

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОЛЕБАНИЯ
МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕК БЕЛАРУСИ:
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗА. А. ВОЛЧЕК¹⁾, Д. А. ШПОКА¹⁾¹⁾Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования колебаний максимальных уровней воды рек Беларуси по данным 67 рек, в том числе крупных рек, за 1877–2020 гг. Установлено влияние природных и антропогенных факторов на основные статистические параметры временных рядов максимальных уровней воды рек Беларуси. Предложена методика прогнозирования максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья, которая рассмотрена на конкретном примере.

Ключевые слова: уровень воды; весеннее половодье; гидрологический створ; тренды; модели; прогнозные оценки.

PATTERNS OF FLUCTUATIONS
IN THE MAXIMUM WATER LEVELS OF THE RIVERS OF BELARUS:
CURRENT STATE AND FORECASTA. A. VOLCHAK^a, D. A. SHPOKA^a^aBrest State Technical University, 267 Maskowskaja Street, Brest 224017, Belarus

Corresponding author: A. A. Volchak (volchak@tut.by)

Abstract. The results of a study of fluctuations in maximum water levels based on data from 67 rivers of Belarus, including large rivers, for 1877–2020 are presented. The influence of natural and anthropogenic factors on the main statistical parameters of the time series of the maximum water levels of the rivers of Belarus has been established. A method for predicting the maximum water levels of the spring flood is proposed, which is considered on a specific example.

Keywords: water level; spring flood; hydrological range; trends; models; forecast estimates.

Образец цитирования:

Волчек АА, Шпока ДА. Закономерности колебания максимальных уровней воды рек Беларуси: современное состояние и прогноз. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:45–61.
EDN: SXQWRZ

For citation:

Volchak AA, Shpoka DA. Patterns of fluctuations in the maximum water levels of the rivers of Belarus: current state and forecast. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:45–61. Russian.
EDN: SXQWRZ

Авторы:

Александр Александрович Волчек – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры природообустройства факультета инженерных систем и экологии.

Дарья Александровна Шпока – ведущий специалист по организации учебного процесса факультета инженерных систем и экологии.

Authors:

Alexander A. Volchak, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of environmental engineering, faculty of engineering systems and ecology.
volchak@tut.by

Darya A. Shpoka, leading specialist in educational process organisation, faculty of engineering systems and ecology.
daryashpoka@rambler.ru

Введение

Уровненный режим рек является важной гидрологической характеристикой, необходимой для решения различных теоретических и практических задач в области гидрологии и водного хозяйства. Установление закономерностей пространственно-временных колебаний уровней воды рек позволяет разработать прогнозные модели их уровненного режима. Особое внимание следует уделять изучению максимальных уровней воды, формирующихся на реках Беларуси, как правило, в период весеннего половодья. Половодья выступают неотъемлемой составляющей гидрологического цикла речных экосистем. Проблемы возникают при превращении половодий в наводнения, при которых образуются максимальные уровни воды, происходят затопление и подтопление территорий, занятых промышленными предприятиями, жилыми застройками, сельскохозяйственными полями и угодьями, что приводит к экономическим ущербам и даже человеческим жертвам [1]. Поэтому разработка прогнозных моделей уровненного режима рек является актуальной задачей.

В настоящее время фундаментальных работ, в которых рассматривается уровненный режим рек Беларуси, насчитывается недостаточно для получения полной картины. Имеются отдельные исследования, касающиеся частных вопросов на примерах отдельных рек. Еще меньше работ посвящено моделированию и прогнозированию уровней воды рек страны [2–6].

Практические прогнозные расчеты максимальных уровней воды базируются на принятии гипотезы стационарности естественного процесса их многолетних колебаний, т. е. допустимости переноса режимных характеристик за прошлые годы на будущий период в неизменном виде. Данный подход хорошо зарекомендовал себя при проектировании и эксплуатации большого числа водохозяйственных объектов и гидротехнических сооружений. Однако при разработке методов прогнозирования уровненного режима рек статистическая концепция описания многолетних колебаний максимальных уровней воды в ее традиционной интерпретации не является перспективной. Этот факт связан с тем, что предел предсказуемости стохастических моделей максимальных уровней воды рек на основе марковской последовательности первого порядка равен 1–2 годам при обеспеченности прогноза менее 60 % [1; 7]. Кроме того, возрастающая антропогенная нагрузка, глобальные климатические изменения и другие факторы, несомненно, влияют на статистические параметры временных рядов максимальных уровней воды рек, которые требуют специальных исследований.

Следующим этапом развития концепции случайности применительно к анализу и прогнозу значений временных корреляций максимальных уровней воды рек может стать разработка многомерных эмпирико-статистических моделей множественной регрессии. При этом в многомерном пространстве вектора-предиктора за предшествующий период необходимо определить их пригодность для использования при разработке прогнозов с помощью уравнений множественной регрессии, линейной регрессии, кусочно-линейных уравнений, нейронных сетей и др. Сложными задачами представляются доказательство возможности распространения выявленных зависимостей на прогнозируемый период и прогноз самого вектора-предиктора [8; 9].

Цели настоящего исследования – установление закономерностей пространственно-временных колебаний максимальных уровней воды рек Беларуси, особенностей влияния на их режим природных и антропогенных факторов и разработка соответствующих прогнозных моделей.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат материалы наблюдений Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды за максимальными уровнями воды рек Беларуси по данным 67 гидрологических створов, расположенных на реках страны, за 1877–2020 гг. Для оценки временной структуры максимальных уровней воды использовались данные крупных рек, имеющих длительный период наблюдений (144 года), а именно р. Березины в створе г. Бобруйска, р. Днепр в створах городов Орши и Речицы, р. Западной Двины в створе г. Витебска, р. Неман в створе г. Гродно, а также р. Припяти в створе г. Мозыря [10]. Пропуски в рядах наблюдений восстанавливались с помощью программного комплекса «Гидролог-2» общепринятыми методами гидрологической аналогии с применением данных рек-аналогов¹ [11; 12].

При невозможности подобрать реку-аналог пропуски восстанавливались по уравнению

$$H_{\max} = f(Q_{\max}),$$

где $H_{\max}$ – максимальный уровень воды реки, см; $Q_{\max}$ – максимальный расход воды реки, м³/с.

¹Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения : ТКП 45-3.04-168-2009(02250). Минск : Стройтехнорм, 2010. 55 с.

Искомое значение было получено по наблюдаемым величинам:

$$H_{\max}(t) = a_1 \ln(Q_{\max}(t)) + b_1, \quad (1)$$

где t – расчетный год; a_1, b_1 – эмпирические коэффициенты.

Многолетние колебания максимальных уровней воды в период весеннего половодья H рассматриваются как случайный процесс $H(t)$ с дискретным временем $t \in T$, принимающий целые значения. В частности, значения $t = 1, 2, \dots, k$ относятся к имеющемуся в распоряжении ряду наблюдений за k лет, значения $t = 0, k - 1, k - 2, \dots$ – к предыдущему периоду времени, значения $t = k + 1, k + 2, \dots$ – к следующему. Для описания процесса $H(t)$ задействованы функции математического ожидания $m(t) = M\{H(t)\}$, дисперсии $D(t) = D\{H(t)\}$, среднего квадратического отклонения $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$, распределения вероятностей $F(x, t) = P\{H(t) < x\}$, автокорреляционная функция $R(t, \tau) = \text{corr}\{H(t), H(t + \tau)\}$ и другие инструменты² [13].

Оценка однородности временных рядов максимальных уровней воды осуществлялась на основе генетического анализа условий формирования речного стока путем выявления причин, объясняющих неоднородность исходных данных наблюдений. Первичный анализ однородности гидрологических рядов выполнялся графическими методами, которые предусматривают построение суммарных (интегральных) кривых связи уровней и времени по формуле

$$\sum_{t=1}^T H_{\max} = f(t), \quad (2)$$

где $\sum_{t=1}^T H_{\max}$ – нарастающая сумма максимальных уровней воды во времени; T – период наблюдений³.

