Заключение. На основании комплексного анализа данных установлено, что сезонные факторы в различной степени оказывали влияние на качество исследуемых поверхностных вод по большинству анализируемых показателей. Наиболее выраженные изменения наблюдаются весной (смыв загрязнений) и зимой (влияние подземных вод). Сож демонстрирует худшие показатели по прозрачности и мутности. Днепр характеризуется высокими концентрациями железа. Рекомендуется: увеличение доз коагулянтов и флокулянтов; возможно добавление окислителей для борьбы с органикой и железом. Припять имеет повышенную минерализацию, следовательно, требуется ее снижение и контроль жёсткости.

Список литературы

1 **Игнатенко, О. В.** Оценка качества поверхностных вод Братского водохранилища по гидрохимическим показателям / О. В. Игнатенко, Д. Ф. Барташук // Труды Братского государственного университета. – 2012. – Т. 1. – С. 105–110.

2 **Шкробот, А. А.** Показатели качества водоисточников города Гомеля и Гомельской области / А. А. Шкробот, Е. Н. Макеева // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / Гомельский гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2019. – С. 247–250.

3 **Трякина, А. С.** Научное обоснование расчетных показателей качества исходной воды при выборе технологической схемы водоочистки / А. С. Трякина // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – № 5 (133). – С. 90–95.

4 **Летенкова, И. В.** Химические показатели качества родниковых вод Солецкого района Новгородской области / И. В. Летенкова, В. Ф. Литвинов // Национальная ассоциация ученых. – 2016. – № 6 (22). – С. 107–111.

УДК 551.577.3:551.506.3(476.2)

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ УВЛАЖНЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

О. П. МЕШИК, М. В. БОРУШКО, А. Р. ХЛЫВНЮК, А. С. ПРОТАСЕВИЧ
Брестский государственный технический университет,
Республика Беларусь, omeshik@mail.ru

Белорусское Полесье относится к природно-хозяйственным регионам с высокой климатической уязвимостью и одновременно с сильной антропогенной трансформацией водного режима. На фоне наблюдаемого потепления климата меняется частота и продолжительность гидрометеорологических экстремумов: засух, периодов дефицита влаги в вегетационный период, а также резких переходов в системе: весеннее половодье – засуха – дождевой паводок. Для Белорусского Полесья это означает прямые риски для сельского хозяйства, лесных и болотных экосистем.

При этом управленческие решения в регионе всё чаще требуют не только ретроспективной оценки, но и прогноза по различным сценариям будущего. Стандартные показатели атмосферных осадков или температуры воздуха не отражают комплексный баланс влагообеспеченности, поэтому использование индексов засушливости/увлажнения на различных временных интервалах становится методологически оправданным: эти индексы позволяют количественно сопоставлять условия, оценивать вероятность пороговых состояний и формировать карты и «паспорта риска» для различных территорий и сезонов. Таким образом, выполненные исследования отвечают практическому запросу на научно обоснованный прогноз увлажнённости территории Белорусского Полесья и на инструменты, позволяющие поддержать адаптацию землепользования и управления водным режимом в условиях изменяющегося климата.

Цель работы. Комплексная оценка и прогноз изменений увлажнённости территории Белорусского Полесья на основе индексов SPI и SPEI разных временных масштабов и определение наиболее уязвимых временныъ интервалов по различным климатическим сценариям с формированием прикладных характеристик риска (пороговые уровни, вероятности неблагоприятных состояний, таблицы риска) для поддержки решений по водохозяйственному управлению и адаптации землепользования.

В работе [1] нами проведен анализ индикаторов и индексов засух, и в настоящем исследовании обосновано использование стандартизированного индекса осадков (*standardised precipitation index*, SPI) и стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации (*standardised precipitation evapotranspiration index*, SPEI). Временные масштабы приняты и характеризуют: 3 месяца – сезонную (агроклиматическую) засушливость; 12 месяцев – долгосрочную (гидрологическую) засуху. Численные показатели представляют собой: 0…–0,99 – слабую/незначительную засушливость; –1,00…–1,49 – умеренную засуху; –1,50…–1,99 – сильную засуху; ≤ –2,00 – экстремальную засуху.

