

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-70-78>
УДК 502.4:556(519.234)

Поступила в редакцию 17.10.2024
Received 17.10.2024

ОЦЕНКИ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛОВЕЖСКОЙ ПУЩИ С УЧЕТОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОПУСКОВ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ НАБЛЮДЕНИЙ

С. А. Лысенко, Е. В. Гапанович

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлены оценки долгопериодных изменений уровня режима подземных вод Беловежской пуши с учетом восстановления пропусков в рядах стационарных гидрогеологических наблюдений. Для заполнения пропусков во временных рядах уровней подземных вод использован модифицированный вариант метода k -ближайших соседей (k -nearest neighbor – KNN), учитывающий как пространственную, так и временную автокорреляцию уровней подземных вод. Предложенный метод позволил реконструировать динамику уровней подземных вод за последние 50 лет с относительной погрешностью менее 2–3 % для грунтовых вод и вод спорадического распространения и менее 10 % для напорных межпластовых вод.

Статистически значимый тренд долгопериодного изменения уровня режима подземных вод на уровне $\alpha = 0,01$ по критерию Манна – Кендалла отмечается для 33 из 40 гидрогеологических скважин. Оценки трендов уровней подземных вод по методу Тейла – Сена показывают, что за период потепления в Беларуси (с 1989 г.) уровни грунтовых вод понизились в среднем на 35 см, напорных вод – на 25, вод спорадического распространения – на 53 см. Наибольшая величина наклона тренда отмечается для вод спорадического распространения Бровского гидрогеологического поста – 0,34 м/10 лет.

Ключевые слова: изменения климата; грунтовые воды; напорные воды; воды спорадического распространения; пропуски данных; гидрогеологический режим; особо охраняемые природные территории.

Для цитирования. Лысенко С. А., Гапанович Е. В. Оценки долгопериодных изменений уровня режима подземных вод Беловежской пуши с учетом восстановления пропусков во временных рядах наблюдений // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 70–78.

ESTIMATION OF THE LONG-PERIOD CHANGES OF GROUNDWATER LEVEL REGIME ON THE TERRITORY OF BELOVEZHSKAYA PUSHCHA TAKING INTO ACCOUNT THE OMISSIONS RESTORATION IN THE TIME SERIES OF OBSERVATIONS

S. A. Lysenko, E. B. Gapanovich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents estimation of the long-period changes of groundwater levels in Belovezhskaya Pushcha taking into account the omissions restoration in the series of stationary hydrogeological observations. A modified version of the k -nearest neighbour (KNN) method, which takes into account both spatial and temporal autocorrelation of groundwater levels, was used to fill in the gaps in the time series of groundwater levels. The proposed method made it possible to reconstruct the dynamics of groundwater levels of different types of different genesis for the last 50 years with a relative error of less than 2–3 % for groundwater and sporadic waters and less than 10 % for pressurised interstratum waters.

Statistically significant trend of long-period change of groundwater levels at the level $\alpha = 0.01$ according to the Mann – Kendall criterion is observed for 33 out of 40 hydrogeological wells, including 13 groundwater wells, 16 sporadic water wells and 4 pressure water wells. Estimates of groundwater level trends using the Theil – Sen method show that during the warming period in Belarus (since 1989) groundwater has decreased on average by 35 cm, pressure water by 25 cm, and sporadic water by 53 cm. The highest value of the trend slope is observed for sporadic waters of the Brovsky hydrogeological post – 0.34 m/10 years.

Keywords: climate change; groundwater; pressure water; sporadic water; data omissions; hydrogeological regime; specially protected natural areas.

For citation. Lysenko S. A., Gapanovich E. V. Estimation of the long-period changes of groundwater level regime on the territory of Belovezhskaya Pushcha taking into account the omissions restoration in the time series of observations *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 70–78.

Введение. В последние десятилетия изменение климата и антропогенная деятельность существенно повлияли на системы пресных подземных вод во всем мире. В Беларуси в настоящее время риск дефицита питьевой воды классифицируется как ниже среднего. Однако за последние 20 лет частота засух существенно возросла. Периоды засухи наблюдались в 2002, 2010, 2013, 2014, 2015, 2018, 2021 и 2023 г. Ожидается, что к 2050 г. в количество летних осадков в большинстве регионов Беларуси сократится, а среднегодовая температура, по сравнению с периодом 1961–1990 гг., повысится на 2,9–3,7 °С, что, несомненно, приведет к изменениям в состоянии подземных вод и скорости пополнения их запасов [1, 2].

В свою очередь, изменение уровня режима и качественного состояния подземных вод может иметь ощутимые последствия для биологической продуктивности и видового разнообразия биоценозов. Особенно уязвимыми в этом плане являются древнейшие реликтовые лесные массивы, сохранившиеся на территории Беловежской пуши.