Статистическая однородность исследуемых временных рядов максимальных уровней воды рек в период весеннего половодья оценивалась с помощью параметрических тестов, в частности различия в средних значениях измерялись t -критерием Стьюдента, а различия в характере колебаний уровня режима – F -критерием Фишера по формулам

$$t_{\text{кр}} = \frac{\bar{H}_{\max_1} - \bar{H}_{\max_2}}{\sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}},$$

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2},$$

где $\bar{H}_{\max_1}, \bar{H}_{\max_2}$ – выборочные средние значения максимальных уровней воды; σ_1^2, σ_2^2 – выборочные дисперсии; n_1, n_2 – объемы выборок⁴ [13; 14].

Полученные значения t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера сравнивались с их критическими величинами при заданном уровне значимости ($\alpha = 5\%$). При $t_{\text{кр}} > t_{\text{кр}_\alpha}$ принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних значений, при $F > F_\alpha$ – гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов.

Тенденция колебаний максимальных уровней воды оценивалась с использованием линейных трендов по уравнению

$$H_{\max}(t) = H_{\max}(0) \pm \Delta H_{\max} t, \quad (3)$$

где $H_{\max}(0)$ – максимальный уровень воды реки в начальный момент времени, см; $\pm \Delta H_{\max}$ – средний градиент скорости изменения максимального уровня воды за год, см [9; 10].

Измерение степени влияния различных факторов на уровеньный режим рек осуществлялось сравнительными методами за отдельные периоды. Для этого исходные временные ряды максимальных уровней воды разбиты на следующие интервалы: период до 1965 г. (отсутствие массовых мелиораций, минимальное антропогенное воздействие и условно-естественный водный режим) и период с 1966 по 2020 г. (антропогенное воздействие и потепление климата). Последний, в свою очередь, разделен на период 1966–1987 гг. (массовые мелиорации) и период 1988–2020 гг. (современные климатические изменения).

²Волчек А. А. Гидрологические расчеты : учеб. пособие. М. : Кнорус, 2021. 418 с.

³Там же.

⁴Статистические методы в природопользовании : учеб. пособие / В. Е. Валуев [и др.]. Брест : Брест. политехн. ин-т, 1999. 252 с.

В работе использованы статистические методы анализа временных рядов, в основе которых лежат научные представления о стохастической природе изменчивости уровня режима рек. Метод системного анализа накопленной информации и сравнительно-географический метод позволили синтезировать наиболее важные закономерности временных колебаний максимальных уровней воды⁵ [13].

При построении прогнозных моделей, когда тренд явно не выражен, рассматривались выборочные автокорреляционные и частные автокорреляционные функции процесса формирования максимальных уровней воды рек, с помощью которых определялся характер изменения уровня режима. При этом применялись критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели, приведенные в публикациях [8; 15; 16].

Практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике максимальных уровней воды рек, а именно плавного возрастания или убывания (монотонного тренда), периодических изменений (циклического тренда), постоянства в течение каких-то периодов времени и резкого изменения при переходе от одного отрезка к другому (ступенчатого тренда). Эти ситуации могут быть описаны полиномиальной аппроксимацией тренда вида

$$H_{\max}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i h_i(t),$$

где $h_i(t)$ – заданные функции времени; $a_0, \dots, a_k$ – коэффициенты регрессии [8].

Функции времени могут быть либо линейными, степенными, показательными или логарифмическими при монотонном тренде, либо тригонометрическими при циклическом тренде и кусочно-постоянными при ступенчатом тренде. Во всех этих случаях параметры $a_0, \dots, a_k$ оцениваются по имеющемуся ряду наблюдений $H_{\max_1}, \dots, H_{\max_n}$.

Результаты проведенных нами исследований закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды рек Беларуси позволяют считать установленным наличие определенной связи между стоками смежных лет [17–19]. Данный факт служит основанием для описания максимальных уровней воды в виде простой марковской цепи

$$H_{\max}(t) = r(1)H_{\max}(t-1) + \xi(t),$$

где $r(1)$ – коэффициент автокорреляции; $\xi(t)$ – независимая от $\bar{H}_{\max}$ случайная величина [8].

Первое слагаемое в правой части уравнения (4) можно трактовать как максимальный уровень воды, который обусловлен зимними атмосферными осадками предшествующего года, аккумулярованными бассейном реки, и сбросом их в русло в данном году. При этом случайная величина $\xi(t)$, очевидно, должна включать в себя и часть максимального уровня воды текущего года, сформированную за счет зимних осадков этого года. Запишем следующее уравнение:

$$H_{\max}(t) = a_2 H_{\max}(t-1) + b_2 W_{\text{ос}}(t) + \xi(t), \quad (4)$$

где a_2, b_2 – эмпирические коэффициенты; $W_{\text{ос}}(t)$ – осадки, предшествующие половодью текущего года [8].

Результаты и их обсуждение

Пространственная структура средних максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья по данным инструментальных наблюдений до 2015 г. в абсолютных отметках представлена на рис. 1. Она устойчиво коррелирует с рельефом Беларуси и максимальными расходами рек во время весеннего половодья [3; 20]. Наибольшие значения максимальных уровней воды рек наблюдаются в центре страны, в районе Белорусской антеклизы и Вилейского погребенного выступа, а также на ее северо-востоке, вблизи городов Шклова и Горки. Их наименьшие значения фиксируются на западе и юго-востоке страны.

На рис. 2 представлена пространственная структура изменений средних максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья за выбранные расчетные интервалы.

Для анализа временной структуры максимальных уровней воды отобраны крупные реки Беларуси, имеющие наибольший период наблюдений – с 1877 по 2020 г. Не измеренные значения за отдельные годы восстановлены с применением данных рек-аналогов⁶. В случае невозможности подбора реки-аналога использовано уравнение (1) с коэффициентами, приведенными в табл. 1.

⁵Статистические методы в природопользовании... 252 с.

⁶Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения... 55 с.

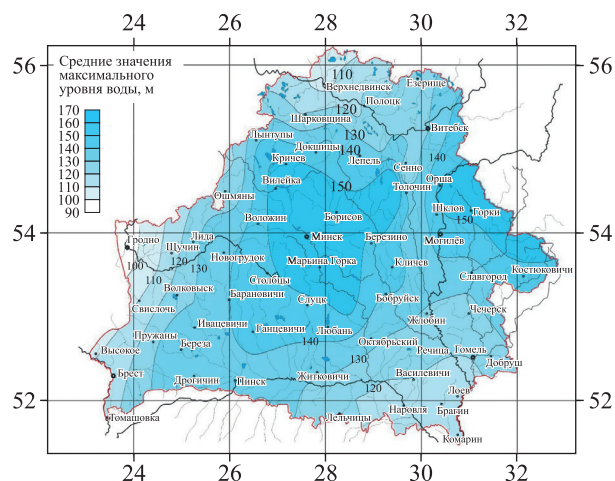


Рис. 1. Пространственная структура средних значений максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья по данным инструментальных наблюдений до 2015 г. в абсолютных отметках

Fig. 1. Spatial structure of the average values of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period according to instrumental observations up to 2015 in absolute marks

