравнительно высоких уровней воды уже в начале зимы и подготовило фон для дальнейшего усиления стока в бассейнах крупных рек.

Холодный сезон 2022–2023 гг. отличался повышенной гидролого-климатической изменчивостью. Серии оттепелей сопровождалась частичным таянием снежного и ледового покрова, что поддерживало большую зимнюю водность и ускоряло поступление воды в русловую сеть еще до развития основной фазы весеннего половодья.

Переход к основной фазе половодья произошел уже в марте при сочетании положительных температур воздуха и дополнительного атмосферного водного питания. Для большинства рек это выразилось в быстром формировании весенних максимумов, тогда как в бассейне Припяти повышение уровней фактически продолжало процессы, начавшиеся еще в зимние месяцы.

В период развития половодья до 70 % годового стока рек Беларуси прошла через русла за несколько весенних недель, при этом на многих реках наблюдались годовые максимумы.

Весенний подъем воды в 2023 году сопровождался повышенной водностью в ряде бассейнов (135–165 % от нормы), однако основные последствия носили преимущественно локальный характер. Воздействие проявлялось главным образом в подтоплении пойменных участков, прибрежных территорий и отдельных элементов дорожной сети, тогда как масштабных разрушительных последствий отмечено не было.

Ко второй половине апреля на большинстве рек началась фаза отчетливого снижения уровней воды до 40 см в сутки. При этом на отдельных участках пойменные территории еще сохраняли избыточное увлажнение, тогда как в бассейне Припяти инерционность половодного режима оставалась заметно выше.

По состоянию на 14–17 апреля 2023 года рост уровней воды продолжался в основном только в бассейне Припяти, тогда как на остальных реках доминировала фаза спада.

По продолжительности весенний подъем воды соответствовал обычной для территории пространственной дифференциации: на малых и средних реках активная фаза была сравнительно короткой (30–40 дней), тогда как на крупных водотоках, прежде всего в бассейне Припяти, повышенная водность сохранялась заметно дольше.

Хотя весеннее половодье 2023 года не носило катастрофического характера, уже вскоре после его завершения система перешла к фазе быстрого снижения водности. На фоне резкого дефицита атмосферных осадков и усиления суммарного испарения сложились условия для резкого перехода от весеннего избытка воды к ранне-летнему ее дефициту.

Засуха 2023 года

Весенне-летний сезон 2023 года характеризовался выраженным дефицитом влаги, который выделялся по интенсивности и пространственному охвату на фоне последних десятилетий. Существенную роль сыграло не столько суммарное годовое количество атмосферных осадков, сколько их резкое внутрисезонное перераспределение в сочетании с повышенным температурным фоном.

Март 2023 года был очень влажным (одно из первых мест по увлажнению за период наблюдений с 1945 года), а апрель по осадкам был близок к норме (около 39 мм, что составляет 102 %). С конца апреля до примерно 25 июня в большинстве районов страны осадки составили не более 10–30 % климатической нормы, что и сформировало основное «ядро» засухи 2023 года. Это привело к полному иссушению верхнего 10-см слоя почвы на большей части территории. Май 2023 года стал самым засушливым с 1945 года, в среднем по Беларуси выпало 12 мм осадков, или около 19 % климатической нормы. Предыдущий минимум (26 мм) был в 1971 году.

В целом за год по стране выпало 724 мм осадков (113 % нормы), но внутри года распределение было крайне неравномерным: весна – 121 мм (86 % климатической нормы), май – 12 мм (19 %). В мае дефицит осадков был повсеместным, особенно выраженным в центральных и южных регионах. В таблице приведена доля майских осадков от климатической нормы по областным центрам Беларуси.

Таблица 1 – Доля атмосферных осадков от климатической нормы мая, %

Брест	Витебск	Гомель	Гродно	Могилев	Минск
27	16	27	28	22	9

Среднегодовая температура воздуха в Беларуси в 2023 году составила примерно +8,7 °C, что выше климатической нормы на 1,5 °C и соответствует одному из самых теплых лет наблюдений.

На протяжении года температурный фон был выше нормы почти во все месяцы, включая весну и лето. Отмечалось много очень жарких дней летом, что усиливало испарение и усугубляло засуху.

В результате засухи погибло около 141 тыс. га посевов (менее 5 % посевной площади) и повреждено 368 тыс. га (около 15 %), главным образом зерновые культуры в южных областях.

Засуха вызвала снижение уровней грунтовых вод и маловодье рек. В отдельных населенных пунктах отмечалось пересыхание колодезев и ухудшение качества питьевой воды.

Значительно увеличились риски лесных и торфяных пожаров, ухудшилось состояние болотных и луговых экосистем, особенно в южных районах Полесья.

Из-за низких уровней воды и увеличения ее температур, ухудшались условия работы отдельных гидроузлов и водозаборов, что требовало дополнительного регулирования водного режима.

Подобные 2023 году явления в Беларуси наблюдаются в 60–70 % лет весной в Брестской и Гомельской областях, в 20–30 % в Витебской. В работах академика В. Ф. Логинова отмечается явно выраженная тенденция аридизации климата Беларуси [31].

Стоит также отметить, что риск наводнений и других опасных гидрологических и климатических явлений становится ограничивающим фактором природопользования. В свою очередь опасно низкие уровни воды влекут за собой проблемы в хозяйственном водоснабжении, высокий риск пожаров, приостановку судоходства, снижение разнообразия флоры и фауны, изменение морфологии бассейна водного объекта, нарушение работы сельскохозяйственных отраслей и энергетики.

Механизмы и гипотеза резких переходов в системе «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок»

Механизмы формирования весенних половодий и дождевых паводков

В классической гидрологии выделяют, по меньшей мере, два базовых режима формирования поверхностного стока после выпадения атмосферных осадков: инфильтрационно-избыточный – возникающий, когда интенсивность дождя превышает инфильтрационную способность почвы [32]; насыщенно-избыточный – связанный с формированием переменной области стока, когда почва на водосборе является насыщенной водой до состояния полной влагоемкости и любая дополнительная вода формирует поверхностный сток [33]. Дополнительно существенен вклад внутрпочвенного стока и подземного питания, определяющий меженный сток и характер спада гидрографа [34].

Весеннее половодье формируется при сочетании запаса воды в снежном покрове, интенсивности снеготаяния (температурный режим, солнечная радиация), состояния почвы (ее промерзание и влажность), весенних осадков и русловых факторов (ледовые явления, заторы) [35]. Половодья/паводки возникают при превышении пропускной способности русла/поймы и могут быть как фазой затяжного половодья/паводка, так и результатом кратковременных экстремальных осадков. В Белорусском Полесье существенны пойменные процессы и влияние мелиоративной сети. Например, открытая сеть каналов и закрытый дренаж способны усиливать пики половодья и менять форму гидрографа.

Атмосферные осадки (P) распределяются на инфильтрацию (в почву и далее в грунтовые воды), поверхностный сток (быстрый приток в русло), испарение и транспирацию, накопление (снег, лед, пруды и водохранилища, почвенная влага).

Формирование половодья (типично снежного)

Половодья в умеренных широтах обусловлены сезонным высвобождением запаса воды в снежном покрове. Можно выделить пять последовательных процессов.

1. Накопление.

Зимой, в холодный период формируется запас воды в снежном покрове (водный эквивалент снега).

2. Снеготаяние.

Критичны скорость поступления энергии на таяние и фаза атмосферных осадков. Энергобалансовые модели снежного покрова [36] показывают, что дождь, выпавший на снежный покров, усиливает приток воды и тепла одновременно, способствуя ускоренному таянию и формированию пиков половодий [37].

3. Ограничение инфильтрации.

Весной почва может быть: промерзшей (инфильтрация резко снижена), переувлажненной (почвенные поры заполнены водой), с уплотненной коркой/ледяной линзой. Тогда значительная часть воды превращается в поверхностный сток.

4. Концентрация и маршрутизация стока.

Вода быстро попадает в речную русловую сеть, особенно при развитой мелиоративной сети, сети балок/оврагов, малой шерохова-

тости подстилающей земной поверхности (деградированная растительность, сельскохозяйственные угодья, урбанизированные территории).

5. Русловые эффекты.

Уровни воды растут сильнее при ледовых заторах, заилении/зарастании русла, узких поймах, подпорах от водохранилищ/дамб и других гидротехнических сооружений, совпадении пиков половодий на притоках.

Формирование дождевого паводка

Основу формирования дождевого паводка составляют, прежде всего, экстремальные атмосферные осадки и условия, рассмотренные выше, связанные с инфильтрацией, насыщением почвенных пор водой, состоянием поверхности и др.

Механизмы образования засухи

Засуха может проявляться на метеорологическом, почвенном (агрономическом) и гидрологическом уровнях. Классические индексы, такие как PDSI [38], SPI [22] и SPEI [23], позволяют количественно фиксировать дефицит влаги для различных временных масштабов. Механистически засуха возникает при недостатке атмосферных осадков, росте потенциальной испаряемости вследствие высокой температуры, солнечной радиации и дефицита влажности воздуха, и слабом пополнении запасов почвенной влаги и грунтовых вод. Важную роль играют обратные связи «влажность почвы – температура/осадки», способные ускорять нагрев и иссушение поверхности.

SPI и SPEI используются для стандартизированной количественной оценки аномалий увлажнения (SPI – по осадкам; SPEI – по балансу P–PET, который чувствителен к происходящему потеплению). Для Белорусского Полесья показательная связка «ранняя весна → раннее окончание половодья → рост PET в конце весны/начале лета → быстрое иссушение», при этом осушительная мелиорация уменьшает влагозапасы в почве и тем самым может ускорять переход «весеннее половодье → засуха». Засуха – это не только когда отсутствуют атмосферные осадки, это несоответствие притока влаги и потерь, а также изменение способности ландшафта удерживать и отдавать воду. Можно выделить следующие причинно-следственные связи образования засухи.

Атмосферные факторы, приводящие к уменьшению осадков – это устойчивая антициклоническая циркуляция → ясная погода, низкая вероятность фронтов и конвекции, смещение фронтальных зон, более редкие влажные переносы.

Поверхностно-энергетические факторы, приводящие к потере влаги при ясном небе и жаре – это рост потенциальной испаряемости, усиление испарения подстилающей земной поверхности и транспирация (если есть растительность и доступность воды).

Почвенно-гидрологические факторы, приводящие к потере влаги имеют место тогда, когда почва теряет влагу неравномерно в вертикальном профиле, при иссушении верхнего слоя уменьшается капиллярный подъем воды из более глубоких слоев. Грунтовые воды могут понижаться из-за недостаточного инфильтрационного питания, повышенного водоотбора, осушительной мелиорации. Гидрологическая засуха часто запаздывает относительно метеорологической, но при определенных условиях может наступать достаточно быстро.

Биофизические обратные связи засухи приводят к снижению влажности почвы, уменьшению ее испарительного охлаждения, сильному прогреву, увеличивающему испаряемость. В условиях сильного теплового стресса растения сбрасывают листья, а иногда и плоды, чтобы сохранить влагу, это одновременно ухудшает инфильтрацию в будущем (деградация структуры растительного покрова, оголение почвы, почвенная корка).

Гипотеза быстрого перехода от весеннего половодья к засухе

Предлагаемая нами гипотеза утверждает, что быстрый переход от весеннего половодья к засухе возможен тогда, когда экстремальный приток воды не преобразуется в устойчивые ее запасы (почвенная влага, грунтовые воды, аккумулятивное воды болотами), а уходит транзитом по русловой сети. Ситуацию усиливает снижение инфильтрации (кольматаж почвенных пор, почвенная корка, уплотнение почвы) и последующее установление условий высокой потенциальной испаряемости (антициклон, сильная жара, сильный ветер), в результате чего верхние горизонты быстро иссушаются. То есть половодье может быть не признаком «влажного года», а признаком неэффективного удержания воды.

