

УДК 556.5(476)

## КОЛЕБАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ Р. НЕМАН

*Д. А. Шпока*

Исследователь, учреждение образования «Брестский государственный технический университет», Брест, Республика Беларусь,  
daryashpoka@rambler.ru

### **Аннотация**

В статье изложены результаты исследований колебаний максимальных уровней воды р. Неман в створе Гродно за различные интервалы с 1877 по 2020 гг. различающиеся степенью антропогенного воздействия на речной сток и типом атмосферной циркуляции. Сделан вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике максимальных уровней воды р. Немана у г. Гродно, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными факторами воздействия на гидрологический цикл.

**Ключевые слова:** уровень воды, расход, весеннее половодье, гидрологический створ, тренды.

## MAXIMUM WATER LEVELS FLUCTUATIONS OF THE NEMAN RIVER

*D. A. Shpoka*

### **Abstract**

The article presents the results of studies of fluctuations in the maximum water levels of the river Neman at the Grodno site for various intervals from 1877 to 2020. differing in the degree of anthropogenic impact on river flow and the type of atmospheric circulation. It was concluded that there are statistically significant changes in the dynamics of maximum water levels r. Neman near the city of Grodno, caused by both natural climatic and anthropogenic factors influencing the hydrological cycle.

**Keywords:** water level, spring flood, hydrological section, trend.

**Введение.** Уровень воды в реке является важной гидрологической характеристикой, который широко используется для решения различных теоретических и практических задач в гидрологии и водном хозяйстве. Особый интерес представляют максимальные уровни воды, которые формируют площади затопления и подтопления и т.д. Половодья постоянны во времени, поэтому население прибрежных зон адаптировало свою хозяйственную деятельность к высоким водам. Когда половодье переходит в наводнение это приводит к экономическому ущербу и даже человеческим жертвам. Что касается естественных речных экосистем, то наводнения скорее надо

рассматривать как механизм, способствующий их оздоровлению, так как выживают, как правило, более сильные представители флоры и фауны.

В настоящее время все практические методы гидрологических и водохозяйственных расчетов базируются на принятии гипотезы стационарности естественного процесса многолетних колебаний гидрологической величин, т.е. возможности переноса режимных характеристик, определенных в прошлом, в будущее в их неизменном виде. Хотя опыт проектирования и эксплуатации многочисленных гидротехнических и водохозяйственных объектов показал допустимость данного приема, статистическая концепция описания многолетних колебаний уровней воды в реке в ее традиционной интерпретации не может быть признана перспективной при разработке методов прогнозирования уровня режима [1, 2]. Во-первых, предел предсказуемости стохастических моделей максимальных уровней воды на основе марковой последовательности первого порядка равен одному-двум годам при обеспеченности прогноза  $\leq 60\%$  [3, 4]. Во-вторых, в результате возрастающей антропогенной нагрузки, глобальном изменении климата и других факторов могут измениться статистические параметры временных рядов.

Разработка многомерных эмпирико-статистических моделей с использованием уравнений множественной регрессии явилась дальнейшим развитием концепции случайности применительно к анализу и прогнозу значений временных корреляций максимальных уровней воды в многомерном пространстве вектора-предиктора, выявленных в предшествующий период с помощью уравнений множественной линейной регрессии, кусочно-линейных уравнений линейной регрессии, нейронных сетей и др. Определяются прогнозные значения максимальных уровней воды в реке. При этом необходимо доказательство возможности распространения выявленных зависимостей на прогнозируемый период и требуется прогноз самого вектора-предиктора, что является не менее сложной задачей, особенно для значительного периода [1, 2].