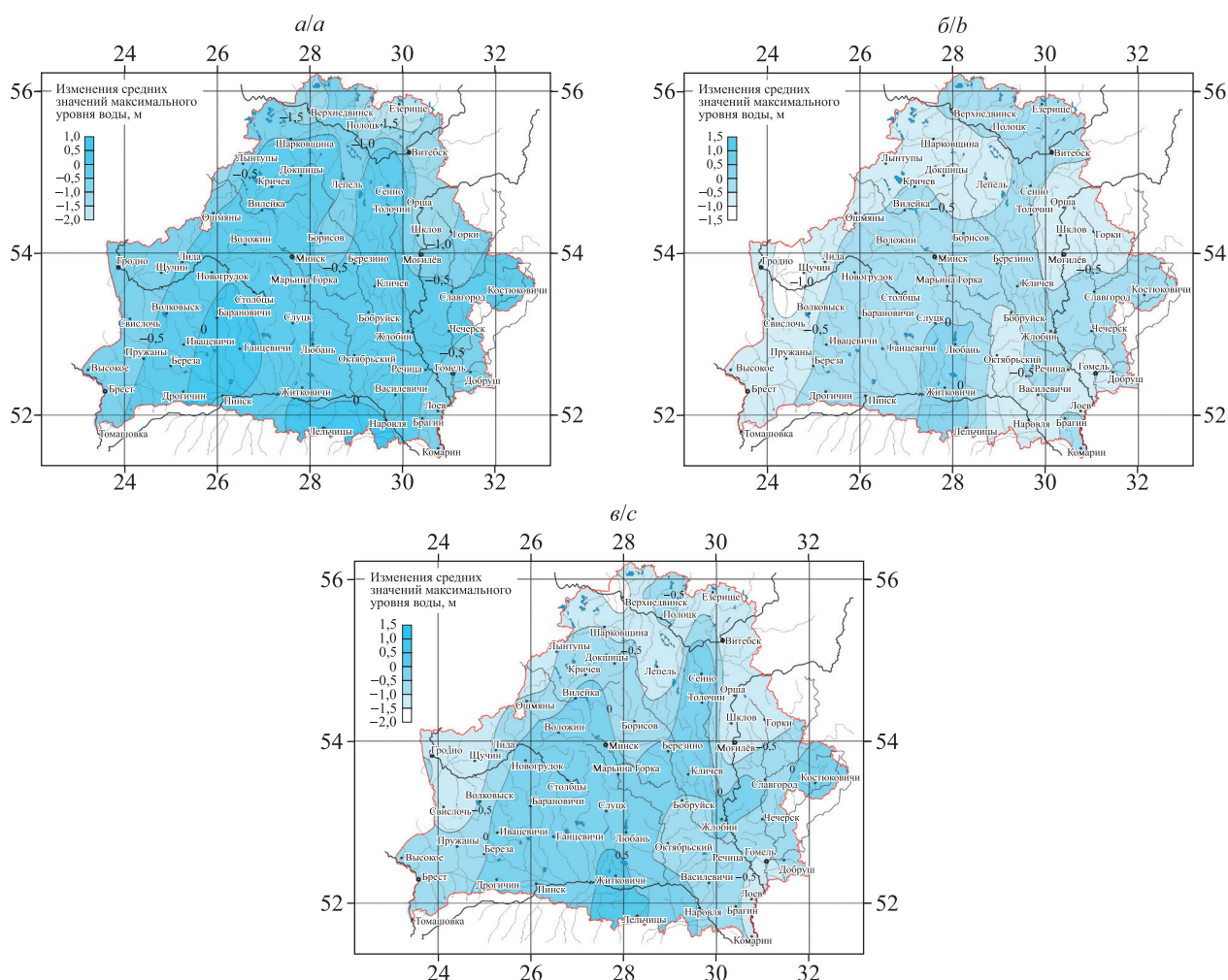


Рис. 2. Пространственная структура изменений средних значений максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья за различные интервалы в абсолютных отметках:

а – за 1877–1965 гг. по отношению к 1966–1987 гг.; б – за 1966–1987 гг. по отношению к 1988–2015 гг.;

в – за 1877–1965 гг. по отношению к 1966–2015 гг.

Fig. 2. Spatial structure of changes in average values of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period over various intervals in absolute marks: а – for 1877–1965 in relation to 1966–1987; б – for 1966–1987 in relation to 1988–2015; в – for 1877–1965 in relation to 1966–2015

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты уравнения (1)
для анализа временной структуры максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья за отдельные годы

Table 1

Empirical coefficients of the equation (1)
for analysing the time structure of the maximum water levels of rivers of Belarus
during the spring flood period for individual years

Река	Годы с отсутствием измеренных уровней	Нуль поста, мБС	Коэффициенты		
			a_1	b_1	r
Березина в створе г. Бобруйска	1877–1880, 1918–1920, 1940, 1942–1944	132,17	132,78	–494	0,94
Днепр в створе г. Орши	1877–1880, 1923, 1924, 1942–1944	148,96	345,46	–1753	0,98
Днепр в створе г. Речицы	1877–1894, 1931–1934	114,47	124,16	–500	0,95
Западная Двина в створе г. Витебска	1942–1944	123,72	446,62	–2507	0,96
Неман в створе г. Гродно	1877–1880, 1916–1921, 1937, 1938, 1944	91,31	230,85	–1168	0,90
Припять в створе г. Мозыря	1877–1880, 1918, 1942	110,93	182,69	–829	0,97

Примечания: 1. Здесь и далее значения приведены в метрах по Балтийской системе высот (мБС), символом r обозначен коэффициент корреляции. 2. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

После восстановления пропущенных значений временные ряды максимальных уровней воды в период весеннего половодья проверялись на однородность с использованием интегральной кривой (формула (2)). Как показал анализ, все исследуемые временные ряды являются однородными, что позволяет использовать стандартные статистические методы.

Наибольшие значения максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья за 1877–2020 гг. представлены в табл. 2. К катастрофическим наводнениям относятся наводнения, которые повторяются раз в 100–200 лет и реже. Такие наводнения отмечались на р. Березине в створе г. Бобруйска и р. Днепр в створе г. Орши (536 и 949 см соответственно).

Таблица 2

Наибольшие значения максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья за 1877–2020 гг.

Table 2

The highest values of the maximum water levels of rivers of Belarus
during the spring flood period for 1877–2020

Река	Нуль поста, мБС	$H_{\max}$, см	Дата
Березина в створе г. Бобруйска	132,17	536	26 апреля 1931 г.
Днепр в створе г. Орши	148,96	949	23 апреля 1931 г.
Днепр в створе г. Речицы	114,47	584	24–26 апреля 1958 г.
Западная Двина в створе г. Витебска	123,72	1268	28 апреля 1931 г.
Неман в створе г. Гродно	91,31	893	23 апреля 1958 г.
Припять в створе г. Мозыря	110,93	742	22–24 апреля 1895 г.

Хронологический многолетний ход максимальных уровней воды исследуемых рек Беларуси в период весеннего половодья представлен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, повсеместно наблюдается снижение максимальных уровней воды, особенно во время массовых крупномасштабных мелиораций. При стабилизации мелиоративных воздействий и современном потеплении климата эти процессы замедляются и речные экосистемы принимают новое устойчивое равновесие.