Физические механизмы, делающие переход быстрым, можно разделить по блокам.

1. Гидрологический «сброс» и малое пополнение запасов.

Здесь выделяется короткое, но мощное половодье. Вода проходит транзитом, промерзшая или уже насыщенная водой почва во время половодья инфильтрует воду слабо, грунтовые воды почти не пополняются. Высокая дренированность территорий в результате осушительной мелиорации способствует быстрому отводу воды и освобождению от нее поймы. С другой стороны, построенные дамбы на пойменных мелиоративных системах сужают пойму и ограничивают весенний разлив воды увеличивая ее уровни в реках. В результате формируются большие пики половодья, после которых идет резкий спад уровней и создаются предпосылки к гидрологической засухе.

2. Деградация инфильтрации и структуры почвы вследствие наводнения.

Парадоксально, но избыток воды может ухудшить последующее удержание влаги. При больших скоростях воды происходит разрушение мелкодисперсных частиц почвы и последующее их осаждение на поверхности, колымаж порового пространства, образование почвенной корки. На сельскохозяйственных угодьях механическая обработка переувлажненной почвы приводит к ее уплотнению и ухудшению агрегатного состава, в результате уменьшаются коэффициенты инфильтрации, в будущем возрастает поверхностный сток.

3. Быстрый рост испаряемости после избытка воды.

Этот сценарий является распространенным для территории Белорусского Полесья. Половодье случается ранней весной, затем происходит резкое потепление и идет переход от зимней циркуляции к летней, когда возможны резкие колебания скорости ветра, далее устанавливается антициклонический режим погоды. Если влага не ушла в глубокие почвенные горизонты, растительность быстро развивается, так как имеет место большое водопотребление, при этом верхние горизонты быстро высыхают и стремительно наступает почвенная засуха.

4. Атмосферная перестройка режима.

Если после влажного периода возникает блокирующий антициклон, атмосферные осадки прекращаются, солнечная радиация и температура растут, усиливается испарение, тогда формируется засуха даже при недавних половодьях/наводнениях.

Лаг (скорость перехода) «половодье→засуха» определяется сочетанием факторов среди которых, время окончания половодья, количественный показатель весенних влагозапасов почвы/грунтовых вод после половодья, тип последующей атмосферной циркуляции (серии без осадков), рост РЕТ, наличие искусственной гидрографической сети, морфология поймы и структура почвенного покрова.

Переход удобно описывать лагом (в днях) от даты окончания половодья до первой даты засушливого периода по SPEI/SPEI30, долей быстрых переходов ($\leq 30/\leq 60$ дней) и условной вероятностью засухи при «ранней/поздней весне», «коротком/длинном половодье» и т. д. Такой набор характеристик соответствует современным подходам к описанию «точки смены», длительности и скорости перехода.

Ранневесеннее половодье при промерзшей почве чаще ведет к малому пополнению грунтовых вод, происходит быстрый его спад и возникает риск засухи в конце весны/летом. Летние дождевые паводки могут сильнее пополнять почвенные влагозапасы, но только если инфильтрация почвенной влаги не блокирована коркой или уплотнением.

При высокой инфильтрационной способности, наличии легких по гранулометрическому составу почв и грунтов избыточная вода переходит в запасы, переход «половодье→засуха» происходит медленнее.

Пруды и водохранилища могут как сглаживать, так и усиливать риск засухи ниже по течению (если режимы сбросов и накопления не совпадают с потребностями экосистем и водопользования).

Если после весеннего половодья начинается период жаркой, сухой, ветреной погоды переход резко ускоряется. Если идут умеренные дожди, облачность и низкая испаряемость вода удерживается дольше.

Для территории Белорусского Полесья целесообразно рассматривать режимы «до/после» периодов интенсивных преобразований водосборов путем мелиоративных мероприятий. Непараметрический тест Петтитта [29] широко применяется для выявления года разрыва (перестройки уровня временного ряда). Режимное деление должно

обсуждаться физически: потепление и ранняя весна, гидролого-климатическая изменчивость, а также антропогенные изменения стока. Режимы необходимы для корректного сопоставления вероятностей «половодье→засуха» и «засуха→дождевой паводок», а также для интерпретации трендов как климатического или климато-антропогенного характера.

Механизмы и гипотеза быстрого перехода от засухи к дождевому паводку

Быстрый переход от засухи к дождевому паводку обусловлен тем, что засушливые периоды часто снижают инфильтрационную способность почв именно в момент первого сильного дождя [40]. Факторы включают коркообразование и уплотнение, а также водоотталкивающие свойства почв, особенно после пожаров [41]. При выпадении атмосферных осадков высокой интенсивности формируется инфильтрационно-избыточный сток, который быстро концентрируется по мелиоративной, овражно-балочной сети, дорогам и ливневой инфраструктуре, что приводит к высокому пику и малому времени добегания.

Переход часто связан со сменой циркуляционных режимов: после сухого периода (антициклон) происходит вторжение влажных масс и/или развитие конвекции, приводящее к интенсивным ливням. Экстремальные события могут возникать как из-за редких осадков, так и из комбинации нескольких «не экстремальных» факторов, дающих совместный критический эффект. Это хорошо ложится на концепцию «последовательных событий» и «скачкообразного» ответа [42]. В последовательности «засуха→ливень» переход к дождевому паводку определяется гидрологическим откликом – при иссушении и уплотнении поверхности может снижаться инфильтрация и расти доля поверхностного стока, мелиоративная сеть ускоряет поверхностный и внутрипочвенный сток повышая потенциал дождевых паводков. Интуитивно кажется, что сухая почва впитает влагу. Однако на практике засуха часто повышает риск дождевого паводка, потому что меняются свойства поверхности и путей стока.

Основными механизмами данного резкого перехода являются:

1. Потеря инфильтрационной способности почвы из-за корки, уплотнения и гидрофобности.

Во время засухи верхний слой распадается на мелкие дисперсные частицы, первый дождь «запечатывает» поверхность, образуется корка. Пересыхание вызывает усадку, появляются трещины, иногда повышающие инфильтрацию локально, однако при экстремальных осадках вода быстро находит пути стока по уплотненной поверхности между трещинами и по микрорельефу. После пожаров или сильного перегрева может возникнуть гидрофобность, приводящая к резкому снижению инфильтрации.

2. Низкая растительная защита и шероховатость поверхности.

Засуха приводит к деградации шероховатого покрова, происходит увядание листьев и усыхание травяного покрова, как следствие, меньший перехват выпадающих осадков. На оголенной почве быстрее формируется поверхностный сток, проявляется эрозия. Отмирание корневой системы растений ухудшает структуру почвы, макропор становится меньше.

3. Очень большая интенсивность атмосферных осадков (конвективные ливни).

После сильной жары часто возрастает вероятность очень интенсивных ливней (конвекция на фоне перегретой поверхности при поступлении влаги). Даже если почва и способна впитывать влагу, интенсивность осадков может превышать инфильтрационную способность.

4. «Первый промыв» и перенос наносов.

Первый дождь после засухи смывает пыль и мелкие частицы в русло, повышает мутность воды, приводит к заилению мелкой гидрографической сети, снижает ее пропускную способность, засоряется ливневая канализация, что дополнительно увеличивает уровни воды и локальные подтопления.

Скорость перехода «засуха→дождевой паводок» зависит от следующих факторов: интенсивности и длительности ливня; состояния подстилающей земной поверхности (корка/уплотнение/гидрофобность/пожары); степени покрытия растительностью и специфики землепользования (сельскохозяйственные угодья, лесопосадки, вырубки, урбанизированные территории); рельефа и связность путей стока (овраги, балки, дорожная сеть);

состояния русел естественной и искусственной гидрографической сети и гидротехнических сооружений (заиление, зарастание, засорение, пропускная способность ливневой канализации и др.).

На рисунке 1 представлена схема, наглядно характеризующая резкие переходы в системе «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок».

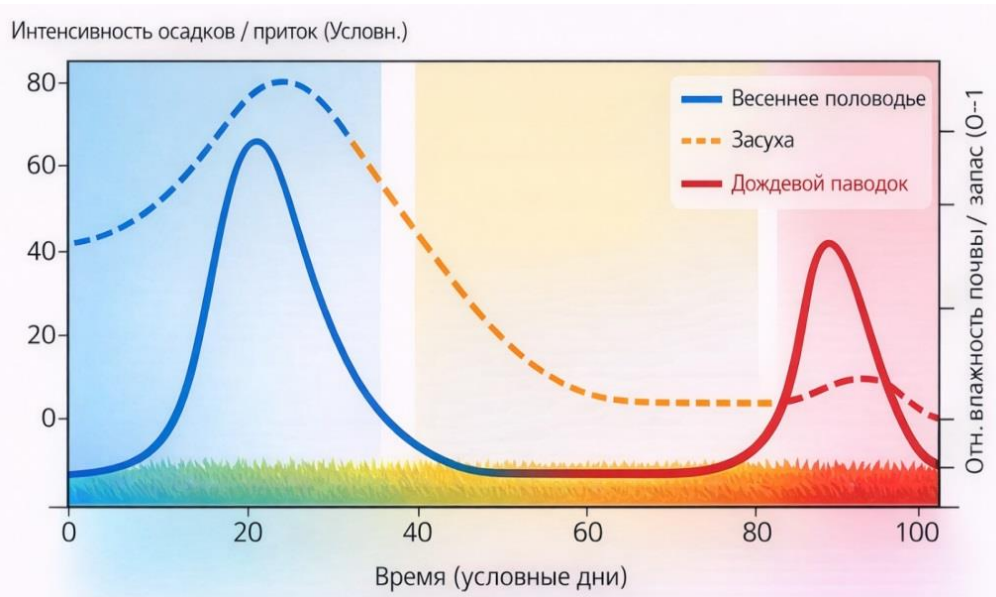


Рисунок 1 – Схема резких переходов «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок»

Рисунок 1 показывает концептуальную модель сезонной трансформации водного режима, при которой весеннее половодье, обусловленное избыточной влагой, сменяется фазой летнего иссушения, а затем при выпадении интенсивных осадков развивается дождевой паводок.

Схема подчеркивает нелинейный характер изменений гидрологического режима и возможность резких переходов в исследуемой системе.

Для каждого типа ландшафта имеется свой сценарий быстрых переходов (таблица 2).