Как показывают данные наблюдений [3], потепление на территории белорусской части Беловежской пуши происходит без заметных изменений годового и сезонного количества атмосферных осадков. Однако отмечаются изменения в интенсивности, продолжительности выпадения и фазовом составе осадков [4–6]. Количество зимних дней с отрицательными температурами и обильными снегопадами сокращается, при этом увеличиваются число дней с осадками малой интенсивности и продолжительность выпадения осадков в виде дождя и мокрого снега [6]. В летний сезон отмечаются сокращение продолжительности выпадения осадков и одновременное увеличение максимальных сумм осадков, увеличиваются повторяемость засух и продолжительность засушливых периодов [6].

Наблюдаемое изменение климата оказывает значительное воздействие на гидрогеологический режим Беловежской пуши. При этом под угрозой оказываются продуктивность экосистем и биоразнообразие на территории заповедника [7–9]. Для недопущения необратимой утраты биоразнообразия этого уникального природного объекта необходимо понимание текущего состояния и будущих изменений уровня режима его подземных вод.

Цель работы – дать оценку долгопериодным изменениям естественных уровней подземных вод Беловежской пуши с учетом большого количества пропусков в рядах стационарных гидрогеологических наблюдений.

Автозаполнение пропусков во временных рядах гидрогеологических наблюдений. Основой для проведения исследования послужили данные стационарных наблюдений за подземными водами Беловежской пуши по 6 гидрогеологическим постам, включающим 40 наблюдательных скважин на воды различного генезиса (грунтовые воды (со свободной поверхностью), приуроченные к аллювиальным, флювиогляциальным и озерно-болотным отложениям; воды спорадического распространения, приуроченные к песчаным прослоям и линзам в толще моренных отложений; напорные межпластовые воды, приуроченные к днепровско-сожским и березинско-днепровским водноледниковым отложениям) (см. таблицу).

Сеть наблюдательных скважин за подземными водами на территории Беловежской пуши

A network of observation wells for groundwater in the territory of Belovezhskaya Pushcha

Пост	Номера наблюдательных скважин		
	грунтовых	спорадического распространения	напорных
Бровский	662, 663, 665, 666	–	500, 501, 502, 660
Глубонецкий	519, 562, 770, 773	523, 564, 777	513, 514, 515
Каменюцкий	164	635	634
Хвойникский	647, 650	649, 652	–
Центрально-Беловежский, Ляцкие	1350, 1352, 135	643, 645, 653, 655, 656, 657, 659, 704, 706, 707, 710, 712	–

Размещение сети наблюдательных скважин за подземными водами по территории Беловежской пуши является неравномерным и характеризуется высокой локальной густотой наблюдательной сети, отвечающей различным целям ее устройства в разные годы.

Как показал предварительный анализ данных инструментальных наблюдений за уровнем подземных вод (УПВ), исходные данные содержат большое количество пропусков, иногда по году и более, и нуждаются в применении к ним специальных методов заполнения пропусков во временных рядах. Для этой цели нами был использован модифицированный вариант метода k -ближайших соседей (k -nearest neighbor – KNN).

Идея классического метода KNN в задаче пространственной интерполяции данных состоит в следующем. Первоначально выбирают число k и метрику расстояния между точками. Расстояние может

быть любой метрической мерой, однако стандартное евклидово расстояние является наиболее распространенным выбором. Количество ближайших соседей k может быть заданной пользователем константой или изменяться в зависимости от локальной плотности точек в пределах окружности заданного радиуса.

Для каждого пункта наблюдений, в котором на некоторую дату отсутствует значение, выбирают k ближайших соседних пунктов, не имеющих пропусков на эту дату. Значение в центральном пункте вычисляют в виде средневзвешенной суммы значений его ближайших соседей:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{z_i}{d_{i,0}^\alpha}}{\sum_{i=1}^k 1/d_{i,0}^\alpha}, \quad (1)$$

где z_0 и z_i – значения интересующей физической величины в центральном пункте и его ближайших соседей соответственно; $d_{i,0}$ – расстояние до i -го соседа; α – параметр, определяющий радиус окрестности в которой осуществляется поиск соседних пунктов наблюдений (чем выше данный параметр, тем быстрее убывает вклад в каждого соседа с расстоянием до целевого пункта). Таким образом, данный алгоритм включает два априорно задаваемых гиперпараметра – k и α , которые необходимо тщательно выбирать на основе анализа ретроспективных данных.

Недостатком классического варианта KNN в нашей задаче заполнения пропусков во временных рядах гидрогеологических наблюдений являются учет в нем только пространственной корреляции между УПВ на разных скважинах и полное игнорирование их временной корреляции. Кроме того, по причине частых пропусков в данных наблюдений на разных скважинах, множество пунктов наблюдений (скважин) с доступными данными каждый раз будет отличаться, что затрудняет выбор ближайших соседей.