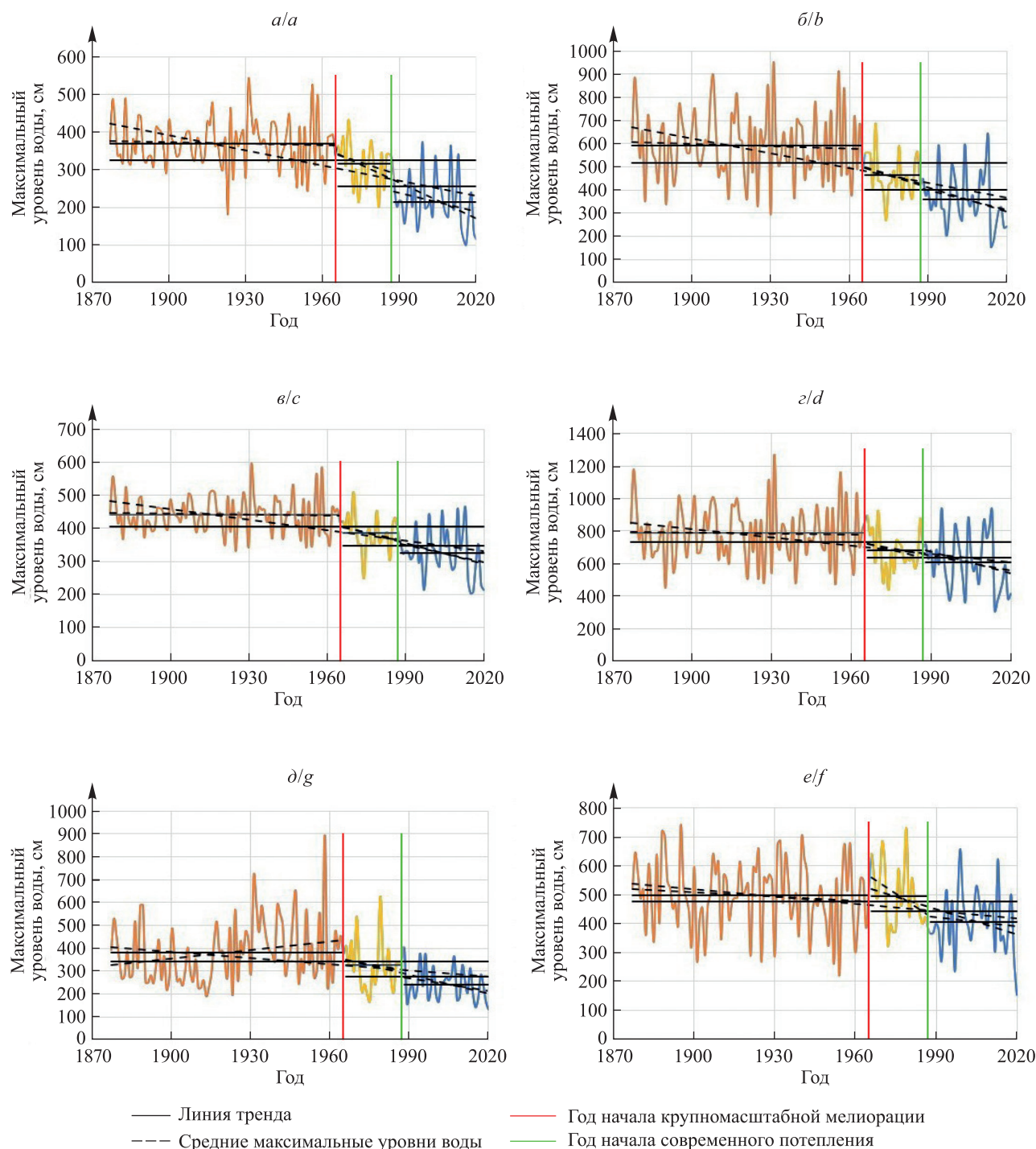


Рис. 3. Хронологический многолетний ход максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья:

a – р. Березины в створе г. Бобруйска; *б* – р. Днепр в створе г. Орши;
в – р. Днепр в створе г. Речицы; *г* – р. Западной Двины в створе г. Витебска;
д – р. Неман в створе г. Гродно; *е* – р. Припяти в створе г. Мозыря

Fig. 3. Chronological long-term course of maximum water levels of rivers of Belarus during the spring flood period:

a – Berezina River in the Bobruisk section; *b* – Dniipro River in the Orsha section;
c – Dniipro River in the Rechitsa section; *d* – Zapadnaya Dvina River in the Vitebsk section;
g – Neman River in the Grodno section; *f* – Pripyat River in the Mozyr section

В ходе анализа временных рядов максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья по данным крупных рек получены выборочные оценки основных статистических характеристик за рассматриваемые интервалы (табл. 3).

Таблица 3

Основные статистические характеристики максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья за различные интервалы

Table 3

Main statistical characteristics of maximum water levels of the rivers of Belarus
during the spring flood period over various intervals

Период наблюдений	Количество лет наблюдений	$H_{\max}$, см	Коэффициенты		
			C_v	C_s	$r(1)$
Березина в створе г. Бобруйска					
1877–2020	144	326	0,28	–0,36	0,45
1877–1965	89	370	0,17	0,08	–0,14
1966–2020	55	255	0,32	0,11	0,38
1966–1987	22	316	0,19	–0,29	0,04
1988–2020	33	215	0,32	0,68	0,03
Днепр в створе г. Орши					
1877–2020	144	519	0,32	0,24	0,29
1877–1965	89	592	0,24	0,23	–0,18
1966–2020	55	402	0,30	0,21	0,29
1966–1987	22	463	0,20	0,42	0,04
1988–2020	33	361	0,33	0,60	0,19
Днепр в створе г. Речицы					
1877–2020	144	406	0,19	–0,38	0,40
1877–1965	89	442	0,12	0,33	–0,18
1966–2020	55	349	0,20	–0,14	0,32
1966–1987	22	385	0,14	–0,19	0,15
1988–2020	33	325	0,22	0,24	0,21
Западная Двина в створе г. Витебска					
1877–2020	144	729	0,25	0,17	0,18
1877–1965	89	787	0,21	0,28	–0,12
1966–2020	55	637	0,25	0,04	0,28
1966–1987	22	679	0,19	0,25	0,15
1988–2020	33	609	0,29	0,24	0,28
Неман в створе г. Гродно					
1877–2020	144	342	0,38	1,08	0,27
1877–1965	89	382	0,34	1,03	0,09
1966–2020	55	277	0,35	1,20	0,25
1966–1987	22	300	0,46	–0,08	0,16
1988–2020	33	243	0,30	0,62	–0,09
Припять в створе г. Мозыря					
1877–2020	144	477	0,25	–0,06	0,09
1877–1965	89	498	0,24	–0,27	–0,07
1966–2020	55	441	0,26	0,25	0,25
1966–1987	22	494	0,22	0,52	0,27
1988–2020	33	406	0,26	0,05	0,01

Примечания: 1. Здесь и далее C_v – коэффициент вариации, C_s – коэффициент асимметрии. 2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Исходя из табл. 3, средние значения максимальных уровней воды в период весеннего половодья за 1877–2020 гг. составляют на р. Березине в створе г. Бобруйска 326 см, на р. Днепр в створе г. Орши 519 см, на р. Днепр в створе г. Речицы 406 см, на р. Западной Двине в створе г. Витебска 729 см, на р. Неман в створе г. Гродно 342 см и на р. Припяти в створе г. Мозыря 477 см. Наибольшие значения средних максимальных уровней воды наблюдались с начала инструментальных наблюдений до начала крупномасштабной мелиорации – с 1877 по 1965 г.

Коэффициент вариации за 1988–2020 гг. больше аналогичного показателя за 1877–2020 гг. у всех рек, кроме р. Неман в створе г. Гродно. Наименьший размах колебаний максимальных уровней воды в период весеннего половодья зафиксирован на р. Днепр в створе г. Речицы ($C_v = 0,19$), а наибольший – на р. Неман в створе г. Гродно ($C_v = 0,38$). Наблюдается положительная асимметрия. Соответствующие коэффициенты не превышают значения 1, что свидетельствует о распределении, близком к нормальному. Несильная асимметрия свойственна анализируемым параметрам р. Неман в створе г. Гродно. Коэффициенты автокорреляции, которые характеризуют внутрирядные связи хронологических величин максимальных уровней воды, за период наблюдений являются значимыми для максимальных уровней воды всех рек, кроме р. Припяти в створе г. Мозыря.

Эмпирические кривые обеспеченности отвечают трехпараметрическому гамма-распределению при $C_s = (1-2)C_v$. Поскольку функция распределения вероятностей максимальных уровней воды в период весеннего половодья при таких оценках параметров несущественно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым.

Тенденции в колебаниях максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья измерялись с помощью линейных трендов, параметры которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры линейных трендов временных рядов максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья для различных интервалов

Table 4

Parameters of linear trends of time series of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period for various intervals

Река	Параметры	Период наблюдений				
		1877–2020	1877–1965	1966–2020	1966–1987	1988–2020
Линейный тренд (см. уравнение (3))						
Березина в створе г. Бобруйска	$\pm\Delta$	–13,31	–1,24	–31,48	–22,20	–17,16
	r	–0,62	–0,05	–0,62	–0,24	–0,24
Днепр в створе г. Орши	$\pm\Delta$	–21,47	–3,59	–34,88	–33,90	–27,70
	r	–0,55	–0,06	–0,47	–0,23	–0,23
Днепр в створе г. Речицы	$\pm\Delta$	–10,55	–1,02	–20,55	–16,32	–17,31
	r	–0,58	–0,05	–0,46	–0,20	–0,23
Западная Двина в створе г. Витебска	$\pm\Delta$	–16,34	–2,10	–30,34	–39,05	–44,40
	r	–0,38	–0,03	–0,30	–0,20	–0,24
Неман в створе г. Гродно	$\pm\Delta$	–8,98	12,40	–27,33	–17,78	–18,96
	r	–0,29	–0,24	–0,45	–0,11	–0,25
Припять в створе г. Мозыря	$\pm\Delta$	–8,42	–5,03	–29,30	–61,74	–10,72
	r	–0,29	–0,11	–0,41	–0,37	–0,10
Зависимость между максимальным уровнем и максимальным расходом воды реки (см. уравнение (1))						
Березина в створе г. Бобруйска	a_1	131,71	102,78	146,80	109,50	151,17
	b_1	–486	–290	–590	–348	–625
	r	0,93	0,92	0,92	0,94	0,89
Днепр в створе г. Орши	a_1	342,66	356,50	307,64	320,78	286,26
	b_1	–1731	–1823	–1516	–1585	–1394
	r	0,96	0,93	0,95	0,97	0,94