Таблица 2 – Сценарии быстрых переходов «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок» для различных типов ландшафтов/территорий

«весеннее половодье → засуха»	«засуха → дождевой паводок»
Лесная зона (смешанные леса)	
<ul style="list-style-type: none"> – половодье проходит в условиях промерзшей почвы и наличии ледовых явлений на реках → высокие уровни воды и быстрый транзитный русловой сток; – на осушенной/дренированной территории (агролесомелиорация) ускоряется поверхностный и внутрипочвенный сток; – после влажного периода антициклон, теплая весна → рост суммарного испарения, верхние горизонты быстро иссушаются 	<ul style="list-style-type: none"> – после засухи/пожаров возможна гидрофобность подстилающей земной поверхности, лесной подстилки; – выгорание и иссушение лесной подстилки и повреждение почвенной структуры → рост поверхностного стока при ливнях; – буреломы/завалы/санитарные рубки → снос древесины в русла каналов и рек, приводящий к локальным подпорам
Пойменные/болотные ландшафты	
<ul style="list-style-type: none"> – в естественном состоянии переход обычно медленнее (болота/поймы аккумулируют воду); – но при осушительных мелиорациях и одамбировании рек – наоборот быстрый сток → ускорение засухи 	<ul style="list-style-type: none"> – если торфяники переосушены, возможна деградация и пожары → дальнейшая потеря водоудержания; – на восстановленных болотах пики паводков обычно ниже и они растянуты во времени
Урбанизированные территории	
<ul style="list-style-type: none"> – «городской избыток воды» почти не пополняет ее запасы, вода быстро уходит по ливневой канализации; – далее имеет место дефицит влаги и формируется «городской остров тепла», усиливается испаряемость → жара, локальная засушливость и перегрев искусственных сооружений 	<ul style="list-style-type: none"> – почти гарантированный риск при ливнях: застройка, закрытые поверхности (дороги, улицы, площадки) на фоне засоренной ливневой канализации после сухого периода; – «первый смыв» мусора и пыли ухудшает пропуск труб/решеток → локальные подтопления
Речные бассейны с зарегулированным стоком (пруды, водохранилища)	
<ul style="list-style-type: none"> – если управление ориентировано на противопаводковую защиту, пруды и водохранилища будут заполняться стоком воды весеннего половодья, однако ниже по течению может формироваться маловодье (зависит от правил эксплуатации) 	<ul style="list-style-type: none"> – локально может снижаться риск пиков дождевых паводков, но при переполнении прудов и водохранилищ, аварийных сбросах возможен резкий подъем уровней воды в русловой сети

Предложенная гипотеза согласуется с классическими представлениями о формировании руслового стока и его ролью и связью с засухами в условиях неустойчивого и переменного естественного увлажнения. В итоге можно сказать, что быстрые переходы чаще всего возникают, когда: экстремальность атмосферных осадков/таяния снега сочетается с низкой способно-

стью ландшафта удерживать воду и/или с резким ростом испаряемости, а затем засушливое состояние подготавливает поверхность к инфильтрационно-избыточному стоку при первом сильном дожде. Это означает, что адаптационные меры должны быть двусторонними [43, 44]. Для уменьшения последствий перехода «весеннее половодье → засуха» необходимо повышение

влагодержания почв на водосборе, повышения их инфильтрационной способности (восстановление болот/лугов, противоэрозийные мероприятия и др.), для предотвращения последствий в системе «засуха→дождевой паводок» – мероприятия по организации поверхностного стока, восстановление растительности, управление пожарами, поддержание пропускной способности русел и ливневой канализации и др.

Комплексный анализ гидрологического режима р. Припять и климатических условий Белорусского Полесья

Комплексный анализ гидрологического режима р. Припять и климатических условий выполнен для различных периодов (1882–2018 гг., 1960–2025 гг.) и разрешения данных (месяц, сутки). В частности, рисунки 2, 3 показывают динамику начала половодья и его продолжительность за период 1882–2018 гг.

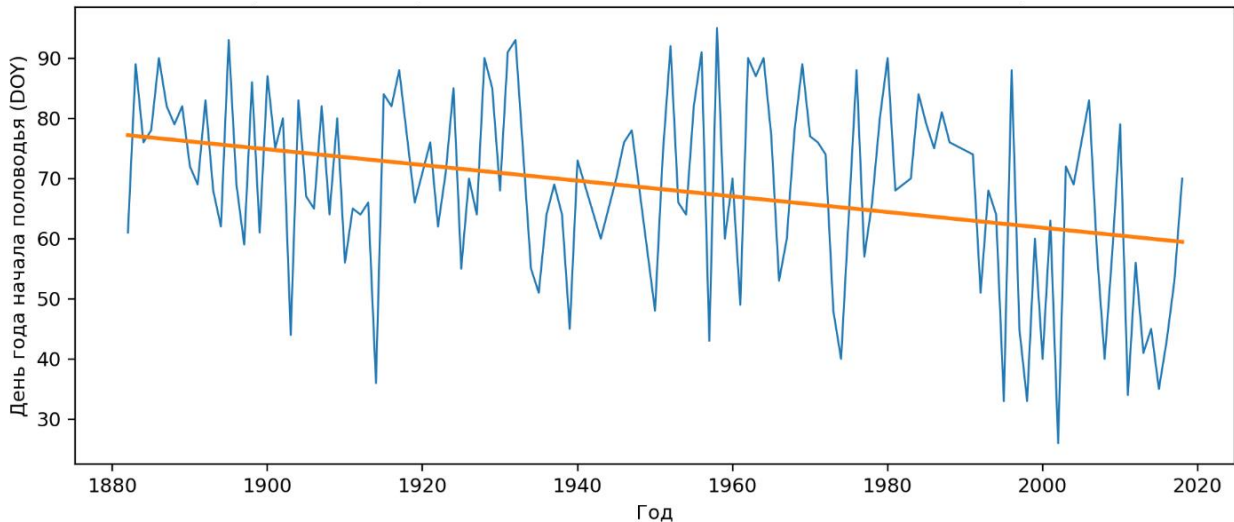


Рисунок 2 – Начало половодья (DOY) на р. Припять, порядковый день года

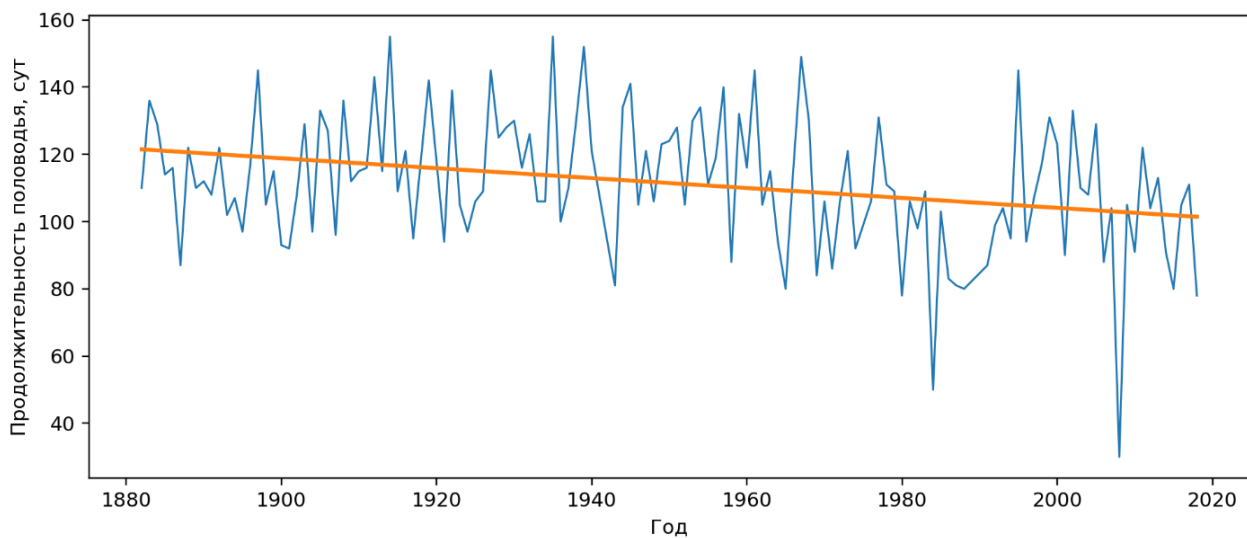


Рисунок 3 – Продолжительность половодья на р. Припять, сут.

Рисунки 2, 3 показывают, что фенология весеннего половодья в Припять (створ Мозырь) за 1882–2018 гг. претерпевает направленные изменения. Дата начала половодья демонстрирует тенденцию к смещению на более ранние сроки, а продолжительность половодья – к сокращению. Несмотря на значительную межгодовую изменчивость, обе линии тренда имеют устойчивый нисходящий характер. Это свидетельствует о перестройке сезонного водного режима под влиянием климатических изменений, прежде всего потепления зимне-весеннего периода, которое способствует более раннему и более быстрому прохождению весеннего половодья.

На рисунках 4, 5 представлена динамика климатических характеристик за период 1882–2025 гг. по репрезентативной метеостанции Василевичи.

Рисунок 4 демонстрирует устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха в Василевичах, особенно выраженное в последние десятилетия. Это свидетельствует о современном потеплении климатических условий, способном оказывать существенное

влияние на сроки снеготаяния, испаряемость и влагообеспеченность территории. Рисунок 5 показывает, что годовая сумма осадков также обнаруживает тенденцию к увеличению, однако данный рост сопровождается высокой межгодовой изменчивостью и выраженным чередованием сухих и влажных лет.

Если рассматривать оба рисунка совместно, они позволяют сделать вывод о том, что на исследуемой территории наблюдается одновременное повышение температуры и умеренное увеличение осадков, однако эти два процесса неравнозначны по своему гидрологическому эффекту. Температура возрастает более последовательно и устойчиво, тогда как осадки остаются сильно изменчивыми. В результате рост осадков может частично компенсироваться усилением испаряемости на фоне потепления. Именно поэтому увеличение годовой суммы осадков само по себе не гарантирует улучшения влагообеспеченности и не исключает развития засушливых состояний. Напротив, сочетание потепления с высокой вариабельностью осадков создает предпосылки для усиления гидролого-климатической контрастности.