**Материалы и методы.** Одной из задач исследования являлась оценка стационарности временных рядов максимальных уровней воды рек с различной степенью антропогенной нагрузки. Для этих целей использован временной ряд максимальных уровней воды р. Неман в створе г. Гродно (отметка нуля водомерного поста в Балтийской системе высот – 91,31 м). Река Неман – одна из основных водных артерий Беларуси, расположена в северо-западной и западной части республики. Протекает по Беларуси и Литве. В ходе мелиоративных работ длина р. Неман уменьшилась на 24 км. Длина реки в пределах Беларуси – 436 км. Площадь водосбора в пределах страны – 34610 км<sup>2</sup>. Речная система р. Неман относится к слабо древовидному типу, развита равномерно, густота речной сети 0,47 км/км<sup>2</sup>. Водосбор неправильной формы, асимметричный, более развит по левобережью, расположен в пределах Неманской низины. Рельеф представляет собой всхолмленную равнину с моренными образованиями в виде гряд или групп холмов. Выделяются

Гродненские, Новогрудские и Волковысские высоты, а также западная часть Минской возвышенности. На территории Беларуси режим реки изучался на 16 гидрологических постах. В настоящее время действует четыре гидрологических поста в районе населенных пунктов Столбцы, Белица, Мосты, Гродно.

Длина исследуемого временного ряда достигает 144 года (с 1877 по 2020 гг.), основную часть которого составляют результаты инструментальных наблюдений Республиканского гидрометеорологического центра за максимальными уровнями воды р. Неман – г. Гродно. Имеющиеся пропуски в рядах наблюдений за максимальными уровнями воды (1877-1880 гг., 1916-1921 гг., 1937-1939 гг., 1944 гг.) восстановлены в два этапа. На первом этапе общепринятыми методами гидрологической аналогии с использованием рек-аналогов восстановлены максимальные расходы воды [6–7], а на втором этапе по связи  $H_{max}=f(Q_{max})$ , полученной по наблюдаемым величинам, рассчитаны собственно максимальные уровни воды по зависимости

$$H_{max}(t) = 222 \cdot \ln(Q_{max}(t)) - 1111. \quad (1)$$

Значение коэффициента корреляции при 144 совместных годах наблюдений составляет  $r=0,88$ , что больше критического значения, равного  $r_{кр.}=0,16$ .

Исходный временной ряд значений максимальных уровней воды разбит на два интервала: с 1881 по 1965 гг. – период до начала массовых мелиораций, характеризующийся минимальным антропогенным воздействием и условно естественным водным режимом; с 1966 по 2020 гг. – период антропогенных воздействия и потепления климата, который в свою очередь разбит на два интервала: 1966 – 1987 гг. – период массовых мелиораций и 1988 – 2020 гг. – современных климатических изменений.

В статье использованы статистические методы анализа временных рядов, в основу которых положены научные положения о стохастической природе изменчивости уровня режима рек. Системный анализ накопленной информации и сравнительно-географический метод позволили синтезировать наиболее важные закономерности временных колебаний максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно [9, 10].

Оценка однородности временного ряда максимальных уровней воды осуществлялась на основе генетического анализа условий формирования речного стока путем выявления причин, обуславливающих неоднородность исходных данных наблюдений.

Первичный анализ однородности гидрологических рядов рекомендуется проводить графическими методами, которые предусматривают построение суммарных (интегральных) кривых связей от времени [8]:

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

где  $\sum_{t=1}^T H_{max}$  – нарастающее значение максимальных уровней воды во времени;

$t$  – текущий год;  $T$  – период наблюдений.

Тенденция колебаний максимальных уровней воды оценивалась с

использованием линейных трендов [9, 10]

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

где  $H_{max}(t)$  – значение максимального уровня в расчетный год, см;  $H_{max}(0)$  – значение максимального уровня в начальный момент времени, см;  $t$  – текущий год.

Статистическая однородность исследуемого временного ряда наблюдений относительно естественного уровенного режима рек оценивалась параметрическими тестами, в частности различия в средних с помощью критерия Стьюдента, а различия в характере колебаний уровенного режима – критерия Фишера [9, 10]:

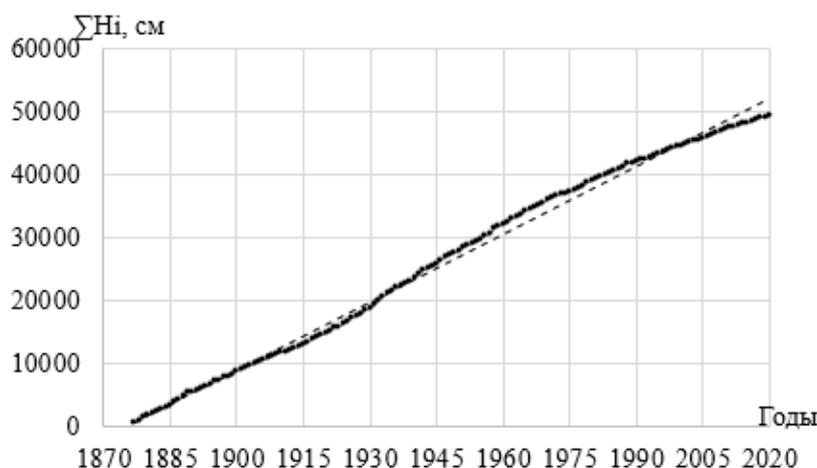
$$t = \frac{\bar{H}_{max 1} - \bar{H}_{max 2}}{\sqrt{n_1 \cdot \sigma_1^2 + n_2 \cdot \sigma_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (4)$$

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (5)$$

где  $\bar{H}_{max 1}, \bar{H}_{max 2}$  – выборочные средние максимальных уровней воды;  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  – выборочные дисперсии;  $n_1$  и  $n_2$  – объемы выборок.

Полученное значение  $t$ -критерия Стьюдента и  $F$ -критерия Фишера сравнивалось с их критическими значениями при заданном уровне значимости  $\alpha=5\%$ . Если  $t > t_\alpha$ , принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних, а при  $F > F_\alpha$  – гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов.

**Результаты и обсуждение.** С использованием интегральной кривой (формула (1)) исследуемый ряд проверяли на однородность. Как показал анализ, исследуемый временной ряд наблюдений за максимальными уровнями воды является однородным (рисунок 1), что позволяет использовать стандартные статистические методы.



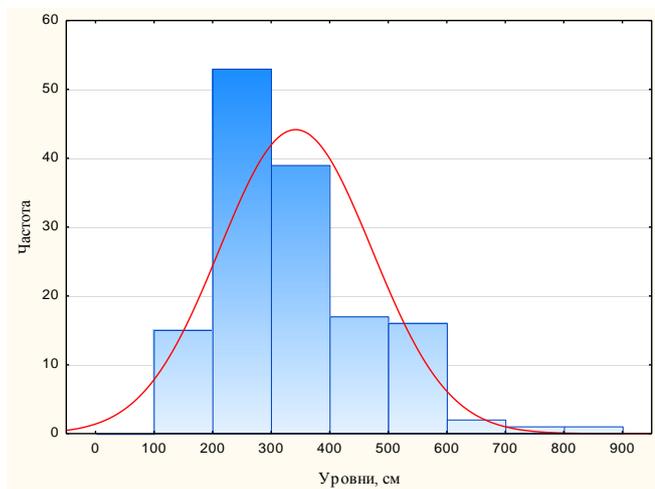
**Рисунок 1** – Изменение нарастающей суммы максимальных уровней воды во времени р. Неман в створе г. Гродно

В таблице 1 представлены выборочные оценки основных статистических параметров рассматриваемых временных рядов максимальных уровней воды за выделенные периоды. Эмпирическая кривая обеспеченности для всего рассматриваемого периода соответствует закону нормального распределения. Поскольку функция распределения вероятностей максимальных уровней воды при таких оценках параметров незначительно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым. Гистограмма, построенная для годовых уровней воды, свидетельствует, что распределение близко к нормальному (рисунок 2), кроме рисунка 2б где распределение имеет левостороннюю асимметрию.

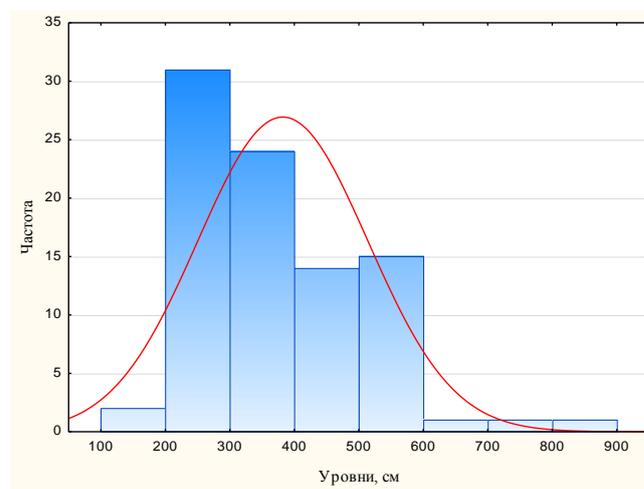
**Таблица 1** – Основные статистические характеристики максимальных уровней воды р. Неман в створе г. Гродно