Окончание табл. 4
Ending of the table 4

Река	Параметры	Период наблюдений				
		1877–2020	1877–1965	1966–2020	1966–1987	1988–2020
Днепр в створе г. Речицы	a_1	125,78	105,09	159,69	133,79	174,55
	b_1	–510	–352	–745	–560	–846
	r	0,95	0,94	0,93	0,98	0,91
Западная Двина в створе г. Витебска	a_1	446,92	464,11	405,39	426,43	404,10
	b_1	–2508	–2630	–2224	–2382	–2210
	r	0,96	0,96	0,96	1,0	0,94
Неман в створе г. Гродно	a_1	222,23	248,39	192,67	226,45	143,46
	b_1	–1111	–1291	–922	–1127	–631
	r	0,88	0,85	0,89	0,96	0,78
Припять в створе г. Мозыря	a_1	169,40	174,54	158,38	155,29	154,13
	b_1	–734	–770	–660	–631	–636
	r	0,93	0,96	0,88	0,87	0,86

Примечания: 1. Здесь и далее $\pm \Delta$ – средний градиент скорости изменения максимального уровня воды за 10 лет, см. Значение этого параметра вычислено по формуле (2). 2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Как видно из табл. 4, наибольшее значение среднего градиента скорости изменения максимальных уровней воды в период весеннего половодья наблюдалось за 1966–2020 гг. у всех рек, кроме р. Западной Двины в створе г. Витебска. Здесь же зафиксировано его наименьшее значение (–44,40 см за 10 лет), которое было зарегистрировано в 1988–2020 гг. Связь расходов и уровней воды является устойчивой и статистически значимой.

Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних значений, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) при изменении периодов осреднения применительно к максимальным уровням воды во время весеннего половодья ($n = 144$ года). При этом использовались данные пяти интервалов исследуемого временного ряда: 1) периода наблюдений (1877–2020); 2) периода естественного режима (1877–1965); 3) периода крупномасштабных мелиораций (1966–1987); 4) периода современных климатических изменений (1988–2020); 5) периода антропогенного воздействия и климатических изменений (1966–2020). В табл. 4 приведены основные статистические параметры этих интервалов, а в табл. 5 – матрица статистических критериев (t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера) и их критические значения.

Таблица 5

Статистические критерии для различных интервалов
временного ряда максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья и их критические значения

Table 5

Statistical criteria for different time series intervals
of the maximum water levels of the rivers of Belarus
during the spring flood period and their critical values

Период наблюдений	Период наблюдений					
	1966–2020		1966–1987		1988–2020	
	t -Критерий Стьюдента для средних значений	F -критерий Фишера для дисперсий	t -Критерий Стьюдента для средних значений	F -критерий Фишера для дисперсий	t -Критерий Стьюдента для средних значений	F -критерий Фишера для дисперсий
<i>Бережина в створе г. Бобруйска</i>						
1877–1965	8,87/1,99	1,65/1,48	3,79/2,03	1,16/1,89	11,23/2,01	1,18/1,57
1966–1987	3,61/2,01	1,91/1,92	–	–	–	–
1988–2020	2,47/2,0	1,40/1,73	5,78/2,01	1,37/2,0	–	–

Окончание табл. 5
Ending of the table 5

Период наблюдений	Период наблюдений					
	1966–2020		1966–1987		1988–2020	
	<i>t</i> -Критерий Стьюдента для средних значений	<i>F</i> -критерий Фишера для дисперсий	<i>t</i> -Критерий Стьюдента для средних значений	<i>F</i> -критерий Фишера для дисперсий	<i>t</i> -Критерий Стьюдента для средних значений	<i>F</i> -критерий Фишера для дисперсий
<i>Днепр в створе г. Орши</i>						
1877–1965	8,55 /1,98	1,46/1,52	5,10 /2,01	2,34 /1,88	9,01 /2,0	1,49/1,68
1966–1987	2,38 /2,01	1,61/1,93	–	–	–	–
1988–2020	1,56/2,0	1,02/1,73	3,55 /2,01	1,57/2,0	–	–
<i>Днепр в створе г. Речицы</i>						
1877–1965	8,27 /1,99	1,69 /1,48	4,42 /2,03	1,03/1,88	8,47 /2,01	1,72 /1,57
1966–1987	2,41 /2,01	1,75/1,93	–	–	–	–
1988–2020	1,52/2,0	1,02/1,66	3,53 /2,01	1,79/2,0	–	–
<i>Западная Двина в створе г. Витебска</i>						
1877–1965	5,33 /1,98	1,01/1,52	3,34 /2,02	1,78/1,88	5,0 /2,0	1,09/1,57
1966–1987	1,21/2,01	1,62/1,93	–	–	–	–
1988–2020	0,74/2,0	1,20/1,66	1,71/2,01	1,95/2,0	–	–
<i>Неман в створе г. Гродно</i>						
1877–1965	5,50 /1,98	1,83 /1,52	2,02/2,02	1,45/1,88	7,41 /1,98	3,33 /1,68
1966–1987	1,89/2,03	1,26/1,75	–	–	–	–
1988–2020	1,86/1,99	1,82 /1,73	3,18 /2,03	2,29 /1,90	–	–
<i>Припять в створе г. Мозыря</i>						
1877–1965	2,84 /1,98	1,09/1,52	0,16/2,03	1,19/1,88	4,13 /2,0	1,29/1,68
1966–1987	1,88/2,02	1,09/1,93	–	–	–	–
1988–2020	1,47/1,99	1,18/1,73	2,96 /2,02	1,09/1,90	–	–

Примечания: 1. До косой черты приведены статистические критерии, после нее – их критические значения. 2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

При изучении закономерностей многолетних колебаний уровня режима рек несомненный интерес представляет анализ динамики максимальных уровней воды и обобщенных характеристик атмосферной циркуляции. Для исследования в качестве последних обычно используются параметры классификации, разработанной Г. Я. Вангенгеймом и А. А. Гирсом и основанной на трех типах атмосферной циркуляции – западном (W), восточном (E) и меридиональном (C). Подробно этот вопрос для метеорологических рядов рассмотрен в монографии В. Ф. Логинова [21], в которой приведен их полный анализ.

Как видно из табл. 6, наибольшие значения среднегодовых максимальных уровней воды наблюдались в 1929–1939 гг. при восточном типе атмосферной циркуляции на р. Березине в створе г. Бобруйска (394 см) и р. Неман в створе г. Гродно (467 см). При меридиональном типе атмосферной циркуляции в 1940–1948 гг. на р. Днепр в створе г. Орши этот показатель составил 598 см, на р. Днепр в створе г. Речицы – 454 см, на р. Западной Двине в створе г. Витебска – 803 см, в 1877–1890 гг. на р. Припяти в створе г. Мозыря – 540 см. Средний градиент скорости изменения максимальных уровней воды в период весеннего половодья имеет максимальное значение в 2011–2020 гг. при восточном типе атмосферной циркуляции у всех рек, кроме р. Неман в створе г. Гродно. Что касается зависимости $H_{\max} = f(Q_{\max})$, тренды являются статистически значимыми, не прослеживается связь между максимальным уровнем и максимальным расходом воды р. Западной Двины в створе г. Витебска.

Проверка гипотезы однородности анализируемых параметров максимальных уровней воды для периодов с разными типами атмосферной циркуляции основана на использовании *t*-критерия Стьюдента и *F*-критерия Фишера. В то же время для отдельных интервалов с преобладанием того или иного типа атмосферной циркуляции выполняются условия стационарности. Переход от одного состояния к другому происходит в естественном режиме под воздействием внешних климатических факторов, существенно изменяющих соотношение между осадками и испарением в пределах территории бассейнов рек. В итоге можно сделать вывод о том, что многолетние колебания максимальных уровней воды рассматриваемых рек вызваны климатическими факторами, причина кроется в процессах крупномасштабного влагообмена в системе океан – атмосфера – суша [8].