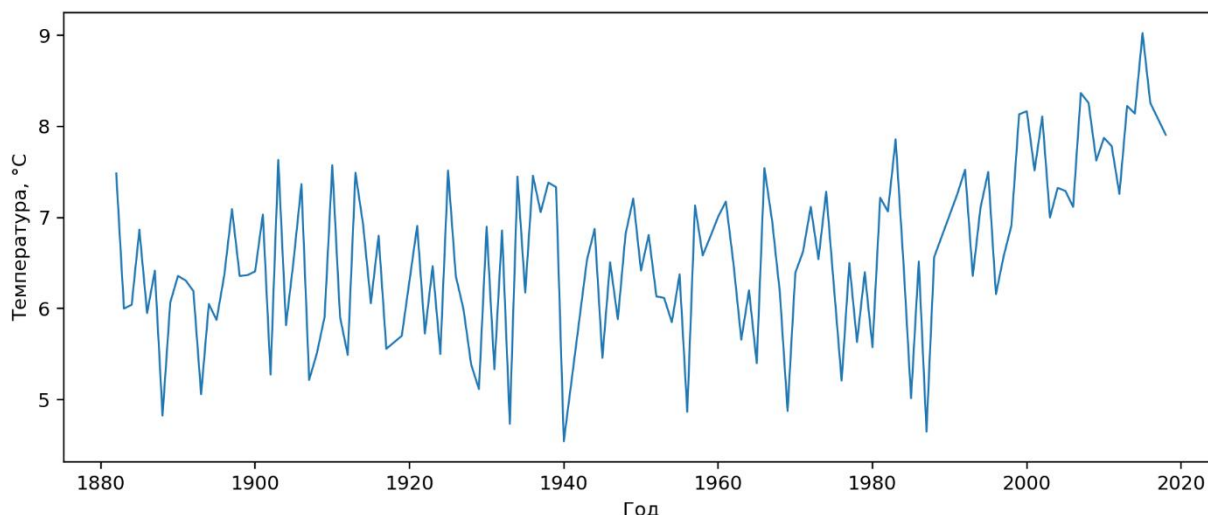


Рисунок 4 – Среднегодовая температура воздуха (Василевичи), °C

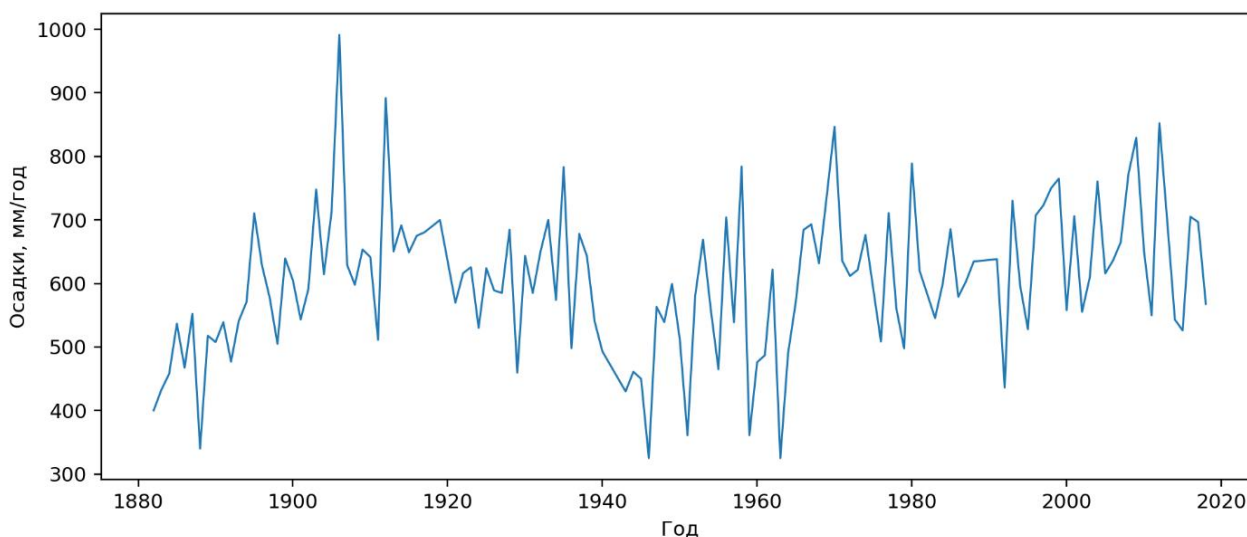


Рисунок 5 – Годовая сумма атмосферных осадков (Василевичи), мм

Таблица 3 дает достаточно полное представление как о фенологии весеннего половодья, так и о фоновых климатических условиях, на которых это половодье формируется. Здесь показаны не только средние зна-

чения, медиана, а также нижние и верхние проценти (P10 и P90). Благодаря этому можно судить не просто о типичном гидролого-климатическом режиме, а о его устойчивости и межгодовой изменчивости.

Таблица 3 – Основные статистики по фенологии половодья и климатическим показателям

Показатель	Среднее	Медиана	P10	P90
Начало половодья (DOY), дней	68,4	69,0	44,9	88,1
Длительность половодья (dur), сут	111,5	110,0	87,0	136,3
Окончание половодья (DOY), дней	178,8	180,0	154,8	205,0
Среднегодовая температура (T), °C	6,6	6,5	5,4	7,8
Годовая сумма атмосферных осадков, мм	604,0	604,0	464,6	738,5
Климатический водный баланс (P-PET), мм	8,0	15,0	-117,0	151,9

Таблица 3 показывает, что фенология весеннего половодья характеризуется сравнительно устойчивыми средними сроками начала (68,4 дня с начала года) и окончания (178,8 дней с начала года), а также значительной средней продолжительностью (111,5 суток). Близость средних и медианных значений по всем показателям свидетельствует об отсутствии выраженной асимметрии распределений и позволяет рассматривать указанные параметры как репрезентативные для исследуемого ряда. Вместе с тем широкий диапазон между P10 и P90 указывает на существенную межгодовую изменчивость сроков и длительности половодья. Климатический фон терри-

тории характеризуется среднегодовой температурой 6,6 °C и годовой суммой осадков около 604 мм, однако наиболее показателен климатический водный баланс, среднее значение которого близко к нулю. Это отражает пограничный характер влагообеспеченности территории, при котором даже умеренные колебания температуры и осадков способны смещать систему от избыточного увлажнения к выраженному дефициту влаги.

Тренды оценены тестом Манна-Кендалла (двусторонний) и наклоном Сенна [27, 28], приведены скорости изменения исследуемых характеристик за десятилетие (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты трендового анализа гидролого-климатических характеристик (1882-2018 гг.)

Показатель	Тренд (Sen) за 10 лет	p (МК)
Начало половодья (DOY), день	-1,2	0,001
Длительность половодья (dur), сут	-1,3	0,002
Окончание половодья (DOY), день	-2,6	0,000
Среднегодовая температура (T), °C	0,1	0,000
Годовая сумма атмосферных осадков (P), мм	7,5	0,003
Климатический водный баланс (P-PET), мм	4,1	0,097

Результаты трендового анализа показывают статистически значимую перестройку фенологии весеннего половодья. Начало половодья смещается на более ранние сроки со скоростью 1,2 дня за 10 лет, а его окончание – на 2,6 дня за 10 лет, что обуславливает сокращение общей продолжительности половодья примерно на 1,3 суток за десятилетие. Одновременно выявлен достоверный рост среднегодовой температуры воздуха (0,1 °C/10 лет) и годовой суммы осадков (7,5 мм/10 лет). При этом клима-

тический водный баланс обнаруживает лишь слабую положительную тенденцию, статистически незначимую на уровне $p < 0,05$. Это свидетельствует о том, что повышение температуры, несмотря на некоторый рост осадков, остается ведущим фактором трансформации гидрологического режима, способствуя более раннему и более короткому прохождению весеннего половодья.

Корреляционный анализ Спирмена [45] приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Корреляционный анализ Спирмена [45]

Соотношение	Коэффициент корреляции Спирмена (ρ)	Уровень статистической значимости связи (p)
DOY начала / Зимняя температура воздуха (T)	-0,44	0,000
DOY начала / Весенняя температура воздуха (T)	-0,62	0,000
DOY начала / Сумма атмосферных осадков зимой (P)	-0,07	0,422

Корреляционный анализ Спирмена показал, что дата начала весеннего половодья статистически значимо связана с температурными условиями зимы и особенно весны. Наиболее тесная обратная связь выявлена с весенней температурой марта – мая ($\rho = -0,62$; $p < 0,001$), что указывает на более раннее начало половодья в теплую весну. Связь с зимней температурой также значима, но менее выражена ($\rho = -0,44$, $p < 0,001$). В то же время зависимость между

датой начала половодья и зимними осадками статистически незначимая ($\rho = -0,07$, $p = 0,422$). Это свидетельствует о том, что сроки начала половодья определяются прежде всего термическими условиями, тогда как вклад зимних осадков в смещение даты его начала в данном случае не выявлен.

Дополнительно построена диаграмма рассеяния DOY начала половодья и средней температуры марта–мая (рисунок 6).

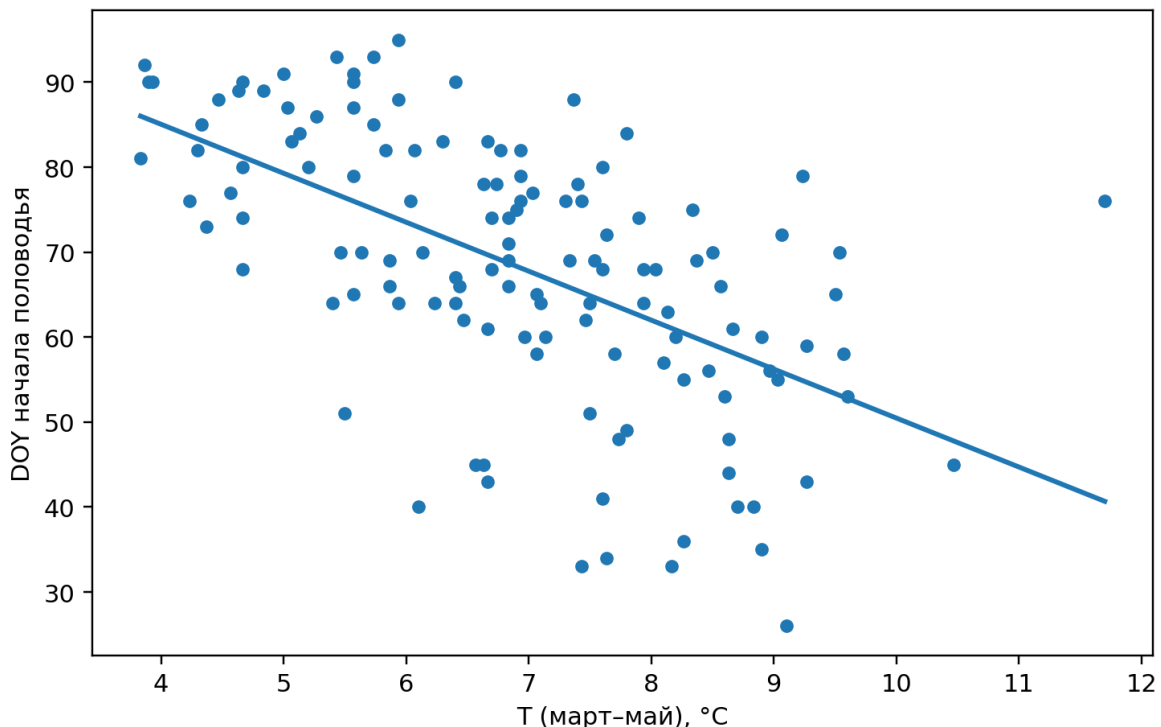


Рисунок 6 – Связь начала половодья с температурой весны (март – май)

Рисунок 6 демонстрирует выраженную обратную зависимость между средней температурой весны (март – май) и датой начала половодья. С увеличением весенней температуры начало половодья смещается на более ранние сроки. Несмотря на заметное рассеяние точек, отражающее влияние сопутствующих факторов, общая

направленность зависимости является устойчивой и согласуется с результатами корреляционного анализа.

Для оценки внутрисезонных переходов рассчитаны SPI-3 (по осадкам) и SPEI-3 (по климатическому водному балансу P-PET) с ранговой стандартизацией внутри каждого календарного месяца

окончания 3-месячного периода. Рассматривались периоды (май–июль) и (июль–сентябрь). Определение событий резкого перехода выполнено в климатической постановке: «весеннее половодье→засуха»:

$SPI-3 \geq 0,8$ и $SPEI-3 \leq -0,8$; «засуха→дождевой паводок»: $SPEI-3 \leq -0,8$ и $SPI-3 \geq 0,8$. Частоты сведены по 30-летним периодам (рисунок 7).