SPI рассчитывался по суммам осадков с аппроксимацией гамма-распределением по календарным месяцам; SPEI – по накопленным значениям климатического водного баланса [2].

Прогнозные оценки увлажнённости Белорусского Полесья выполнены до 2050 г. на примере длиннорядных метеостанций Василевичи и Пинск по месячным рядам осадков (P) и температуры (T). Рассмотрены три варианта прогноза: статистический инерционный (STAT) и два сценарных (SSP2-4.5 / SSP5-8.5). Использованы сценарные реализации (DRY / MEDIAN / WET).

Сценарные реализации выбирались по суммарному показателю увлажнённости (водному балансу): DRY (5 %) – «сухая» траектория, соответствующая нижнему 5-му процентилю; MEDIAN (50 %) – типичная (медианная) траектория; WET (95 %) – «влажная» траектория, соответствующая верхнему 95-му процентилю.

Для инерционного статистического прогноза (STAT) использована сезонная модель SARIMAX (*state-space* SARIMA), реализованная в пакете *statsmodels* и оцениваемая методом максимального правдоподобия с применением фильтра Калмана [3]. Вариант STAT описывает возможную эволюцию климатических переменных при сохранении статистической структуры исторических наблюдений (сезонность, автокорреляция, типичная изменчивость) без наложения внешнего сценарного сигнала изменения климата (SSP).

Принятый сценарий SSP2-4.5 относится к промежуточным траекториям социально-экономического развития и выбросов. В долгосрочной перспективе этот сценарий предполагает стабилизацию радиационного воздействия около 4.5 Вт/м² к 2100 г. и умеренные темпы сокращения выбросов при наличии ответственной климатической политики. SSP5-8.5 предполагает энерго- и ресурсозатратное развитие с высокой зависимостью от ископаемого топлива, ведущее к высокому радиационному воздействию порядка 8.5 Вт/м² к 2100 г. В настоящем исследовании сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5 использованы как два контрастных коридора климата будущего (умеренный и высокий) в рамках CMIP6/SSP-матрицы [4 и др.].

Потенциальная эвапотранспирация (PET) рассматривается как функция температуры воздуха (T) и рассчитана по методу Торнтвейта (Thornthwaite, 1948), так как этот метод отличается достаточной простотой. Климатический водный баланс представляет собой разность осадков и эвапотранспирации D = P−PET.

На рисунках 1–3 представлены прогнозные оценки засушливости территории Белорусского Полесья.