Нами был использован усовершенствованный вариант метода KNN, учитывающий как пространственную, так и временную автокорреляцию УПВ. Интерполяционную модель строим отдельно для каждой пропущенной точки временного ряда УПВ каждой гидрогеологической скважины. Так, для скважины № n , для которой на дату наблюдений t_m по тем или иным причинам не проводилось измерение УПВ $z_n(t_m)$, ищем все доступные на эту дату значения УПВ $z_i(t_m)$ на всех других гидрогеологических скважинах, где $z_i(t_m) \in O_m$ принадлежит множеству наблюдений O_m на дату t_m , причем $z_n(t_m) \notin O_m$ и $i \neq n$. При этом в множество O_m входят наблюдения для всех водоносных горизонтов, вне зависимости от того, к какому горизонту относится скважина n . Далее выбираем все даты пересечения временных рядов из множества $O_m \cup \{z_n(t)\}$ и на их основе составляем выборку для обучения интерполяционной модели для скважины n на дату наблюдений t_m . Компонентами многомерного вектора признаков в этой выборке являются значения УПВ $z_i(t_m)$ на множестве скважин на некоторую дату наблюдения t_m , а целевым параметром – значение УПВ на скважине n – $z_n(t_m)$.

К вышеописанной обучающей выборке данных применяем стандартный метод KNN.

Оптимальное значение k в вышеописанном методе выбираем отдельно для каждой интересующей даты t_m путем вложенной перекрестной проверки с разбиением выборки на обучающие и испытательные блоки. Первоначально строим линейную регрессию между значениями УПВ на целевой скважине и ближайшей к ней скважине, затем аналогичную регрессию строим уже с рассмотрением двух ближайших скважин, затем трех и т. д. Качество восстановления пропущенного значения УПВ на целевой скважине оцениваем на основе вложенной перекрестной проверки по $N = 5$ блокам с данными из обучающей выборки. Для этого организовываем внешний цикл по ближайшим соседям $k = 1, \dots, K$, где K – общее количество доступных на интересующую дату пунктов наблюдений, а также внутренний цикл по N блокам для разбиения временных рядов наблюдательных пунктов на обучающие и испытательные блоки. После обучения KNN-модели на обучающем блоке оцениваем ее эффективность с применением испытательного блока. Оптимальное значение k выбираем таким, при котором достигается минимальное значение средней относительной погрешности (Mean Absolute Percentage Error – MAPE), вычисляемой по результатам испытания модели на испытательных блоках. Значение MAPE для каждого испытательного блока вычисляем по формуле

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n_{\text{samples}}} \sum_{i=0}^{n_{\text{samples}}-1} \frac{|z_i - \hat{z}_i|}{\max(\epsilon, |z_i|)}, \quad (2)$$

где z_i и \hat{z}_i – фактическое и предсказанное моделью значение i -го элемента в испытательном блоке; n_{samples} – общее количество элементов в испытательном блоке; ϵ – произвольное малое, но строго

положительное число, которое вводится для того, чтобы избежать неопределенных результатов, когда z_i близко к нулю.

Если построить график зависимости средней по испытательным блокам зависимости MAPE от параметра k , то получится кривая, похожая на ту, что изображена на рис. 1. Минимальное значение MAPE определяет выбор оптимального значения $k = k_{\text{opt}}$ (в данном случае $k_{\text{opt}} = 10$). Наличие минимума на этом графике связано с тем, что при малых значениях k KNN-модель не обеспечивает удовлетворительной точности интерполяции, а при больших k происходит переобучение (или переподгонка) модели, когда качество модели на обучающей выборке оказывается существенно выше, чем на тестовой выборке.

Анализ точности интерполяции УПВ описанным выше методом для разных скважин на территории Беловежской пуши показывает, что коэффициент корреляции фактических и восстановленных значений УПВ находится на уровне не ниже 0,8.

Статистические оценки относительной погрешности восстановления пропущенных значений УПВ, полученные методом перекрестной проверки, показывают, что для грунтовых вод и вод спорадического распространения MAPE не превышает 2–3 %. Наибольшие величины MAPE (10–15 %) приурочены скважинам на напорные межпластовые воды.

Примеры применения описанного выше метода заполнения пропусков во временных рядах гидрогеологических данных представлены на рис. 2. Видно, что используемый метод позволяет вполне адекватно реконструировать динамику УПВ для всех водоносных горизонтов на протяжении всего периода инструментальных наблюдений.