Основные статистические параметры максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья для различных интервалов

Table 6

Main statistical parameters of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period for various intervals

Период наблюдений	Количество лет наблюдений	Тип атмосферной циркуляции	Статистические параметры							
			$H_{\max, \text{cp}}$, см	C_v	$r(1)$	Линейный тренд		Зависимость между максимальным уровнем и максимальным расходом воды реки (см. уравнение (1))		
						$\pm \Delta$	r	a_1	b_1	r
Березина в створе г. Бобруйска										
1877–1890	14	C	382	0,16	–0,10	–15,48	0,10	84,66	–169	0,80
1891–1928	38	W	363	0,15	–0,19	–0,04	0	104,51	–300	0,88
1929–1939	11	E	394	0,17	–0,08	–68,91	0,33	109,41	–328	0,99
1940–1948	9	C	377	0,15	0,10	–57,58	0,28	108,62	–331	0,85
1949–1964	16	E + C	357	0,23	–0,38	35,44	0,19	104,33	–305	0,99
1965–1988	24	E	314	0,18	0,04	–24,19	0,30	110,46	–354	0,94
1989–2010	22	W	229	0,28	–0,21	21,32	0,22	135,99	–535	0,83
2011–2020	10	E	181	0,41	0,24	–110,85	0,45	161,30	–695	0,99
Днепр в створе г. Орши										
1877–1890	14	C	594	0,25	–0,07	–163,70	0,45	333,44	–1636	0,82
1891–1928	38	W	595	0,22	0,19	–10,58	0,09	345,87	–1765	0,93
1929–1939	11	E	590	0,32	–0,64	–202,55	0,10	380,51	–1989	0,99
1940–1948	9	C	598	0,19	0,02	–107,53	0,25	325,37	–1606	0,96
1949–1964	16	E + C	584	0,28	–0,51	17,35	0,05	408,94	–2170	1,0
1965–1988	24	E	463	0,19	0,05	–30,10	0,07	317,69	–1568	0,96
1989–2010	22	W	373	0,27	–0,04	7,08	0,05	309,07	–1537	0,90
2011–2020	10	E	326	0,47	0,34	–275,39	0,55	275,14	–1323	0,98
Днепр в створе г. Речицы										
1877–1890	14	C	448	0,13	–0,13	–39,99	0,30	118,46	–445	0,87
1891–1928	38	W	440	0,10	0,01	3,03	0,07	90,56	–249	0,98
1929–1939	11	E	449	0,14	–0,27	–59,71	0,31	123,54	–480	0,94
1940–1948	9	C	454	0,11	–0,08	–32,83	0,18	109,51	–385	0,99

1949–1964	16	E + C	431	0,17	–0,42	17,81	0,11	119,59	–453	0,99
1965–1988	24	E	385	0,14	0,16	–18,57	0,25	134,13	–562	0,98
1989–2010	22	W	337	0,18	–0,05	17,12	0,18	166,24	–794	0,97
2011–2020	10	E	293	0,30	0,39	–157,94	0,54	185,25	–924	0,98
<i>Западная Двина в створе г. Витебска</i>										
1877–1890	14	C	779	0,22	0,31	–270,51	0,66	–270,51	0,66	0,31
1891–1928	38	W	786	0,20	0,10	–24,29	0,18	–24,29	0,18	0,10
1929–1939	11	E	789	0,30	–0,53	–339,73	0,48	–339,73	0,48	–0,53
1940–1948	9	C	803	0,13	–0,04	54,10	0,14	54,10	0,14	–0,04
1949–1964	16	E + C	780	0,25	–0,43	31,15	0,07	31,15	0,07	–0,43
1965–1988	24	E	688	0,18	0,24	–43,17	0,24	–43,17	0,24	0,24
1989–2010	22	W	631	0,25	0,07	10,76	0,04	10,76	0,04	0,07
2011–2020	10	E	551	0,39	0,42	–439,21	0,62	–439,21	0,62	0,42
<i>Неман в створе г. Гродно</i>										
1877–1890	14	C	390	0,32	0,06	19,60	0,07	181,79	–855	0,81
1891–1928	38	W	327	0,30	–0,01	28,34	0,32	220,35	–1138	0,77
1929–1939	11	E	467	0,27	0,13	–126,03	0,34	253,36	–1274	0,86
1940–1948	9	C	457	0,31	0,10	–144,67	0,28	270,77	–1397	0,96
1949–1964	16	E + C	406	0,40	–0,42	30,25	0,09	280,18	–1466	0,98
1965–1988	24	E	332	0,32	0,18	–11,29	0,08	223,91	–1112	0,96
1989–2010	22	W	249	0,28	–0,14	19,30	0,18	118,44	–472	0,70
2011–2020	10	E	213	0,29	0,12	–93,03	0,46	184,56	–898	0,94
<i>Припять в створе г. Мозыря</i>										
1877–1890	14	C	540	0,22	–0,15	46,62	0,16	125,50	–406	0,80
1891–1928	38	W	493	0,23	–0,15	14,42	0,14	191,95	–894	1,0
1929–1939	11	E	510	0,25	–0,13	–105,36	0,27	185,08	–847	1,0
1940–1948	9	C	509	0,23	0,38	–206,61	0,49	184,08	–841	0,99
1949–1964	16	E + C	460	0,30	–0,09	61,94	0,21	188,03	–863	0,99
1965–1988	24	E	490	0,22	0,31	–62,64	0,41	158,07	–653	0,87
1989–2010	22	W	424	0,22	0,03	40,23	0,28	122,56	–410	0,82
2011–2020	10	E	372	0,36	–0,14	–216,77	0,49	226,22	–1139	0,99

Примечания: 1. $H_{\max_{\text{ср}}}$ – среднегодовой максимальный уровень воды реки, см. 2. Полуторным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Построение прогнозных моделей

Рассмотрим методику прогнозирования максимальных уровней воды в период весеннего половодья на примере конкретной реки, в частности р. Березины в створе г. Бобруйска, так как она является самой крупной внутренней рекой Беларуси.

На первом этапе выполнен анализ полноты и корректности данных о максимальных уровнях воды реки. В силу различных обстоятельств здесь не велись наблюдения в годы, информация о которых представлена в табл. 1. С использованием данных рек-аналогов восстановлены пропущенные значения. В связи с тем, что во время Великой Отечественной войны не осуществлялся мониторинг всей гидрологической сети, применялось уравнение (1) с эмпирическими коэффициентами $a_1 = 132,78$, $b_1 = -494$, так как значения максимальных расходов были восстановлены ранее [4; 7]. Далее по формуле (2) проведена оценка однородности временного ряда графическим методом (рис. 4).

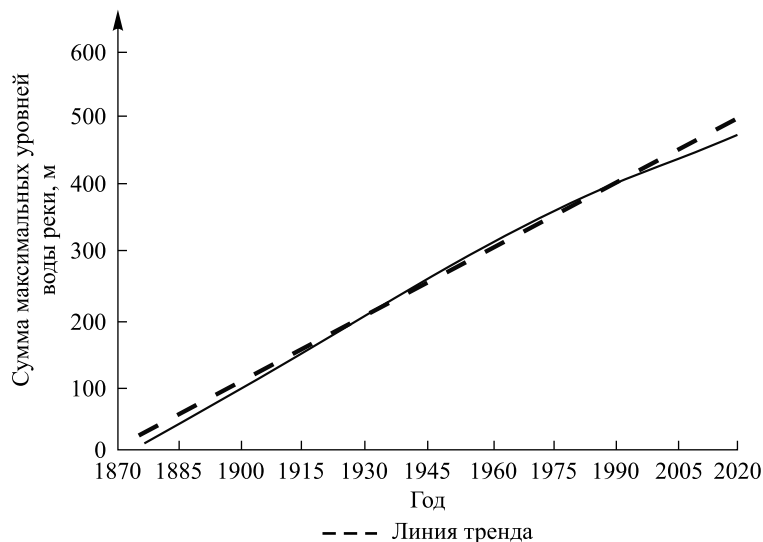


Рис. 4. Изменение нарастающей суммы максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска в период весеннего половодья во времени

Fig. 4. Change of the increasing sum of maximum water levels of the Berezina River in the Bobruisk section during the spring flood period over time

Как видно из рис. 4, наметилась тенденция к уменьшению величин максимальных уровней воды, что согласуется с результатами вышеприведенных исследований.

Для выбора структуры модели прогнозирования максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска рассмотрены автокорреляционная и частная автокорреляционная функции данного процесса, с помощью которых определяется характер изменения уровней воды (рис. 5).