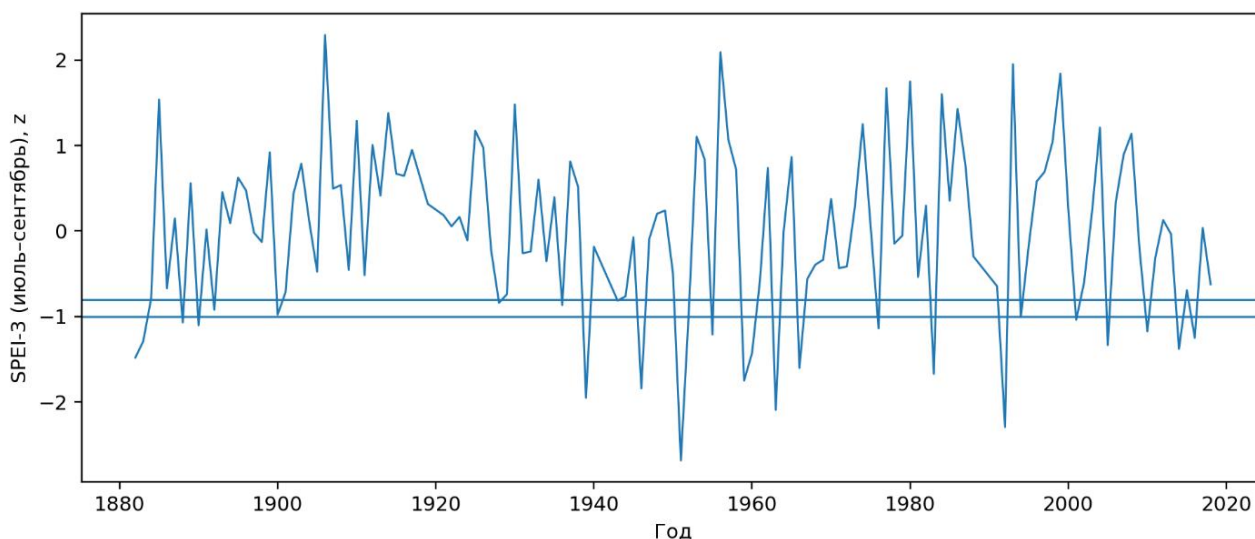


Рисунок 7 – SPEI-3: летне-осенний влагодефицит (пороговые линии -1,0 и -0,8)

Рисунок 7 отражает многолетнюю изменчивость индекса SPEI-3, характеризующего влагообеспеченность в летне-осенний период. Поскольку SPEI учитывает не только осадки, но и потенциальную испаряемость, этот показатель особенно информативен для оценки именно влагодефицита в условиях потепления.

По рисунку 7 можно заключить, что летне-осенняя влагообеспеченность отличается высокой нестабильностью, а эпизоды дефицита влаги являются не исключением, а регулярным элементом многолетней динамики. Это создает климатическую основу для сценариев,

в которых после относительно влажных условий может быстро наступать дефицит влаги, и наоборот.

Рисунок 8 развивает этот вывод и показывает уже не сами значения индекса, а частоту резких переходов по 30-летним интервалам. Здесь сопоставляются два типа переходов: синим фоном показано – «весеннее половодье →засуха», то есть переход от влажных условий к сухим; оранжевым – «засуха →дождевой паводок», то есть переход от сухих условий к влажным.

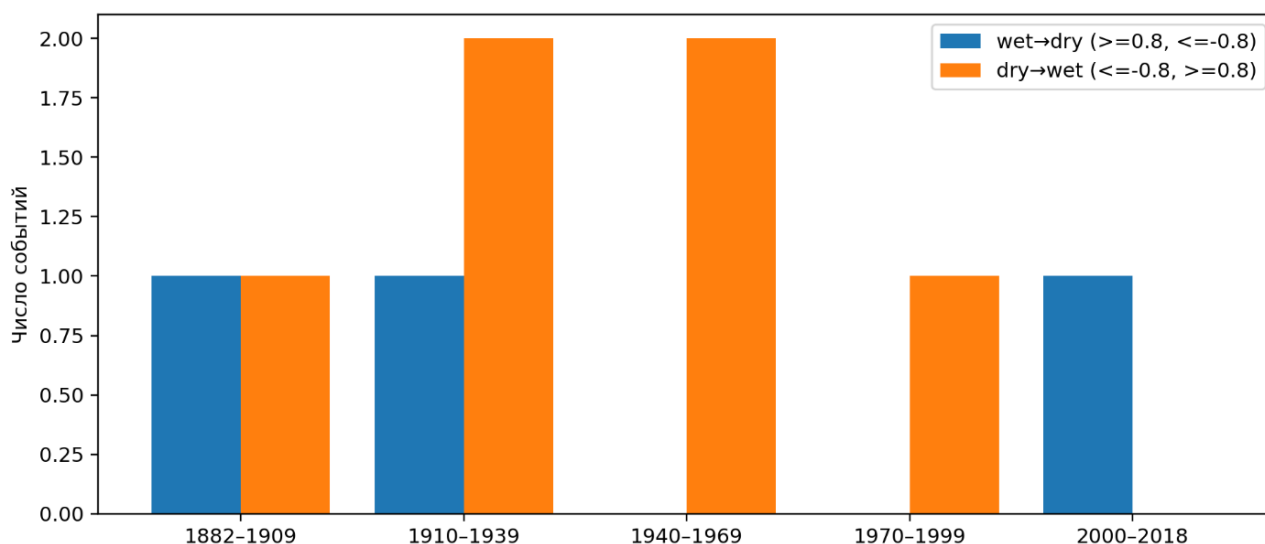


Рисунок 8 – Частота «весеннее половодье →засуха» и «засуха →дождевой паводок» переходов по 30-летиям

Такие переходы наблюдаются во всех или почти во всех анализируемых 30-летиях, однако их частота невелика. Это означает, что речь идет не о регулярном ежегодном явлении, а о сравнительно редких, но климатически значимых событиях. Именно поэтому каждый такой эпизод может рассматриваться как экстремальное проявление нестабильности гидролого-климатического режима.

Тест Петтитта [29] выявил статистически значимую смену гидрологического режима в 1991 году ($p = 0,0016$) в ряду DOY начала половодья. Это означает скачкообразную перестройку сезонности:

половодье стало наступать раньше. Раннее начало увеличивает продолжительность высокой РЕТ в конце весны/начале лета и тем самым повышает вероятность быстрого перехода «весеннее половодье →засуха».

В таблице 6 приведены результаты трендового анализа по методу Манна – Кендалла и наклону Сенна [27, 28], при этом использованы гидролого-климатические данные за период 1960–2025 гг., в том числе данные атмосферных осадков (P) и температур воздуха (T) в суточном разрезе.

Таблица 6 – Результаты трендового анализа гидролого-климатических характеристик (1960–2025 гг.)

Показатель	Тренд (Sen) за 10 лет	p (МК)
Среднегодовой расход воды (Q), м ³ /с	-1,6	0,906
Максимальный расход воды (Q _{max}), м ³ /с	-117,3	0,018
Минимальный летний расход воды (Q _{min л}), м ³ /с	-1,9	0,650
Минимальный зимний расход воды (Q _{min з}), м ³ /с	15,4	0,010
Дата начала весеннего половодья (doy_star), день	-4,7	0,001
Длительность половодья (dur), сут	-1,4	0,302
Дата окончания половодья (doy_end), день	-6,2	0,000
Годовая сумма атмосферных осадков (P), мм	8,4	0,252
Среднегодовая температура воздуха (T), °C	0,4	0,000
Годовой климатический водный баланс (P-PET), мм	-1,6	0,857
Максимальная сумма атмосферных осадков за 1 сутки, мм	1,2	0,104
Максимальная сумма атмосферных осадков за 5 последовательных суток, мм	0,2	0,896
Максимальная продолжительность сухого периода, сут	-0,8	0,114
Число дней за период с осадками не менее 10 мм в сутки	0,5	0,058
12-месячный стандартизированный индекс, рассчитанный на декабрь (SPEI12)	-0,02	0,857

Результаты трендового анализа показывают, что наиболее выраженные и статистически значимые изменения относятся к фенологии весеннего половодья и температурному режиму. Начало половодья смещается на более ранние сроки со скоростью 4,7 дня за 10 лет ($p = 0,001$), а его окончание — на 6,5 дня за 10 лет ($p < 0,001$). Одновременно выявлено значимое снижение максимального стока (Q_{max}) и рост зимнего минимального стока (Q_{min з}), что указывает на перестройку сезонной структуры речного режима. Среднегодовая темпера-

тура воздуха достоверно повышается на 0,4 °C за десятилетие ($p < 0,001$), тогда как для годовой суммы осадков, климатического водного баланса и большинства индексов экстремальных осадков статистически значимых трендов не установлено. Это свидетельствует о том, что ключевым фактором наблюдаемых изменений выступает потепление, приводящее прежде всего к временной и сезонной трансформации гидрологических процессов.

Корреляции Спирмена [45] представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Корреляционный анализ Спирмена [45]

Соотношение	Коэффициент корреляции Спирмена (ρ)	Уровень статистической значимости связи (p)
DOY начала / Зимняя температура воздуха (T)	-0,65	0,000
DOY начала / Весенняя температура воздуха (T)	-0,59	0,000
DOY начала / Сумма атмосферных осадков зимой (P)	-0,10	0,471
DOY начала / Сумма атмосферных осадков весной (P)	-0,50	0,720
dur / Весенняя температура воздуха (T)	0,22	0,102
dur / Сумма атмосферных осадков весной (P)	0,12	0,382
Q _{max} / Весенняя температура воздуха (T)	-0,18	0,169
Q _{max} / Сумма атмосферных осадков зимой (P)	0,31	0,015
Q _{min л} / SPEI12	0,58	0,000
Среднегодовой расход воды (Q) / Годовая сумма атмосферных осадков (P)	0,33	0,010

Корреляционный анализ Спирмена показал, что дата начала весеннего половодья тесно связана с температурными условиями зимы и весны ($\rho = -0,65$ и $-0,59$ при $p < 0,001$), тогда как влияние зимних и весенних осадков на сроки его начала статистически не подтверждается. Максимальный расход воды обнаруживает значимую положительную связь с зимними осадками ($\rho = 0,31$; $p = 0,015$), что указывает на роль снегозапасов в формировании пика половодья. Минимальный летний сток тесно коррелирует с интегральным индексом увлажнения SPEI-12 ($\rho = 0,58$; $p < 0,001$), а средний расход воды — с годовой суммой осадков ($\rho = 0,33$; $p = 0,010$). Это свидетельствует о дифференцированном влиянии климатических факторов на различные характеристики речного режима.

Для суточной диагностики рассчитан 30-дневный скользящий водный баланс $D30 = \sum(P - PET_{day})$ и непараметрический индекс SPEI30 (стандартизация внутри дня года). Начало засухи фиксировалось как первая дата после окончания половодья, когда $SPEI30 \leq -1,0$ (умеренная/сильная засуха), а также отдельно порог $SPEI30 \leq -1,5$ (сильная засуха). Лаг (дни) — разность между датой начала засухи и датой окончания половодья. Таблица 8 сопоставля-

ет характеристики перехода «весеннее половодье → засуха» по двум периодам — до 1991 г. и после 1991 г. — и позволяет оценить, насколько быстро после окончания половодья система достигает порога засухи по SPEI30.

Таблица 8 показывает, что после 1991 г. переход от влажного состояния к засухе в целом ускорился. Средний лаг между окончанием половодья и достижением порога засухи снизился с 53,2 до 47,6 дня, медианный — с 42 до 38 дней. При этом верхний процентиль сократился с 118,6 до 102 дней, что указывает на уменьшение доли наиболее затянутых переходов. Хотя доля очень быстрых переходов (≤ 30 дней) несколько ниже, после 1991 г. возрастает доля переходов в пределах 60 дней (с 0,70 до 0,79), что свидетельствует о большей типичности сравнительно быстрого сезонного перехода к влагодефициту. В целом это согласуется с гипотезой о том, что в современных условиях более раннее окончание половодья и усиление испарительной способности атмосферы интенсифицирует ускоренное развитие летней засухи.

На рисунке 9 показано распределение лага «весеннее половодье → засуха» ($SPEI30 \leq -1$).