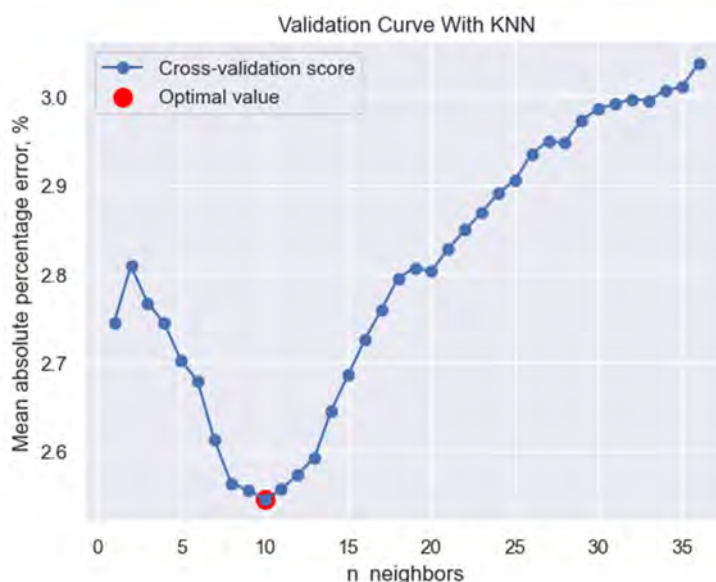


Рис. 1. Средняя по тестовым блокам погрешность MAPE восстановления уровня вод спорадического распространения по скважине № 635 Каменюкского гидрогеологического поста по значениям уровней подземных вод на k соседних скважинах

Fig. 1. Average MAPE error of sporadic water level reconstruction at well no. 635 of Kamenyuk hydrogeological post on the basis of groundwater level values at k neighbouring wells

Анализ долгопериодных трендов изменений уровней подземных вод. Для понимания современных тенденций изменения ресурсов подземных вод Беловежской пуши рассмотрим оценки трендов УПВ для скважин на грунтовые (Ground), напорные (Confined) и воды спорадического распространения (Sporadic).

Стоит отметить, что стандартный метод оценки тренда, основанный на методе наименьших квадратов и вычислении наклона линии регрессии, плохо работает для несимметричных и гетероскедастичных данных, к которым относятся временные ряды УПВ. Кроме того, этот метод чувствителен к выбросам (аномалиям в данных). Для более точного выявления линейного тренда нами была использована непараметрическая оценочная функция Тейла – Сена. Для множества точек на плоскости (t_i, z_i) эта функция определяется как медиана m коэффициентов наклона $(z_j - z_i) / (t_j - t_i)$ по всем парам точек выборки (временного ряда). Точка b пересечения трендом оси z равна медиане значений $y_i - m x_i$.