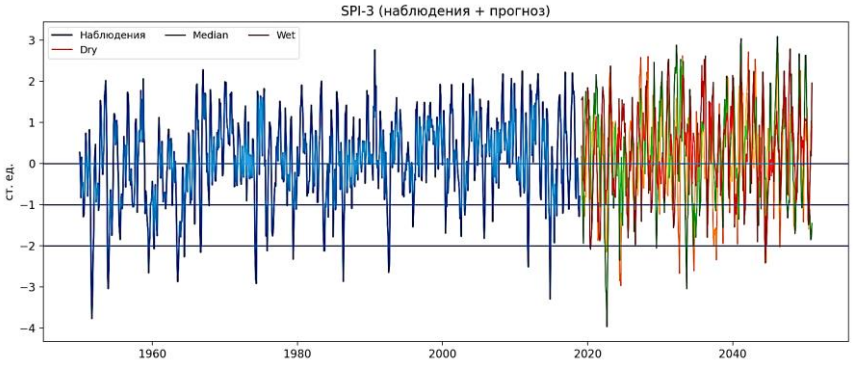


Рисунок 1 – Прогноз SPI-3

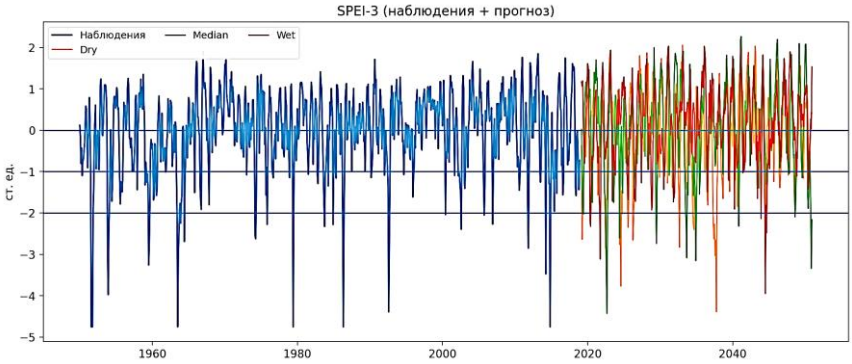


Рисунок 2 – Прогноз SPEI-3

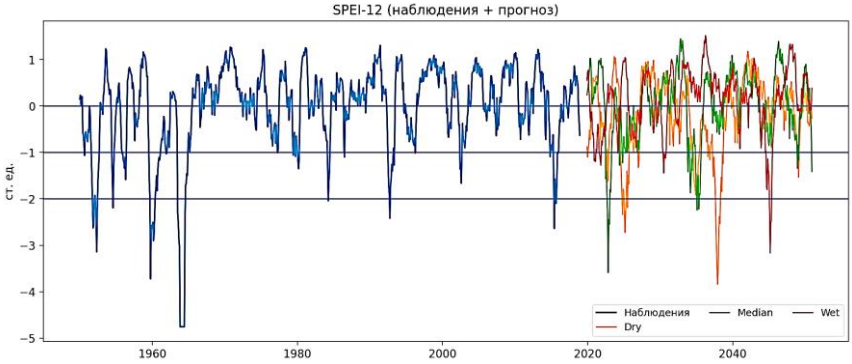


Рисунок 3 – Прогноз SPEI-12

Инерционный статистический прогноз STAT.

2021–2030 гг. Водный баланс преимущественно около нормы, однако его колебания внутри сезона достаточно значимы. Риск умеренной засухи (индекс < -1) уже заметен на сезонных масштабах в 3 месяца.

2031–2040 гг. Усиливается роль дефицита водного баланса в тёплый сезон (апрель – сентябрь) за счет роста эвапотранспирации PET: SPEI реагирует сильнее, чем SPI, т. е. не только осадки, а именно баланс влаги определяет засушливость. Гидрологические засухи (масштаб 12 месяцев) остаются реже, чем сезонные (3 месяца), но их вклад начинает расти при неблагоприятной последовательности сезонов.

2041–2050 гг. Суммарный годовой баланс к 2050 г. получается отрицательным: $P \approx 553{,}7$, $PET \approx 610{,}6$, $D \approx -56{,}9$ мм/год.

Сценарные прогнозы (SSP2-4.5 и SSP5-8.5):

2021–2030 гг. Климатические изменения ещё умеренные: постепенное потепление повышает PET, однако рост осадков частично компенсирует водный баланс. Риски по SPI/SPEI на 3 месяца имеются, однако они ниже, чем в инерционном варианте.

2031–2040 гг. Годовой водный баланс улучшается, но дефицит в тёплый сезон всё равно сохраняется (PET растёт быстрее сезонной прибавки осадков там, где она небольшая). SPEI устойчиво показывает, что именно апрель – сентябрь остаётся сезоном повышенного риска.

2041–2050 гг. По обоим SSP годовой баланс к 2050 г. выходит в плюс: SSP2-4.5 – P ≈ 710,9, PET ≈ 660,6, D ≈ +50,3 мм/год; SSP5-8.5 – P ≈ 748,6, PET ≈ 686,3, D ≈ +62,3 мм/год. Однако тёплый период остаётся дефицитным по водному балансу, т. е. риск засух для агроландшафтов не исчезает даже при росте годовых осадков.

«Карты риска» засухи.