Таблица 8 – Лаг «весеннее половодье →засуха» по периодам

Период	Число переходов n	lag_среднее	lag_медиана	lag_p10	lag_p90	Доля переходов с лагом ≤30 дней	Доля переходов с лагом ≤60 дней
1991+	19	47,6	38	1	102	0,32	0,79
до 1991	27	53,2	42	1	118,6	0,41	0,70

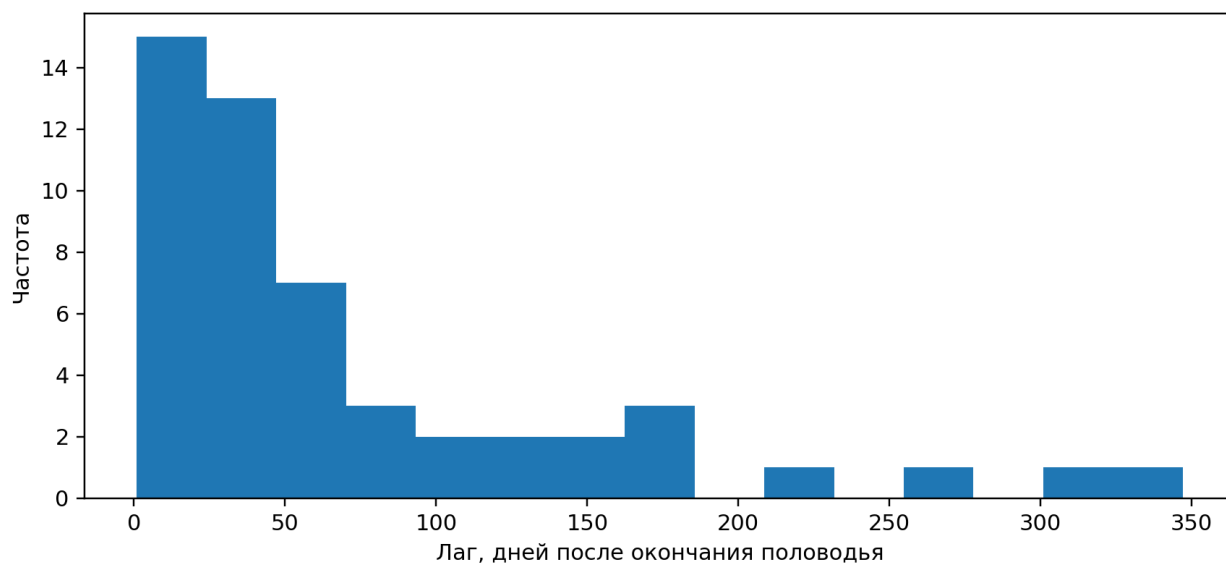


Рисунок 9 – Распределение lag_wd (SPEI30 ≤ -1)

Распределение имеет выраженную правостороннюю асимметрию: основная масса наблюдений сосредоточена в области малых и умеренных лагов, тогда как отдельные годы формируют длинный правый хвост.

На рисунке 10 представлена связь между величиной максимального расхода воды весеннего половодья (Q_{max}) и лагом до наступления засухи.

При более высоких значениях Q_{max} переход к засушливым условиям в среднем происходит быстрее. Это указывает на то, что

мощное половодье не обязательно обеспечивает длительное сохранение влагозапасов, а в ряде случаев сопровождается быстрым транзитом воды по русловой сети. Вместе с тем значительное рассеяние точек показывает, что скорость перехода к засухе определяется также совокупностью постполоводных климатических и гидрологических условий, прежде всего атмосферными осадками, испаряемостью и особенностями водоудержания территории.

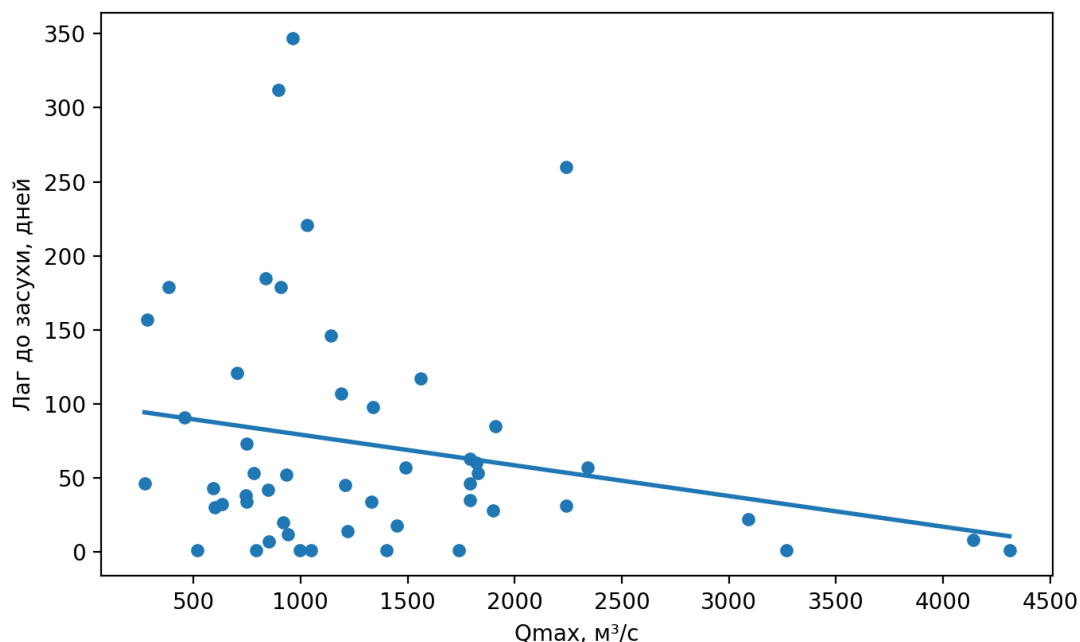


Рисунок 10 – Связь лага до наступления засухи с величиной Q_{max}

Таблица 9 показывает, как менялись характеристики перехода «весеннее половодье →засуха» по десятилетиям, то есть насколько быстро после окончания половодья система достигала засушливого порога. В ней приведены число пере-

ходов (n), медианный лаг перехода, а также доли быстрых переходов – в пределах 30 дней (fast30) и 60 дней (fast60). Это позволяет оценить не только среднюю скорость перехода к засухе, но и ее изменчивость во времени.

Таблица 9 – Лаг «весеннее половодье →засуха» по десятилетиям

Десятилетие	Число переходов n	lag_медиана	Доля переходов с лагом ≤30 дней	Доля переходов с лагом ≤60 дней
1960-1969	10	28	0,50	0,70
1970-1979	9	31	0,44	0,78
1980-1989	8	49	0,25	0,62
1990-1999	7	46	0,14	0,71
2000-2009	8	27	0,50	0,88
2010-2018	4	37,5	0,25	0,75

Таблица 9 показывает, что скорость перехода «весеннее половодье →засуха» существенно варьирует по десятилетиям и не демонстрирует монотонного тренда. В 1960–1970-е гг. быстрые переходы были достаточно характерны (медианный лаг 28–31 день; доля fast60 0,70–0,78), тогда как в 1980–1990-е гг. наблюдалось их ослабление, выраженное в увеличении медианного лага до 46–49 дней и снижении доли переходов fast30 до 0,14–0,25. В 2000-е гг. отмечено повторное усиление быстрых переходов: медианный лаг сократился до 27 дней, а доля переходов в пределах 60 дней достигла 0,88. Это указывает на выраженную десятилетнюю изменчивость режима перехода от весеннего увлажнения к засушливым условиям и позволяет предполагать чередование фаз ускоренного и замедленного сезонного иссушения.

Таблица 10 содержит 15 самых быстрых переходов «весеннее половодье →засуха» и показывает, через сколько дней после окончания половодья достигался порог засухи по двум уровням: SPEI30 ≤ -1 и SPEI30 ≤ -1,5. По сути, это выборка наиболее показательных лет, когда переход от весеннего избытка воды к засушливому состоянию происходил особенно быстро.

В ряде случаев порог SPEI30 ≤ -1 достигался практически сразу после окончания половодья (лаг 1 день). Значения лага, равные 1 дню, указывают не на мгновенное формирование засухи после половодья, а на то, что к моменту завершения половодной фазы 30-дневный водный баланс уже был близок или соответствовал засушливому состоянию. Это отражает крайне резкий переход «весеннее половодье →засуха» и свидетельствует о наложении раннего окончания половодья на уже развивающийся влагодефицит. Вместе с тем лаг до более жесткого порога SPEI30 ≤ -1,5 варьирует значительно сильнее: в одних годах сильная засуха также наступала почти сразу, в других – лишь спустя десятки и даже сотни дней, а в отдельных случаях не достигалась вовсе. Это показывает, что быстрый переход к умеренному влагодефициту не всегда сопровождается столь же быстрым развитием сильной засухи.

Переход «засуха →дождевой паводок» анализировался как последовательность: засушливая серия (SPEI30 ≤ -1, ≥ 20 суток) → первый экстремальный дождь P ≥ P95 в течение 90 суток. Такой критерий описывает повышение риска дождевых паводков и эрозийных эффектов после засухи.

В работе получены следующие пороги сильных ливней: P95 = 12,1 мм/сут и P99 = 25,0 мм/сут.

Таблица 11 – Переход «засуха →дождевой паводок» по периодам

Период	Число переходов n	lag_медиана	lag_среднее	lag_p10	lag_p90	P95_медиана
1991+	19	2	8,8	1	28,8	19,0
до 1991	16	1	18,8	1	52,0	14,8

Таблица 12 – Лаг «засуха →дождевой паводок» по десятилетиям

Десятилетие	Число переходов n	lag_медиана	lag_p10	lag_p90
1960–1969	7	16,0	1,0	63,6
1970–1979	5	1,0	1,0	49,6
1980–1989	4	1,0	1,0	1,0
1990–1999	3	4,0	1,6	12,8
2000–2009	4	15,5	1,6	42,0
2010–2019	7	1,0	1,0	14,6
2020–2025	5	1,0	1,0	12,8

Таблица 10 – Топ-15 самых быстрых переходов «весеннее половодье →засуха» (SPEI30 ≤ -1), дней

Год	lag_days_-1	lag_days_-1.5
1960	1	4
1963	1	1
1964	1	1
1979	1	100
1986	1	1
2018	1	1
2007	1	–
1999	1	292
1973	7	205
1970	8	–
1961	12	95
2000	14	128
2006	18	22
2002	20	30
1966	22	119

Таблица 11 сопоставляет характеристики переходов «засуха →дождевой паводок» по двум периодам – до 1991 года и после 1991 года. В таблице приведены число событий, медианный и средний лаг, нижний и верхний процентиля распределения лага, а также медианная величина осадков в день события.

После 1991 г. переход от засушливых условий к первому экстремальному дождю уровня P ≥ P95 в целом ускорился. Средний лаг «засуха →дождевой паводок» сократился с 18,8 до 8,8 дня, а верхний процентиль распределения уменьшился с 52,0 до 28,8 дня, что указывает на сокращение числа длинных переходов. При этом медианная величина атмосферных осадков возросла с 14,8 до 19 мм. Следовательно, в современный период переходы «засуха →дождевой паводок» становятся не только более быстрыми, но и более интенсивными по осадкам, что свидетельствует об усилении гидролого-климатической контрастности и повышении вероятности резкой смены засушливых условий экстремальными дождями.

Таблица 12 показывает, как менялись характеристики перехода «засуха →дождевой паводок» по десятилетиям.

Переходы «засуха → дождевой паводок» по десятилетиям характеризуются высокой изменчивостью, однако в большинстве интервалов медианный лаг остается достаточно малым.

Ниже представлен интегральный рисунок 11, построенный по реальным данным наблюдений: окончание половодья; начало засухи по SPEI30 ≤ -1; первый экстремальный дождь P ≥ P95 в течение 90 суток после засухи. Длины участков на схеме соответствуют медианным лагам по совокупности лет 1960–2025.