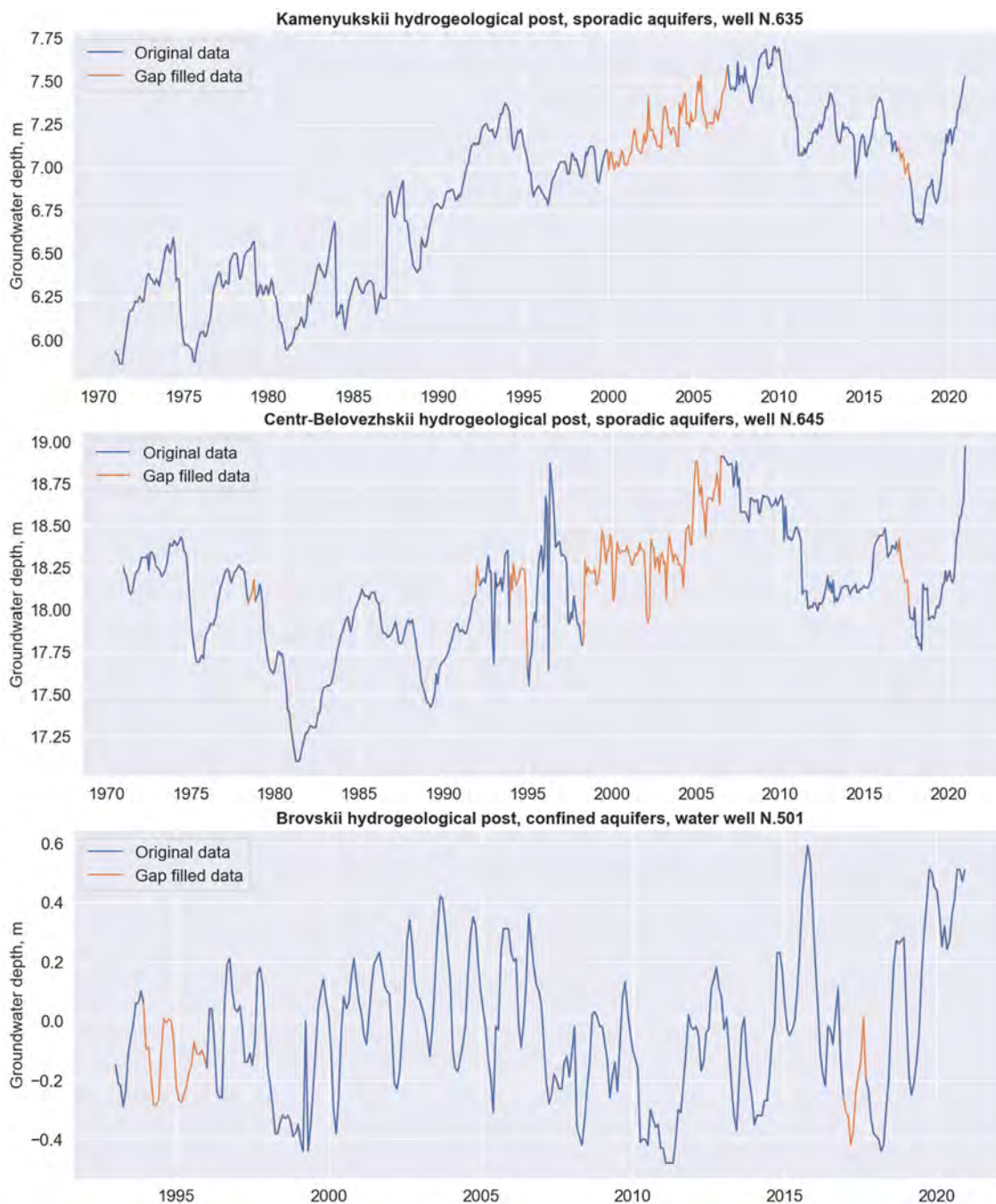


Рис. 2. Примеры заполнения пропусков во временных рядах наблюдательных гидрогеологических скважин, расположенных в белорусской части Беловежской пуши

Fig. 2. Examples of filling in the gaps in the time series of hydrogeological observation wells located in the Belarusian part of Belovezhskaya Pushcha

Нелинейные тренды временных рядов УПВ выделяли методом спектрального сингулярного анализа (ССА) [10], основанном на представлении временного ряда совокупностью скользящих отрезков заданной длины L и применении к ним метода главных компонент. В нашем анализе использовали длину окна $L = 30$ лет, рекомендуемую Всемирной метеорологической организацией для климатического усреднения.

Статистическую значимость трендов оценивали на основе непараметрического теста Манна – Кендалла [11]. Данный тест позволяет принимать или отвергать при заданном уровне значимости α нулевую гипотезу H_0 об отсутствии монотонной тенденции во временном ряду на основании статистик, рассчитываемых по разностям между увеличивающимися или уменьшающимися парами значений в исследуемом временном ряду.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты анализа временных рядов уровней грунтовых и напорных вод. Помимо линейных трендов, оцениваемых для периода современного потепления в Беларуси (с 1989 г.), на графиках также представлены первые компоненты разложения временных рядов, выбирающие наибольшую долю их суммарной дисперсии. Согласно оценкам коэффициента линейного тренда, на рассматриваемых пунктах наблюдений грунтовые воды за период потепления понизились примерно на 63 см, а напорные воды – на 18 см. На более коротких временных масштабах изменчивость подземных вод определяется годовым ходом и квазипериодической компонентой с периодом около 14 лет. Во временном ряду уровня напорных вод помимо прочего присутствует структурный сдвиг (скачкообразное изменение вероятностных характеристик временного ряда), вероятно, вызванный антропогенной деятельностью.