Исследуемый временной ряд максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска не отвечает моделям, представленным в публикациях [9; 16] в полной мере. Поэтому он идентифицирован моделями AP(1) и AP(2).

Модель AP(1) имеет следующий вид:

$$H_{\max}(t) = \bar{H}_{\max} + r(1)[H_{\max}(t-1) - \bar{H}_{\max}] + \xi(t), \quad (5)$$

где $\xi(t)$ – белый гауссовский шум с нулевым средним значением. При этом $\sigma_{\xi} = \sigma_H \sqrt{1 - r(1)^2}$.

В соответствии с уравнением (5) для временного ряда максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска при $r(1) = 0,45$ и $\bar{H}_{\max} = 326$ см (см. табл. 3), а также при $\sigma_{\xi} = 80,45$ см и $\sigma = 90,09$ см получаем выражение

$$H_{\max}(t) = 0,45H_{\max}(t-1) + 179 + \xi(t).$$

В свою очередь, модель AP(2) имеет следующий вид:

$$H_{\max}(t) = \bar{H}_{\max} + r(1)[H_{\max}(t-1) - \bar{H}_{\max}] + r(2)[H_{\max}(t-2) - \bar{H}_{\max}] + \xi(t), \quad (6)$$

где $r(2)$ – коэффициент автокорреляции при сдвиге на 2 года.

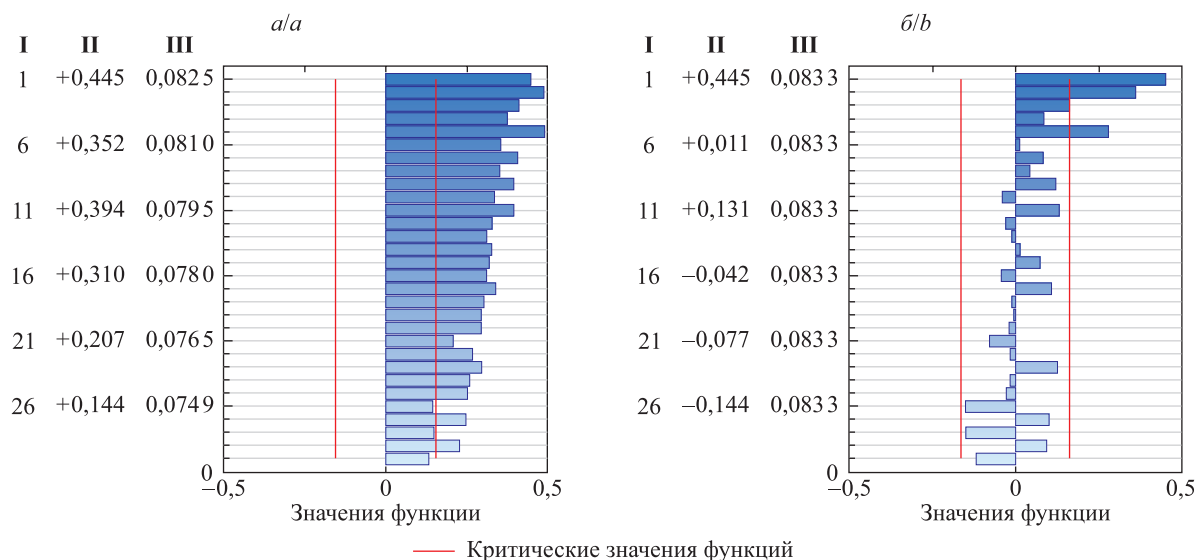


Рис. 5. Автокорреляционная (а) и частная автокорреляционная (б) функции максимальных уровней воды в период весеннего половодья на примере р. Березины в створе г. Бобруйска. В колонке I указаны лаги временного ряда, в колонке II – значения функций, в колонке III – ошибки параметра функции

Fig. 5. Autocorrelation (a) and partial autocorrelation (b) functions of maximum water levels during the spring flood period on the example of the Berezina River in the Bobruisk section. In the column I the lags of the time series are indicated, in the column II – the values of the function, in the column III – errors of the function parameter

В соответствии с уравнением (6) для временного ряда максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска при $r(1) = 0,45$, $r(2) = 0,51$ и $H_{\max_{\text{cp}}} = 326$ см (см. табл. 3), а также при $\sigma_{\xi} = 80,45$ см и $\sigma = 90,09$ см получаем выражение

$$H_{\max}(t) = 0,45H_{\max}(t-1) + 0,51H_{\max}(t-2) + 13,04 + \xi(t).$$

Нами предпринята попытка описать колебания максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска с помощью сложной марковской модели со сдвигом до 30 лет. Регрессионно-корреляционный анализ показал, что для ее построения могут использоваться параметры $H(t-7)$, $H(t-13)$, $H(t-15)$ и $H(t-21)$. Запишем частный вид модели:

$$H(t) = 0,32H(t-7) + 0,26H(t-13) + 0,28H(t-15) + 0,28 \cdot H(t-21) - 72 + \xi(t).$$

Коэффициент множественной корреляции полученного уравнения ($R = 0,67$) значительно превышает теоретический предел значимости ($R^T = 0,19$) при 109 степенях свободы и уровне значимости 5 %. В интервал ± 5 % попало 28,1 % всех точек, в интервал ± 10 % – 39,5 %, в интервал ± 15 % – 55,3 %, в интервал ± 20 % – 65,8 % точек.

Практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике основных гидрологических характеристик. Применительно к р. Березине в створе г. Бобруйска для максимальных уровней воды уравнение (4) примет вид

$$H(t) = 0,77H(t-1) + 0,52W_{\text{oc}}(t) + 21 + \xi(t).$$

Коэффициент множественной корреляции полученного уравнения ($R = 0,51$) превышает теоретический предел значимости ($R^T = 0,24$) при 72 степенях свободы и уровне значимости 5 %. В интервал ± 5 % попало 29,7 % всех точек, в интервал ± 10 % – 36,5 %, в интервал ± 15 % – 48,6 %, в интервал ± 20 % – 56,8 % точек.

Таким образом, полученные прогнозные уравнения дают приемлемые результаты и могут использоваться при решении определенных водохозяйственных и гидротехнических задач.

Заключение

Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик максимальных уровней воды рек Беларуси за 144-летний период позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике уровня режима, обусловленных естественно-климатическими

колебаниями гидрологического цикла и антропогенным воздействием. Стационарность процесса многолетних колебаний максимальных уровней воды имеет место лишь на отдельных отрезках временных рядов.

При изучении закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды рек использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса этого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических. По результатам исследований формируется вид прогнозной модели, а по данным наблюдений осуществляется ее настройка. Рассматриваемые прогнозные модели требуют совершенствования в части привлечения современных математических методов для описания процессов, происходящих не только в русле реки, но и на водосборе, с учетом дальнейшего развития региона.