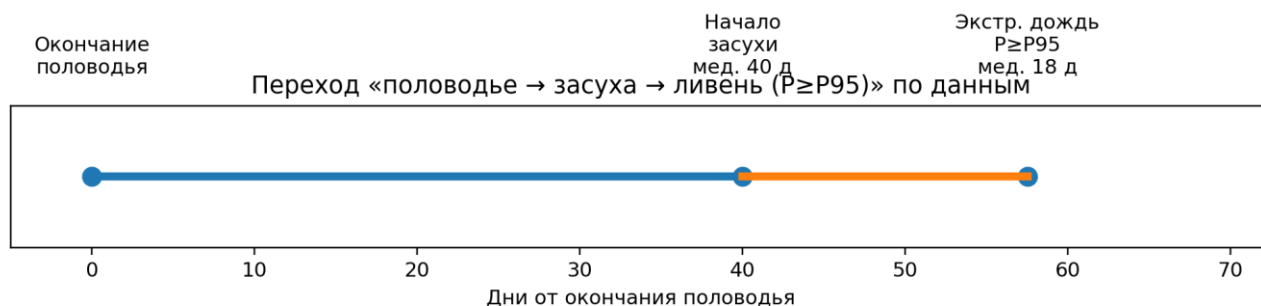


Рисунок 11 – Схема перехода «половодье → засуха → ливень (P ≥ P95)» (медианные лаги)

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что для Белорусского Полесья характерна выраженная тенденция к усилению гидролого-климатической контрастности, проявляющейся в ускорении и усложнении последовательных переходов в системе «весеннее половодье – засуха – дождевой паводок». Установлено, что весеннее половодье в бассейне Припяти смещается на более ранние сроки и завершается быстрее, что связано прежде всего с устойчивым ростом температуры воздуха и перестройкой сезонного теплового режима. При этом увеличение атмосферных осадков не компенсирует влияние потепления, поскольку водный баланс остается неустойчивым, а избыток влаги после половодья довольно часто не аккумулируется в ландшафте, а быстро уменьшается за счет руслового стока, дренарованности территории и роста потенциальной испаряемости. В результате после окончания половодья засушливые условия во многих случаях формируются уже в пределах 1–2 месяцев, а после 1991 г. такие переходы становятся в целом более быстрыми и более типичными. Одновременно показано, что переходы от засухи к экстремальным осадкам также ускоряются. В современный период первый дождь уровня P ≥ P95 после засушливой серии наступает в среднем быстрее и характеризуется большей интенсивностью.

Практическая значимость работы состоит в том, что выявленные закономерности позволяют по-новому рассматривать риски опасных гидрометеорологических явлений, не отдельно взятые весенние половодья, засухи или дождевые паводки, а как взаимосвязанные последовательные события. Это особенно важно для управления водным режимом мелиорированных земель, эксплуатации водохозяйственных систем и гидротехнических сооружений, предупреждения сельскохозяйственных рисков, пожароопасных ситуаций, эрозионных процессов и локальных подтоплений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Республики Беларусь и при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X25КИ-036 от 06.02.2025).

Список цитированных источников

1. Hydroclimate volatility on a warming Earth / D. L. Swain, A. F. Prein, J. T. Abatzoglou [et al.] // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2025. – Vol. 6, No. 1. – P. 35–50. – DOI: 10.1038/s43017-024-00624-z.
2. World Meteorological Organization. 2023 State of Global Water Resources Report. – Geneva : WMO, 2024. – URL: https://wmo.int/sites/default/files/2024-11/2024_State_of_Global_Water_Resources.pdf (date of access: 22.02.2026).

Рисунок 11 демонстрирует, что в исследуемом бассейне Припяти типичная последовательность «весеннее половодье → засуха → экстремальный дождь» реализуется в сравнительно короткие сроки. Медианный лаг от окончания половодья до начала засухи составляет около 40 дней, а от начала засухи до первого экстремального дождя – около 18 дней. Это свидетельствует о высокой гидролого-климатической контрастности режима и способности системы к быстрому переходу от избыточного увлажнения к дефициту влаги, а затем к интенсивным осадкам.

3. What is a drought-to-flood transition? Pitfalls and recommendations for defining consecutive hydrological extreme events / B. J. Anderson, E. Muñoz-Castro, L. M. Tallaksen [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2025. – Vol. 29. – P. 6069–6092. – DOI: 10.5194/hess-29-6069-2025.
4. Challenges in modeling and predicting floods and droughts: a review / M. I. Brunner, L. Slater, L. M. Tallaksen, M. Clark // *WIREs Water*. – 2021. – Vol. 8. – Art. e1520. – DOI: 10.1002/wat2.1520.
5. European Environment Agency. European Climate Risk Assessment: Executive summary. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2024. – 36 p. – DOI: 10.2800/204249.
6. Copernicus Climate Change Service. European State of the Climate 2024. – 2025. – URL: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2024> (date of access: 22.02.2026).
7. World Meteorological Organization. European State of the Climate: extreme events in warmest year on record // WMO Media Centre. – 15 Apr. 2025. – URL: <https://wmo.int/news/media-centre/european-state-of-climate-extreme-events-warmest-year-record> (date of access: 22.02.2026).
8. Global increases in dry-wet abrupt alternation events under climate change / N. He, J. Yin, P. Liu [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2025. – Vol. 52, No. 18. – DOI: 10.1029/2025GL117322.
9. Bridging rarity of drought-flood abrupt alternation events with reverse distributions or reverse copulas / J. Yan, T. Zheng, J. Zhao, J. Luo // *Water Research*. – 2025. – Vol. 287, pt. B. – Art. 124433. – DOI: 10.1016/j.watres.2025.124433.
10. Yin, J. Understanding heatwave-drought compound hazards and impacts on socio-ecosystems / J. Yin, L. Slater // *The Innovation Geoscience*. – 2023. – Vol. 1, No. 3. – Art. 100042. – DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2023.100042.
11. Полесья Восточно-Европейской равнины : монография / Ю. А. Мажайский, А. А. Волчек, Д. А. Иванов, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2024. – 216 с.
12. Floods on the territory of Polesie / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, M. M. Sheshka, I. V. Bulskaya // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 162. – P. 91–97. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.020.
13. Modern trends in river discharge variability in the Pripyat basin and their forecasted assessments / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, S. I. Parfamuk [et al.] // *Vestnik of Brest State Technical University*. – 2025. – № 3 (138). – P. 141–158. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-138-3-141-158.
14. Environmental Risks of Water Resources in the Belarusian Polesie / I. Kirvel, A. Volchak, S. Parfomuk, P. Kirvel // *Limnological Review*. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 21–32. – DOI: 10.3390/limnolrev23010002.
15. Environmental Risks of the Pripyat River in a Changing Climate / A. Volchak, A. Meshyk, Yu. Mazhayskiy, A. Rokochynskiy, J. Jeznach // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 212. – Art. 01015. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201015.

16. Landscape fires disproportionately affect high conservation value temperate peatlands, meadows, and deciduous forests, but only under low moisture conditions / M. Kirkland, P. W. Atkinson, J. W. Pearce-Higgins [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2023. – Vol. 884. – Art. 163849. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163849.
17. World Bank. Strengthening Hydromet and Early Warning Services in Belarus: A Road Map. – Washington, DC : World Bank, 2020. – URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/839291594879784721/pdf/Strengthening-Hydromet-and-Early-Warning-Services-in-Belarus-A-Road-Map.pdf> (date of access: 01.03.2026).
18. Kendall, M. G. Rank correlation methods / M. G. Kendall. – 4th ed. – London : Griffin, 1975. – 202 p.
19. Золотокрылин, А. Н. Биоклиматическая субгумидная зона на равнинах России: засухи, опустынивание/деградация / А. Н. Золотокрылин, Е. А. Черенкова, Т. Б. Титкова // *Аридные экосистемы*. – 2018. – Т. 24, № 1(74). – С. 13–19.
20. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. – Rome : FAO, 1998. – (FAO Irrigation and Drainage Paper ; 56).
21. Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate / C. W. Thornthwaite // *Geographical Review*. – 1948. – Vol. 38, No. 1. – P. 55–94. – DOI: 10.2307/210739.
22. McKee, T. B. The relationship of drought frequency and duration to time scales / T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist // *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. – Anaheim, CA : American Meteorological Society, 1993. – P. 179–184.
23. Vicente-Serrano, S. M. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) / S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno // *Journal of Climate*. – 2010. – Vol. 23, No. 7. – P. 1696–1718. – DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
24. Мешик, О. П. Методологические подходы к оценке засух и засушливых явлений / О. П. Мешик, М. В. Борушко // *Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти члена-корр. РАСХН и НАН КР, академика МАЭП и РАВН Я. В. Бочарова*. – Рязань : РГАТУ, 2024. – С. 59–65.
25. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset / M. G. Donat, L. V. Alexander, H. Yang [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2013. – Vol. 118. – P. 2098–2118. – DOI: 10.1002/jgrd.50150.
26. Westra, S. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall / S. Westra, H. J. Fowler, J. P. Evans [et al.] // *Reviews of Geophysics*. – 2014. – Vol. 52, No. 3. – P. 522–555. – DOI: 10.1002/2014RG000464.
27. Mann, H. B. Nonparametric tests against trend / H. B. Mann // *Econometrica*. – 1945. – Vol. 13, No. 3. – P. 245–259. – DOI: 10.2307/1907187.
28. Sen, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau / P. K. Sen // *Journal of the American Statistical Association*. – 1968. – Vol. 63, No. 324. – P. 1379–1389. – DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
29. Pettitt, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem / A. N. Pettitt // *Applied Statistics*. – 1979. – Vol. 28, No. 2. – P. 126–135. – DOI: 10.2307/2346729.
30. Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : учеб. пособие / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, В. Е. Валуев [и др.]. – М. : Мещерский филиал ВНИИГ им. А. Н. Костякова, 2016. – 58 с.
31. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. С. Хомич [и др.] // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527. – DOI: 10.31857/S2587556621040063.
32. Маккавеев, Н. И. Русло реки и эрозия в её бассейне / Н. И. Маккавеев ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Переизд. кн. 1955 г. – М. : Георг. фак. МГУ, 2003. – 353 с.
33. Beven, K. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / K. J. Beven, M. J. Kirkby // *Hydrological Sciences Bulletin*. – 1979. – Vol. 24, No. 1. – P. 43–69. – DOI: 10.1080/02626667909491834.
34. McDonnell, J. J. Are all runoff processes the same? / J. J. McDonnell // *Hydrological Processes*. – 2013. – Vol. 27, No. 26. – P. 4103–4111. – DOI: 10.1002/hyp.10076.
35. Мешик, О. П. Роль снежного покрова в формировании весеннего половодья на реках Беларуси / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // *Мелиорация*. – 2020. – № 4(94). – С. 35–40.
36. Anderson, E. A. A point energy and mass balance model of a snow cover / E. A. Anderson. – Silver Spring, MD : National Weather Service, Office of Hydrology, 1976. – 150 p.
37. McCabe, G. J. Rain-on-snow events in the western United States / G. J. McCabe, M. P. Clark, L. E. Hay // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2007. – Vol. 88, No. 3. – P. 319–328. – DOI: 10.1175/BAMS-88-3-319.
38. Palmer, W. C. Meteorological drought / W. C. Palmer. – Washington, DC : U.S. Weather Bureau, 1965. – 58 p.
39. Seneviratne, S. I. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: a review / S. I. Seneviratne, T. Corti, E. L. Davin [et al.] // *Earth-Science Reviews*. – 2010. – Vol. 99, No. 3–4. – P. 125–161. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
40. Куксина, Л. В. Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков / Л. В. Куксина, В. Н. Голосов, Е. В. Промахова // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. – 2020. – № 1. – С. 11–22.
41. Shakesby, R. A. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent / R. A. Shakesby, S. H. Doerr // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – Vol. 74, No. 3–4. – P. 269–307. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.10.006.
42. Стохастические факторы формирования внезапных ливневых паводков на Черноморском побережье Западного Кавказа и Крыма / Л. В. Куксина, П. А. Белякова, В. Н. Голосов [и др.] // *Известия Русского географического общества*. – 2023. – Т. 155, № 2. – С. 3–24. – DOI: 10.31857/S0869607123020064.
43. Barendrecht, M. H. Exploring drought-to-flood interactions and dynamics: A global case review / M. H. Barendrecht, A. Matanó, H. Mendoza [et al.] // *WIREs Water*. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – Art. e1726. – DOI: 10.1002/wat2.1726.
44. The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies / P. J. Ward, M. C. Ruiters, J. Mård [et al.] // *Water Security*. – 2020. – Vol. 11. – Art. 100070. – DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100070.
45. Pirie, W. Spearman rank correlation: introduction / W. Pirie // *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. – 2014. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118445112.stat02773> (date of access: 01.03.2026).