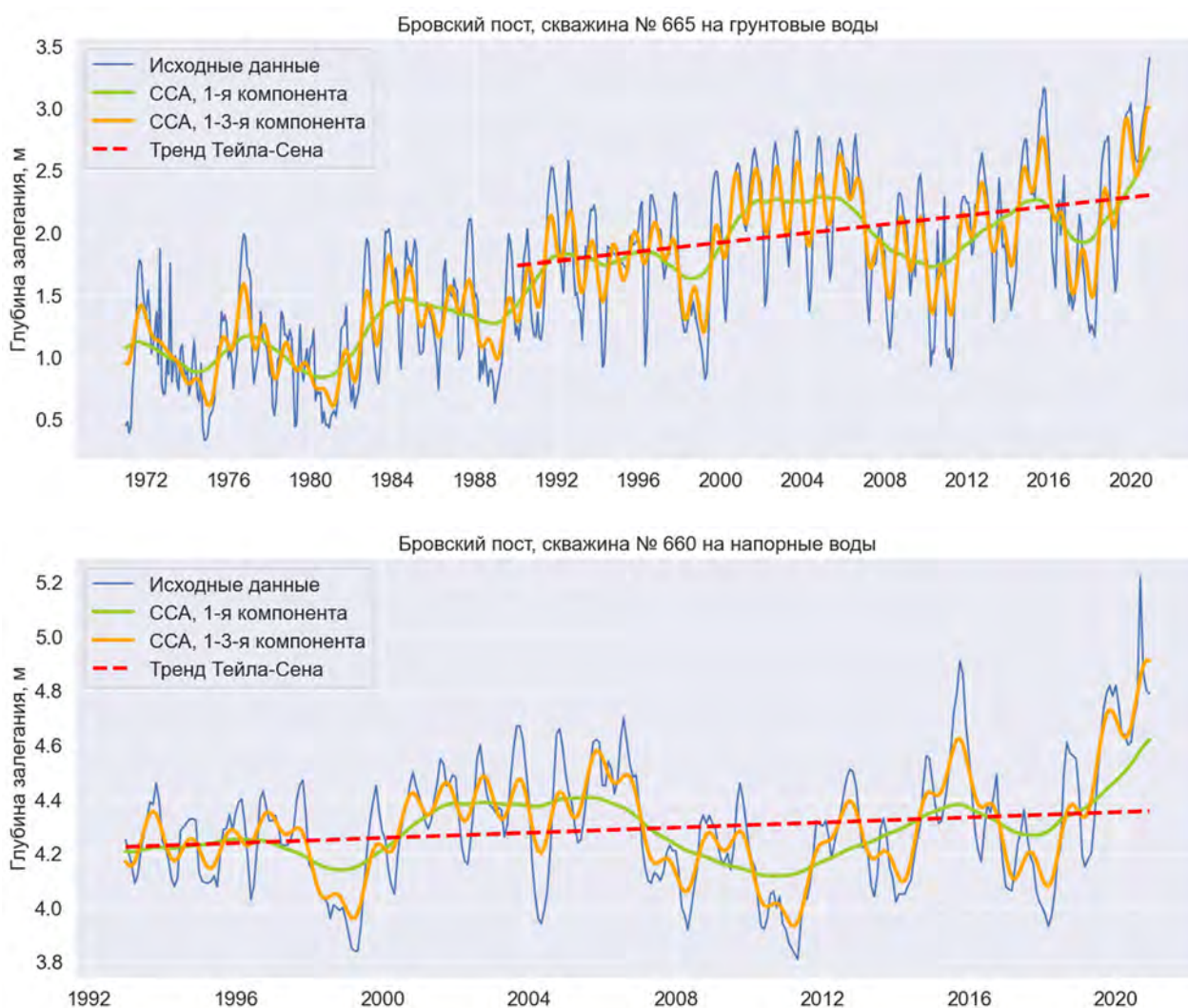


Рис. 3. Временные ряды уровней грунтовых и напорных межпластовых вод по скважинам № 660 и 665 Бровского гидрогеологического поста, первые компоненты их сингулярного спектра и линейные тренды, рассчитанные методом Тейла – Сена

Fig. 3. Time series of groundwater and pressure interstratum water levels at wells no. 660 and 665 of the Brovsky hydrogeological post, the first components of their singular spectrum and linear trends calculated by the Theil – Sen method

Оценки коэффициентов линейных трендов УПВ по всем наблюдательным скважинам Беловежской пуши, систематизированные по типу вод и гидрогеологическим постам, представлены на рис. 4. Статистически значимый тренд УПВ на уровне $\alpha = 0,01$ отмечается для 33 из 40 гидрогеологических скважин, из них 13 скважин на грунтовые воды (87 %), 16 скважин на воды спорадического распространения (89 %) и 4 скважины на напорные воды (57 %). Наибольшая величина наклона тренда отмечается для вод спорадического распространения Бровского гидрогеологического поста – 0,34 м/10 лет.