Период наблюдений, годы	Количество лет наблюдений	Средний максимальный уровень, $\bar{H}_{max}$ , см	Коэффициенты		
			вариации $C_v$	асимметрии и $C_s$	автокорреляции $r(1)$
1877 – 2020	144	342	0,38	1,08	<b>0,27</b>
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

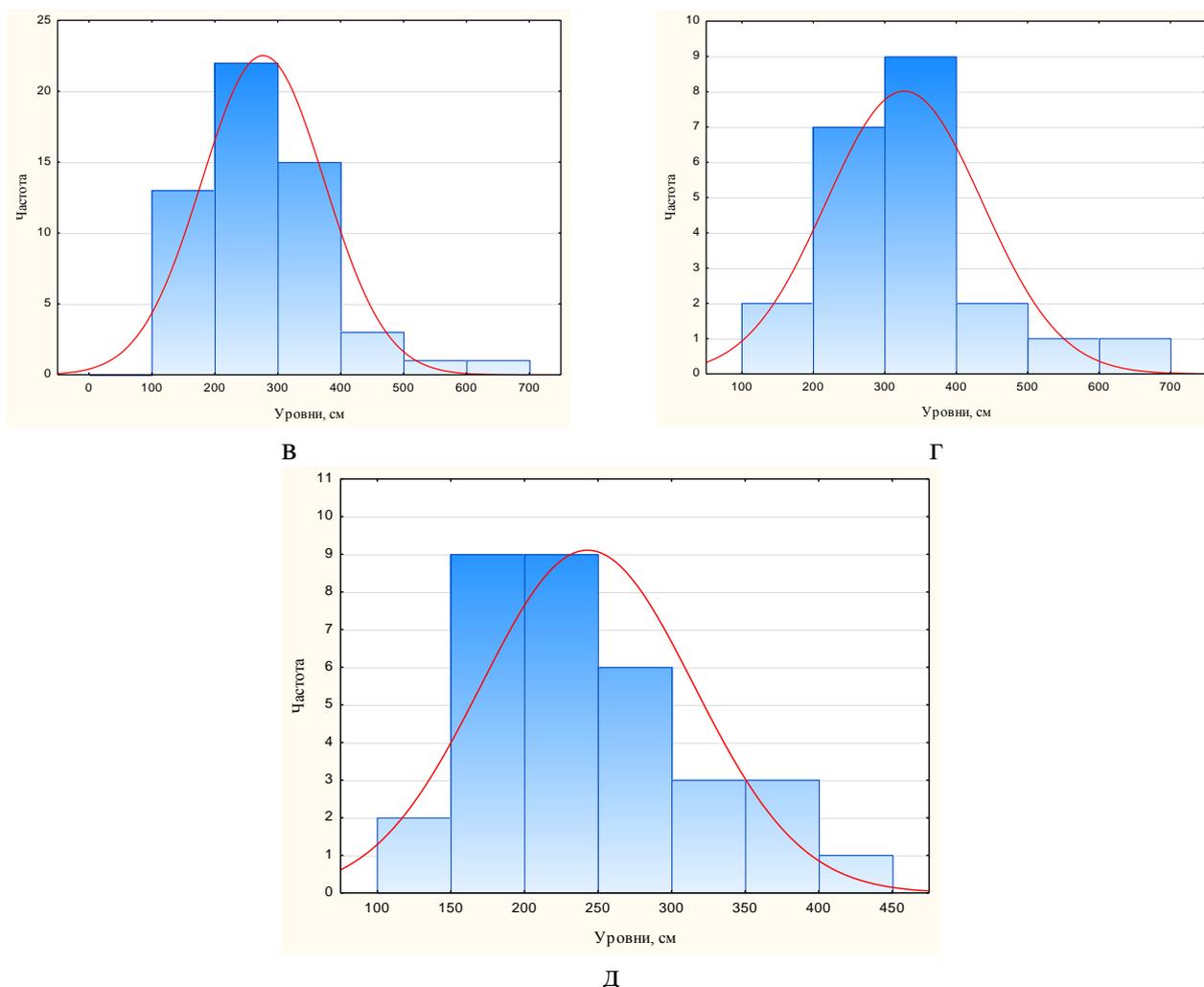
*Примечание: Выделенные статистически значимые значения.*



**а**



**б**



**Рисунок 2** – Гистограмма распределения максимальных уровней воды р. Неман в створе г. Гродно:  
*a* – 1877–2020 гг.; *b* – 1877–1965 гг.; *c* – 1966–2020 гг.;  
*z* – 1966–1987 гг.; *d* – 1988–2020 гг.