По итоговой оценке (доля месяцев с индексом < −1 за 2020–2050 гг., с учётом исторической изменчивости) получены следующие показатели:

Тёплый сезон (апрель – сентябрь). STAT: риск умеренной засухи значительный: SPI-3 ~12,6 %, SPEI-3 ~13,7 %; при SPI-12 ниже: SPI-12 ~5,3 %, SPEI-12 ~6,6 %. SSP2-4.5 / SSP5-8.5: риски ниже (из-за роста P), однако SPEI-3 всё равно выше SPI-3, т. е. PET «добавляет» засушливость: SPI-3 ~3,5 % / 3,2 %, SPEI-3 ~6,2 % / 6,3 %; SPEI-12 ~0,8 % / 0,7 %.

Холодный сезон (октябрь – март). Риски обычно ниже, чем летом, особенно по SPEI (PET мал), но в инерционном варианте они всё равно есть (за счёт последовательностей сухих месяцев).

В таблице 1 приведены наиболее уязвимые месяцы по отношению к засухам (SPEI-3 < −1), 2020–2050 гг.

При сценарии STAT наиболее уязвимыми являются май – июнь (резкий рост PET) и конец лета, а также октябрь как месяц, чувствительный к летнему дефициту водного баланса. В сценарии SSP2-4.5 с ростом осадков летний риск снижается, однако переходные месяцы (апрель – июнь) всё равно остаются чувствительными. По сценарию SSP5-8.5 несмотря на большее потепление, в принятой параметризации осадки растут так, что суммарно риск умеренной засухи по SPEI-3 имеется, но май – июнь всё равно является пиком уязвимости.

Таблица 1 – **Топ уязвимых месяцев к засухам по вариантам прогноза – % риска**

STAT	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Июнь – 18,4	Май – 9,5	Июнь – 8,0
Октябрь – 15,8	Июнь – 7,7	Май – 8,0
Май – 15,3	Декабрь – 6,3	Декабрь – 6,0
Август – 13,6	Апрель – 6,1	Август – 5,9
Сентябрь – 13,6	Январь – 5,4	Июль – 5,9

Сезонные риски (апрель – сентябрь) засух сильных SPI3 < –1,5 составляют 1,6…7,3 %, SPEI3 < –2,0…3,1–10,4 %; экстремальных SPI3 < –2,0…0,1–2,1 %, SPEI3 < -2,0…1,6–3,6 %. Опасность сильной гидрологической засухи по варианту STAT составляет 4,2 %, экстремальной – 1,0 %.

В заключение необходимо отметить, что до 2050 г. уязвимость территории Белорусского Полесья определяется не столько изменением годовых осадков, сколько сезонным дефицитом влаги (май – сентябрь), усиливаемым ростом эвапотранспирации, поэтому индекс SPEI-3/12 является ключевым индикатором риска, а наиболее эффективное направление адаптации территории к возможным климатическим изменениям – управляемое водорегулирование и удержание воды в тёплый сезон. Это является прерогативой гидротехнических мелиораций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Республики Беларусь.

Список литературы

1 **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 чл.-кор. РАСХН и НАНКР академика МАЭП и РАВН Я. В. Бочкарева / Рязан. гос. агротехнол. ун-т. им. П. А. Костычева. – Рязань, 2024. – С. 59–65.

2 **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, №. 7. – P. 1696–1718.

3 **Durbin J.** Time Series Analysis by State Space Methods. – 2nd ed. / J. Durbin, S. J. Koopman. – Oxford : Oxford University Press, 2012. – P. 346.

4 The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century / O. Fricko. P. Havlik. J. Rogelj [et al.] // Global Environmental Change. – 2017. – Vol. 42. – P. 251–267.

УДК 676.017.66

МЕТОД ОЦЕНКИ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И РАСТВОРИМОСТИ ВЕЩЕСТВ В ВОДЕ

А. С. НЕВЕРОВ, Е. И. ДОЦЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, nev.aleksander2013@yandex.by, alena.dotsenko2012@ yandex.by

Сегодня исследование водопоглощения минеральными вяжущими производят преимущественно посредством выдержки образцов в воде с периодическим их извлечением и взвешиванием [1–3]. При этом при каждом извлечении теряется поглощенная вода при удалении воды с поверхности образцов при протирке ее тканью. Периодичность взвешивания составляет