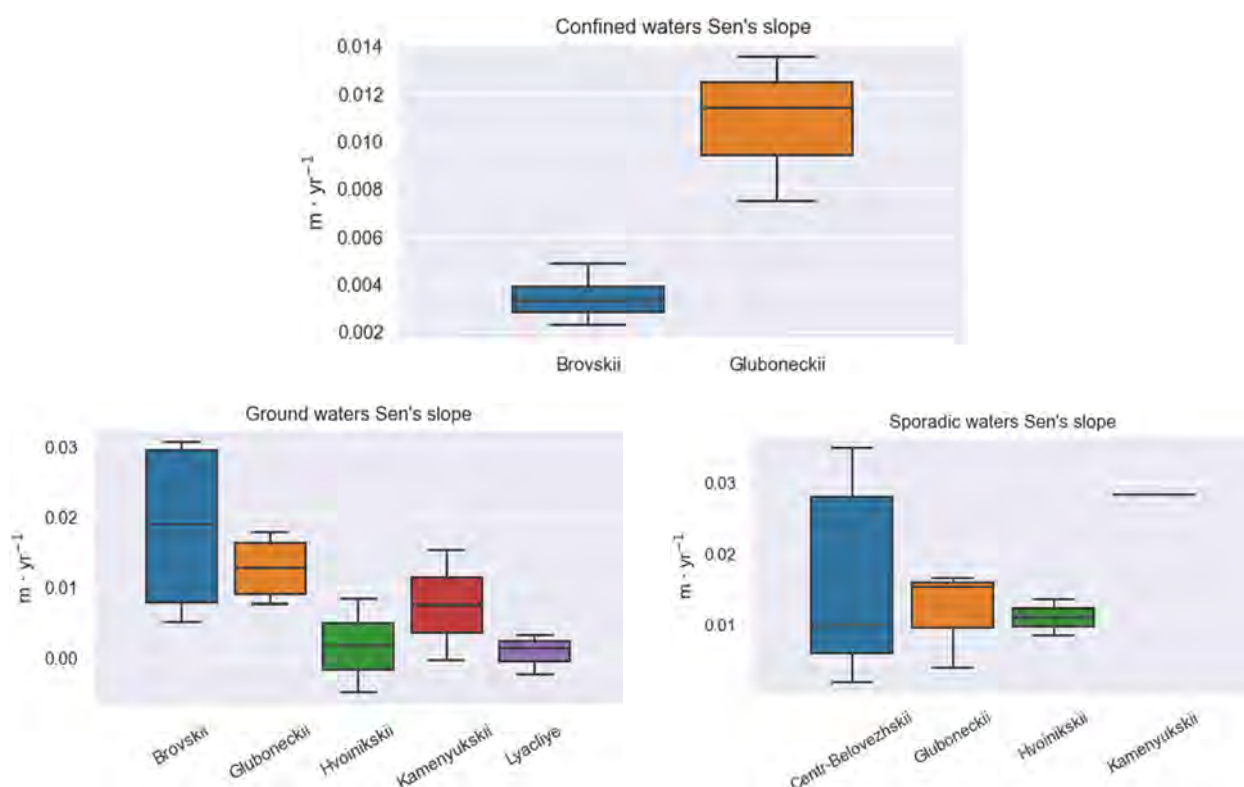


Рис. 4. Оценки коэффициента линейного тренда по методу Тейла – Сена, сгруппированные по типу вод и гидрогеологическим постам

Fig. 4. Estimates of the linear trend coefficient using the Theil – Sen method, grouped by water type and hydrogeological stations

Диаграммы размаха коэффициента линейного тренда для различных типов вод, объединяющие данные всех гидрогеологических скважин Беловежской пуши, представлены на рис. 5. Наибольший коэффициент тренда свойственен водам спорадического распространения, наименьший – напорным водам. Полученные оценки трендов уровней подземных вод показывают, что за период потепления в Беларуси (с 1989 г.) грунтовые воды понизились в среднем на 35 см, напорные воды – на 25, воды спорадического распространения – на 53 см.

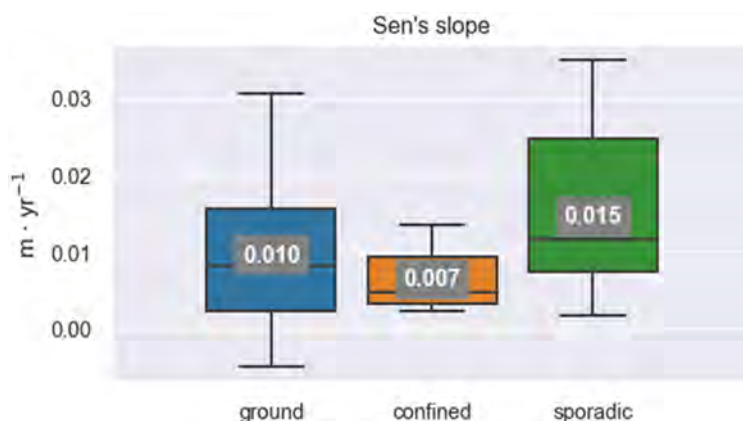


Рис. 5. Коэффициенты наклона тренда, сгруппированные по типу подземных вод

Fig. 5. Trend slope coefficients grouped by groundwater type

Выводы.

1. С использованием модифицированного варианта метода k -ближайших соседей, учитывающего пространственную и временную корреляцию результатов гидрогеологических наблюдений, впервые удалось реконструировать режим уровней грунтовых вод, вод спорадического распространения и напорных межпластовых вод Беловежской пуцци и проанализировать тенденции их изменений за последние 50 лет.

2. Статистически значимый тренд на понижение уровня подземных вод (по критерию Манна – Кендалла при $\alpha = 0,01$) отмечается в 13 из 15 наблюдательных скважин на грунтовые воды, в 16 из 18 скважин на воды спорадического распространения и в 4 из 7 скважин на напорные воды.