Как видно из таблицы 2 повышенные значения максимальных уровней воды наблюдаются в период с 1877 по 1965 гг. с невысоким значением коэффициента вариации, что вызвано климатическими факторами. Снижение максимальных уровней в период с 1988 по 2020 гг. вызвано зимним повышением температур, частыми оттепелями, это приводит к инфильтрации воды в почву, что замедляет скорость добега воды к замыкающему створу, распластанному гидрографу со срезкой пиков и снижению максимальных уровней. Кроме того, строительство и ввод в эксплуатацию Гродненской ГЭС, что снижает максимальные уровни воды посредством аккумуляции воды в водохранилище.

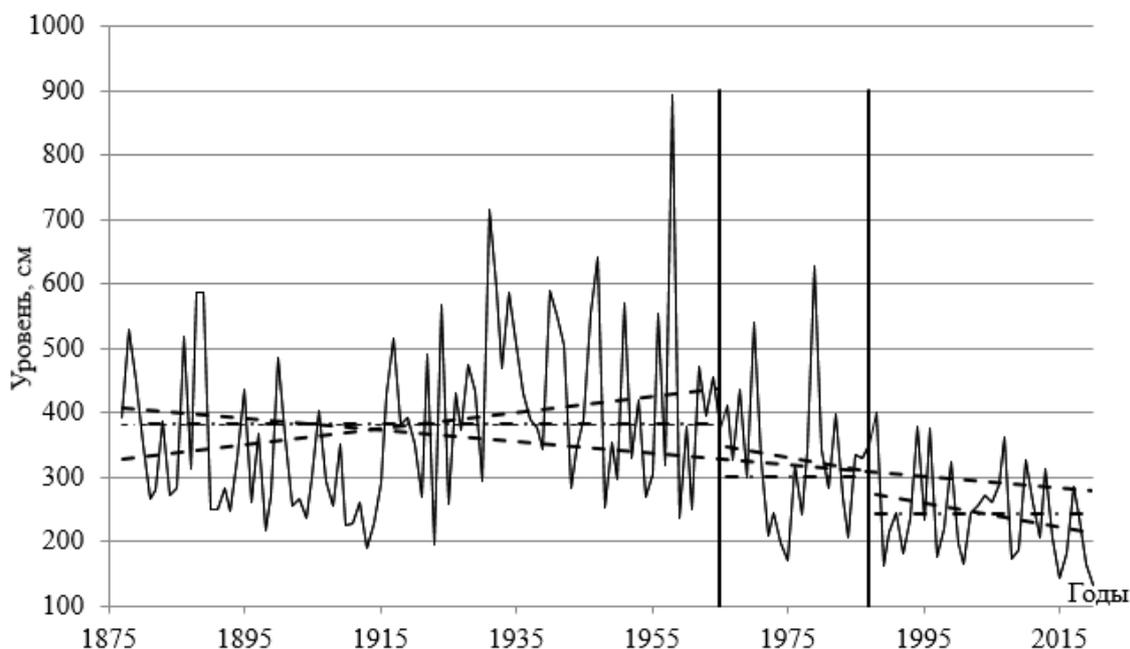
На рисунке 3 представлен многолетний ход максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно. Колебания уровней носят циклический характер с тенденцией уменьшения в последние годы (с 1966 по 2020 гг.). Для количественной оценки тенденций в колебаниях уровней использовались линейные тренды за рассматриваемые интервалы. В целом за рассматриваемый период наблюдается тенденция уменьшения максимальных уровней воды со

скоростью -9,0 см/10 лет. За периоды с 1966 по 2020 гг. прослеживается также тенденция снижения со скоростью -27,3 см/10 лет и с 1966 по 1987 г. – -17,8 см/10 лет, с 1988 по 2020 гг. – -19,0 см/10 лет. (таблица 2).