Библиографические ссылки

1. Мажайский ЮА, Рокочинский АН, Волчек АА, Мешик ОП, Езнах Е, редакторы. *Природно-ресурсный потенциал. Том 1*. Рязань: Мешерский филиал Всероссийского НИИ гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова; 2018. 408 с. (Природообустройство Полесья; книга 1).
2. Квач ЕГ. Особенности гидрологического режима трансграничных водных объектов Республики Беларусь и Российской Федерации. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2023;4:93–104. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_3.
3. Логинов ВФ, Волчек АА, Волчек АНА. *Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз*. Минск: Беларуская навука; 2014. 244 с.
4. Волчек АА. Водные ресурсы Беларуси и экологические риски. *Вопросы географии*. 2023;157:81–104. DOI: 10/24057/probl.geogr.157.4.
5. Ободовский АГ, Станкевич АП, Афанасьев СА, редакторы. *Управление трансграничным бассейном Днепра: суббасейн реки Припять*. Киев: Кафедра; 2012. 447 с.
6. Куприянов ВВ, редактор. *Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 5, Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Часть 1*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1966. 718 с.
7. Раткович ДЯ. *Многолетние колебания речного стока: закономерности и регулирование*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1976. 255 с.
8. Ismailylov GK, Fedorov VM. Analysis of long-term, variations in the Volga annual runoff. *Water Resources*. 2001;28(5):469–476. DOI: 10.1023/A:1012342203595.
9. Loginov VF, Volchak AA. Variations in Neman River annual runoff near Grodno Town. *Water Resources*. 2006;33(6):608–615. DOI: 10.1134/S0097807806060029.
10. Волчек АА, Парфомук СИ, Шпока ДА. Оптимизация количества гидрометрических постов наблюдений за уровнем воды на реках Беларуси. *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. 2023;3:81–91.
11. Волчек АА. Автоматизация гидрологических расчетов. В: Голуб МВ, редактор. *Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды. Материалы Международной научно-практической конференции по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений; 17–18 февраля 1998 г.; Биберах, Германия – Брест, Беларусь – Ноттингем, Великобритания*. Брест: Брестский политехнический институт; 1998. с. 55–59.
12. Волчек АА, Сидак СВ. К вопросу восстановления пропусков в гидрологических рядах наблюдений. In: Ministry of Education and Science of Georgia, Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection. *9th International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction»; 2019 July 25–27; Tbilisi, Georgia*. Tbilisi: Ministry of Education and Science of Georgia; 2019. p. 296–300. Co-published by the Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection.
13. Логинов ВФ, Волчек АА, Шведовский ПС. *Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов*. Брест: Брестский государственный технический университет; 2004. 301 с.
14. Христофоров АВ. *Теория случайных процессов в гидрологии*. Москва: Издательство МГУ; 1994. 141 с.
15. Бокс Дж, Дженкинс Г. *Анализ временных рядов, прогноз и управление*. Левшин АЛ, переводчик; Писаренко ВФ, редактор. Москва: Мир; 1974. 406 с.
16. Любушин АА, Писаренко ВФ, Болгов МВ, Рукавишников ТА. Исследование общих эффектов вариаций стока рек. *Метеорология и гидрология*. 2003;7:76–88. EDN: PVFRDX.
17. Волчек АА, Шпока ДА. Колебания максимальных уровней воды реки Припять. *Природопользование*. 2023;1:27–40. DOI: 10.47612/2079-3928-2023-1-27-40.
18. Волчек АА, Шпока ИН, Шпока ДА. Оценка колебаний уровней воды реки Лесная в условиях современного потепления климата. *Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. 2019;2:23–28. EDN: TNRHNV.
19. Волчек АА, Шпока ИН, Шпока ДА. Оценка колебаний максимальных уровней воды рек бассейна Припяти на территории Беларуси. *Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. 2020;2:27–30. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-27-30.
20. Мясніковіч МУ, рэдактар. *Нацыянальны атлас Беларусі*. Мінск: Белкартаграфія; 2002. 292 с.
21. Логинов ВФ. *Причины и следствия климатических изменений*. Минск: Навука і тэхніка; 1992. 319 с.

References

1. Mazhaiskii YuA, Rokochinskii AN, Volchak AA, Meshik OP, Eznakh E, editors. *Prirodno-resursnyi potentsial. Tom 1* [Natural resource potential. Volume 1]. Ryazan: Meshcherskii filial Vserossiiskogo NII gidrotekhniki i melioratsii imeni A. N. Kostyakova; 2018. 408 p. (Nature management of Polesie; book 1). Russian.

2. Kvach EG. Special features of hydrological regime of transboundary water bodies of the Republic of Belarus and the Russian Federation. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2023;4:93–104. Russian. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_3.
3. Loginov VF, Volchak AA, Volchak AA. *Vesennie polovod'ya na rekakh Belarusi: prostranstvenno-vremennye kolebaniya i prognoz* [Spring floods on the rivers of Belarus: spatial and temporal fluctuations and forecast]. Minsk: Belaruskaja nawuka; 2014. 244 p. Russian.
4. Volchak AA. Water resources of Belarus and environmental risks. *Problems of Geography*. 2023;157:81–104. Russian. DOI: 10.24057/probl.geor.157.4.
5. Obodovskii AG, Stankevich AP, Afanas'ev SA, editors. *Upravlenie transgranichnym basseinom Dnepra: subbassein reki Pripyat'* [Management of the transboundary basin of the Dnieper: the subbasin of the Pripyat River]. Kyiv: Kafedra; 2012. 447 p. Russian.
6. Kupriyanov VV, editor. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 5, Belorussiya i Verkhnee Podneprov'e. Chast' I* [Surface water resources of the USSR. Volume 5, Belarus and the Upper Dnieper Region. Part 1]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1966. 718 p. Russian.
7. Ratkovich DYa. *Mnogoletnie kolebaniya rechnogo stoka: zakonomernosti i regulirovanie* [Long-term fluctuations in river flow: patterns and regulation]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1976. 255 p. Russian.
8. Ismaiyl'ov GK, Fedorov VM. Analysis of long-term, variations in the Volga annual runoff. *Water Resources*. 2001;28(5):469–476. DOI: 10.1023/A:1012342203595.
9. Loginov VF, Volchak AA. Variations in Neman River annual runoff near Grodno Town. *Water Resources*. 2006;33(6):608–615. DOI: 10.1134/S0097807806060029.
10. Volchak AA, Parfomuk SI, Shpoka DA. [Optimisation of the number of hydrometric posts for observing water levels on the rivers of Belarus]. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy*. 2023;3:81–91. Russian.
11. Volchak AA. [Automation of hydrological calculations]. In: Golub MV, editor. *Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo i okhrana okruzhayushchei sredy. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po problemam vodokhozyaistvennogo, promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva i ekonomiko-sotsial'nykh preobrazovaniy v usloviyakh rynochnykh otnosheniy; 17–18 fevralya 1998 g.; Biberakh, Germaniya – Brest, Belarus' – Nottingem, Velikobritaniya* [Water construction and environmental protection. Proceedings of the International scientific and practical conference on the problems of water management, industrial and civil construction and economic and social transformations in conditions of market relations; 1998 February 17–18; Biberach, Germany – Brest, Belarus – Nottingham, United Kingdom]. Brest: Brestskii politekhnicheskii institut; 1998. p. 55–59. Russian.
12. Volchak AA, Sidak SV. [On the issue of restoring gaps in the hydrological series of observations]. In: Ministry of Education and Science of Georgia, Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection. *9th International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction»*; 2019 July 25–27; Tbilisi, Georgia. Tbilisi: Ministry of Education and Science of Georgia; 2019. p. 296–300. Co-published by the Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection. Russian.
13. Loginov VF, Volchak AA, Shvedovskii PS. *Praktika primeneniya statisticheskikh metodov pri analize i prognoze prirodnnykh protsessov* [The practice of applying statistical methods in the analysis and prediction of natural processes]. Brest: Brest State Technical University; 2004. 301 p. Russian.
14. Khristoforov AV. *Teoriya sluchainykh protsessov v gidrologii* [The theory of random processes in hydrology]. Moscow: Izdatel'stvo MGU; 1994. 141 p. Russian.
15. Box J, Jenkins G. *Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie* [Time series analysis, forecasting and management]. Levshin AL, translator; Pisarenko VF, editor. Moscow: Mir; 1974. 406 p. Russian.
16. Lyubushin AA, Pisarenko VF, Bolgov MV, Rukavishnikova TA. Study of general effects of river runoff variations. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2003;7:76–88. Russian. EDN: PVFRDX.
17. Volchak AA, Shpoka DA. Maximum water levels fluctuations of the Pripyat River. *Nature Management*. 2023;1:27–40. Russian. DOI: 10.47612/2079-3928-2023-1-27-40.
18. Volchak AA, Shpoka IN, Shpoka DA. Evaluation of Lesnaya River water levels in the conditions of modern warming of climate. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya*. 2019; 2:23–28. Russian. EDN: TNRHNV.
19. Volchak AA, Shpoka IN, Shpoka DA. Estimation of fluctuations of maximum water levels of solder basin rivers on the territory of Belarus. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya*. 2020;2:27–30. Russian. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-27-30.
20. Mjasnikovich MU, editor. *Nacyjanal'ny atlas Belarusi* [National atlas of Belarus]. Minsk: Belkartagrafiya; 2002. 292 p. Belarusian.
21. Loginov VF. *Prichiny i sledstviya klimaticheskikh izmeneniy* [Causes and consequences of climate change]. Minsk: Navuka i tjehnika; 1992. 319 p. Russian.

Получена 18.12.2023 / принята 05.03.2024.
Received 18.12.2023 / accepted 05.03.2024.