3. Наиболее значимые изменения естественных ресурсов подземных вод Беловежской пуцци за отмеченный период коснулись вод спорадического распространения, приуроченных к песчаным прослоям и линзам в толще моренных отложений. Прослеживается устойчивая тенденция к падению их уровней со средней скоростью 15 см / 10 лет. Максимальная величина коэффициента линейного тренда по методу Тейла – Сена отмечается для вод спорадического распространения Бровского гидрогеологического поста – 0,34 м/10 лет.

4. Согласно выполненным оценкам трендов уровней подземных вод, за период потепления в Беларуси (с 1989 г.) уровни грунтовых вод понизились в среднем на 35 см, уровни напорных вод – на 25 и вод спорадического распространения – на 53 см.

Список использованных источников

1. The changing nature of groundwater in the global water cycle / X. Kuang [et al.] // *Science*. – March 1, 2024. – Vol. 383. – P. 950–964.
2. Global groundwater warming due to climate change / S. A. Benz // *Nature Geoscience*. – 2024. – Vol. 17. – P. 545–551.
3. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 239 с.
4. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
5. Мельник, В. И. Изменение количества и вида атмосферных осадков в холодный период на территории Беларуси в условиях современного потепления климата / В. И. Мельник, И. В. Буюков, В. Д. Чернышев // *Природопользование*. – 2019. – № 2. – С. 44–51.
6. Данилович, И. С. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси / И. С. Данилович, В. Ф. Логинов // *Гидрология и климатология*. – 2021. – № 1–2. – С. 35–48.
7. Лысенко, С. А. Взаимосвязь современных изменений испарения и количества осадков в южных регионах Беларуси / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, Ю. А. Бондаренко. – *Природопользование*. – 2020. – № 1. – С. 20–29.
8. Лысенко, С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // *Исследование Земли из космоса*. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
9. Лысенко, С. А. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, П. О. Зайко // *Метеорология и гидрология*. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 59–71.
10. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package / N. Golyandina [et al.] // *J. Stat. Softw.* – 2015. – Vol. 67, № 2. – P. 1–78.
11. Gilbert, R. O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring* / R. O. Gilbert. – New York : Wiley, 1987. – 336 p.

References

1. Kuang X., Liu J., Scanlon B. R., et al. The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science*, March 1, 2024, vol. 383, pp. 950–964.
2. Benz S. A., Irvine D. J., Rau, G. C., et al. Global groundwater warming due to climate change. *Nature Geoscience*, 2024, vol. 17, pp. 545–551.
3. Volchek A. A., et al. *Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetom izmeneniya klimata* [Water resources of Belarus and their forecast taking into account climate change]. Ed. A. A. Volchek, V. N. Korneev. Brest, 2017, 239 p. (in Russian)
4. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate Change in Belarus: Causes, Consequences, Regulatory Opportunities]. Minsk, 2020, 264 p. (in Russian)
5. Mel'nik V. I., Buyakov I. V., Chernyshev V. D. *Izmenenie kolichestva i vida atmosferynykh osadkov v holodnyy period na territorii Belarusi v usloviyah sovremennogo potepleniya klimata* [Changes in the amount and type of atmospheric

- precipitation during the cold period in the territory of Belarus under the conditions of modern climate warming]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 2, pp. 44–51. (in Russian)
6. Danilovich I. S., Loginov V. F. *Tekushchie i ozhidaemye izmeneniya klimata na territorii Belarusi* [Current and expected climate changes on the territory of Belarus]. *Gidrologiya i klimatologiya = Hydrology and climatology*, 2021, no. 1–2, pp. 35–48. (in Russian)
 7. Lysenko S. A., Loginov V. F., Bondarenko Yu. A. *Vzaimosvyaz' sovremennykh izmeneniy ispareniya i kolichestva osadkov v yuzhnykh regionakh Belarusi* [Relationship between modern changes in evaporation and precipitation in the southern regions of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 1, pp. 20–29. (in Russian)
 8. Lysenko S. A. *Klimatoobuslovlennyye izmeneniya bioproduktivnosti nazemnykh ekosistem Belarusi* [Climate-induced changes in bioproductivity of terrestrial ecosystems of Belarus]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploring the Earth from space*, 2019, no. 6, pp. 77–88. (in Russian)
 9. Lysenko S. A., Loginov V. F., Zajko P. O. *Vliyaniye izmeneniy klimata na bioproduktivnost' nazemnykh ekosistem v Belorussko-Ukrainskom Poles'e* [Impact of climate change on the bioproductivity of terrestrial ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2022, vol. 47, no. 2, pp. 59–71. (in Russian)
 10. Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. *J. Stat. Softw.*, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 1–78.
 11. Gilbert R. O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. New York, Wiley, 1987, 336 p.

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Гапанович Екатерина Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kat@tut.by

Information about the authors

Sergey A. Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Ekaterina V. Gapanovich – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Leader Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kat@tut.by