References

1. Hydroclimate volatility on a warming Earth / D. L. Swain, A. F. Prein, J. T. Abatzoglou [et al.] // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2025. – Vol. 6, No. 1. – P. 35–50. – DOI: 10.1038/s43017-024-00624-z.
2. World Meteorological Organization. 2023 State of Global Water Resources Report. – Geneva : WMO, 2024. – URL: https://wmo.int/sites/default/files/2024-11/2024_State_of_Global_Water_Resources.pdf (date of access: 22.02.2026).
3. What is a drought-to-flood transition? Pitfalls and recommendations for defining consecutive hydrological extreme events / B. J. Anderson, E. Muñoz-Castro, L. M. Tallaksen [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2025. – Vol. 29. – P. 6069–6092. – DOI: 10.5194/hess-29-6069-2025.
4. Challenges in modeling and predicting floods and droughts: a review / M. I. Brunner, L. Slater, L. M. Tallaksen, M. Clark // *WIREs Water*. – 2021. – Vol. 8. – Art. e1520. – DOI: 10.1002/wat2.1520.
5. European Environment Agency. European Climate Risk Assessment: Executive summary. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2024. – 36 p. – DOI: 10.2800/204249.
6. Copernicus Climate Change Service. European State of the Climate 2024. – 2025. – URL: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2024> (date of access: 22.02.2026).
7. World Meteorological Organization. European State of the Climate: extreme events in warmest year on record // WMO Media Centre. – 15 Apr. 2025. – URL: <https://wmo.int/news/media-centre/european-state-of-climate-extreme-events-warmest-year-record> (date of access: 22.02.2026).
8. Global increases in dry-wet abrupt alternation events under climate change / N. He, J. Yin, P. Liu [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2025. – Vol. 52, No. 18. – DOI: 10.1029/2025GL117322.

9. Bridging rarity of drought-flood abrupt alternation events with reverse distributions or reverse copulas / J. Yan, T. Zheng, J. Zhao, J. Luo // *Water Research*. – 2025. – Vol. 287, pt. B. – Art. 124433. – DOI: 10.1016/j.watres.2025.124433.
10. Yin, J. Understanding heatwave-drought compound hazards and impacts on socio-ecosystems / J. Yin, L. Slater // *The Innovation Geoscience*. – 2023. – Vol. 1, No. 3. – Art. 100042. – DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2023.100042.
11. Poles'ya Vostochno-Evropejskoj ravniny : monografiya / YU. A. Mazhayskij, A. A. Volchek, D. A. Ivanov, O. P. Meshik. – Brest : BrGTU, 2024. – 216 s.
12. Floods on the territory of Polesie / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, M. M. Sheshka, I. V. Bulskaya // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 162. – P. 91–97. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.020.
13. Modern trends in river discharge variability in the Pripjat basin and their forecasted assessments / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, S. I. Parfamuk [et al.] // *Vestnik of Brest State Technical University*. – 2025. – № 3 (138). – S. 141–158. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-138-3-141-158.
14. Environmental Risks of Water Resources in the Belarusian Polesie / I. Kirvel, A. Volchak, S. Parfomuk, P. Kirvel // *Limnological Review*. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 21–32. – DOI: 10.3390/limnolrev23010002.
15. Environmental Risks of the Pripjat River in a Changing Climate / A. Volchak, A. Meshyk, Yu. Mazhayskiy, A. Rokochynskiy, J. Jeznach // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 212. – Art. 01015. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201015.
16. Landscape fires disproportionately affect high conservation value temperate peatlands, meadows, and deciduous forests, but only under low moisture conditions / M. Kirkland, P. W. Atkinson, J. W. Pearce-Higgins [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2023. – Vol. 884. – Art. 163849. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163849.
17. World Bank. Strengthening Hydromet and Early Warning Services in Belarus: A Road Map. – Washington, DC : World Bank, 2020. – URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/839291594879784721/pdf/Strengthening-Hydromet-and-Early-Warning-Services-in-Belarus-A-Road-Map.pdf> (date of access: 01.03.2026).
18. Kendall, M. G. Rank correlation methods / M. G. Kendall. – 4th ed. – London : Griffin, 1975. – 202 p.
19. Zolotokrylin, A. N. Bioklimaticheskaya subgumidanaya zona na ravninah Rossii: zasuh, opustynivanie/degradaciya / A. N. Zolotokrylin, E. A. Cherenkova, T. B. Titkova // *Aridnye ekosistemy*. – 2018. – T. 24, № 1(74). – S. 13–19.
20. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. – Rome : FAO, 1998. – (FAO Irrigation and Drainage Paper ; 56).
21. Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate / C. W. Thornthwaite // *Geographical Review*. – 1948. – Vol. 38, No. 1. – P. 55–94. – DOI: 10.2307/210739.
22. McKee, T. B. The relationship of drought frequency and duration to time scales / T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist // *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. – Anaheim, CA : American Meteorological Society, 1993. – P. 179–184.
23. Vicente-Serrano, S. M. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) / S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno // *Journal of Climate*. – 2010. – Vol. 23, No. 7. – P. 1696–1718. – DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
24. Meshik, O. P. Metodologicheskie podhody k ocenke zasuh i zasushlivykh yavlenij / O. P. Meshik, M. V. Borushko // *Kompleksnyj podhod k nauchno-tehnicheskomu obespecheniyu sel'skogo hozyajstva : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati chlena-korr. RASKHN i NANKR, akademika MAEP i RAVN YA. V. Bochkareva. – Ryazan' : RGATU, 2024. – S. 59–65.*
25. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset / M. G. Donat, L. V. Alexander, H. Yang [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2013. – Vol. 118. – P. 2098–2118. – DOI: 10.1002/jgrd.50150.
26. Westra, S. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall / S. Westra, H. J. Fowler, J. P. Evans [et al.] // *Reviews of Geophysics*. – 2014. – Vol. 52, No. 3. – P. 522–555. – DOI: 10.1002/2014RG000464.
27. Mann, H. B. Nonparametric tests against trend / H. B. Mann // *Econometrica*. – 1945. – Vol. 13, No. 3. – P. 245–259. – DOI: 10.2307/1907187.
28. Sen, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau / P. K. Sen // *Journal of the American Statistical Association*. – 1968. – Vol. 63, No. 324. – P. 1379–1389. – DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
29. Pettitt, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem / A. N. Pettitt // *Applied Statistics*. – 1979. – Vol. 28, No. 2. – P. 126–135. – DOI: 10.2307/2346729.
30. Atlas opasnykh meteorologicheskikh yavlenij na territorii Belarusi : ucheb. posobie / V. F. Loginov, A. A. Volchek, V. E. Valuev [i dr.]. – M. : Meshcherskij filial VNIIGiM im. A. N. Kostyakova, 2016. – 58 s.
31. Priznaki aridizacii klimata i ih ekosistemnye proyavleniya na territorii Belarusi / V. F. Loginov, S. A. Lysenko, V. S. Homich [i dr.] // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. – 2021. – T. 85, № 4. – S. 515–527. – DOI: 10.31857/S2587556621040063.
32. Makkaveev, N. I. Ruslo reki i eroziya v eyo bassejne / N. I. Makkaveev ; Mosk. gos. un-t im. M. V. Lomonosova. – Perezid. kn. 1955 g. – M. : Geogr. fak. MGU, 2003. – 353 s.
33. Beven, K. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / K. J. Beven, M. J. Kirkby // *Hydrological Sciences Bulletin*. – 1979. – Vol. 24, No. 1. – P. 43–69. – DOI: 10.1080/02626667909491834.
34. McDonnell, J. J. Are all runoff processes the same? / J. J. McDonnell // *Hydrological Processes*. – 2013. – Vol. 27, No. 26. – P. 4103–4111. – DOI: 10.1002/hyp.10076.
35. Meshik, O. P. Rol' snezhnogo pokrova v formirovanii vesennego polovod'ya na rekah Belarusi / O. P. Meshik, V. A. Morozova, M. V. Borushko // *Melioraciya*. – 2020. – № 4 (94). – S. 35–40.
36. Anderson, E. A. A point energy and mass balance model of a snow cover / E. A. Anderson. – Silver Spring, MD : National Weather Service, Office of Hydrology, 1976. – 150 p.
37. McCabe, G. J. Rain-on-snow events in the western United States / G. J. McCabe, M. P. Clark, L. E. Hay // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2007. – Vol. 88, No. 3. – P. 319–328. – DOI: 10.1175/BAMS-88-3-319.
38. Palmer, W. C. Meteorological drought / W. C. Palmer. – Washington, DC : U.S. Weather Bureau, 1965. – 58 p.
39. Seneviratne, S. I. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: a review / S. I. Seneviratne, T. Corti, E. L. Davin [et al.] // *Earth-Science Reviews*. – 2010. – Vol. 99, No. 3–4. – P. 125–161. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
40. Kuksina, L. V. Prichiny vozniknoveniya i geografiya vnezapnykh livnevnykh pavodkov / L. V. Kuksina, V. N. Golosov, E. V. Promahova // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. – 2020. – № 1. – S. 11–22.
41. Shakesby, R. A. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent / R. A. Shakesby, S. H. Doerr // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – Vol. 74, No. 3–4. – P. 269–307. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.10.006.
42. Stohasticheskie faktory formirovaniya vnezapnykh livnevnykh pavodkov na Chernomorskom poberezh'e Zapadnogo Kavkaza i Kryma / L. V. Kuksina, P. A. Belyakova, V. N. Golosov [i dr.] // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. – 2023. – T. 155, № 2. – S. 3–24. – DOI: 10.31857/S0869607123020064.
43. Barendrecht, M. H. Exploring drought-to-flood interactions and dynamics: A global case review / M. H. Barendrecht, A. Matanó, H. Mendoza [et al.] // *WIREs Water*. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – Art. e1726. – DOI: 10.1002/wat2.1726.
44. The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies / P. J. Ward, M. C. Rutter, J. Mård [et al.] // *Water Security*. – 2020. – Vol. 11. – Art. 100070. – DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100070.
45. Pirie, W. Spearman rank correlation: introduction / W. Pirie // *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. – 2014. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118445112.stat02773> (date of access: 01.03.2026).

Материал поступил 16.03.2026, одобрен 20.03.2026, принят к публикации 30.03.2026