**Таблица 2** – Параметры моделей временного ряда максимальных уровней воды р. Неман в створе г. Гродно для различных интервалов

Параметры	Интервалы, годы				
	1877 – 2020	1877 – 1965	1966 – 2020	1966 – 1987	1988 – 2020
<i>Линейные тренды – <math>H_{\max}(t)=H_{\max}(0)\pm\Delta H_{\max}\cdot t</math></i>					
$\alpha=10\cdot\Delta H_{\max}$ , см/10 лет	-9,0	12,4	-27,3	-17,8	-19,0
<i>K-t корреляции</i>	<b>-0,29</b>	<b>0,24</b>	<b>-0,45</b>	-0,11	-0,25
<i>Зависимости <math>H_{\max}(t)=A\cdot\ln(Q_{\max}(t))-B</math></i>					
<i>A</i>	222	248	193	226	144
<i>B</i>	1111	-1291	-922	-1127	-631
<i>K-t корреляции</i>	0,88	0,85	0,89	0,96	0,78

**Примечание:** Выделенные статистически значимые значения.



**Рисунок 3** – Многолетний ход максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно  
 — многолетний максимальный уровень воды; - - - - - линия тренда; - · - · - · - средние максимальные уровни; вертикальные линии: первая линия – год начала крупномасштабной мелиорации, вторая линия – год начала современного потепления

### АНАЛИЗ ОДНОРОДНОСТИ РЯДОВ СТОКА

Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) при изменении периодов осреднения применительно к максимальным уровням воды р. Неман в створе г. Гродно за 1877 – 2020 гг. ( $n=144$  года). При этом использовались пять версий исследуемого временного ряда: данные за весь период наблюдений, данные за период естественного режима, данные за период крупномасштабных мелиораций, за период современных климатических изменений и за период

антропогенных воздействий и климатических изменений. В таблице 1 приведены основные статистические параметры этих интервалов исследуемого временного ряда, а в таблице 3 приведены матрица статистических критериев Стьюдента и Фишера и их критические значения.

Анализ максимальных значений уровней воды для пяти рассматриваемых интервалов, на которые разбит исходный временной ряд, показывает, что при сравнении периода 1877 – 1965 гг. с периодами 1966 – 2020 гг. и 1988 – 2020 гг. есть основания отвергнуть нулевую гипотезу и различия в средних величинах и дисперсиях признать существенными для всех рассматриваемых интервалов.

**Таблица 3** – Статистические критерии (числитель) для различных интервалов временного ряда максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно и их критические значения (знаменатель)

Интервал	1966 – 2020		1966 – 1987		1988 – 2020	
	<i>t</i> -критерий для средних	<i>F</i> -критерий для дисперсий	<i>t</i> -критерий для средних	<i>F</i> -критерий для дисперсий	<i>t</i> -критерий для средних	<i>F</i> -критерий для дисперсий
1877 – 1965	<b>5,50</b> /1,98	<b>1,83</b> /1,51	2,02/2,02	1,45/1,89	<b>7,41</b> /1,98	<b>3,33</b> /1,68
1966 – 1987	–	–	–	–	<b>3,18</b> /2,03	<b>2,30</b> /1,90

**Примечание:** Выделены статистически значимые значения.

При изучении закономерностей многолетних колебаний уровня режима рек несомненный интерес представляет совместный анализ динамики максимальных уровней воды и обобщенных характеристик циркуляции атмосферы. В качестве последних обычно используется классификация Г. Я. Вангенгейма – А. А. Гирса, основанная на трех формах циркуляции *W* (западной), *E* (восточной) и *C* (меридиональной) [1]. Подробно этот вопрос для метеорологических рядов рассмотрен в монографии В.Ф. Логинова [12], где приведен их полный анализ. Поэтому в настоящей работе остановимся вкратце на связи максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно с типом атмосферной циркуляции. Как видно из таблицы 4, диапазон изменения характеристик максимальных уровней воды весьма значителен и крайние его значения существенно больше (меньше) аналогичных значений для *n*-летних периодов исходного ряда.

Анализ линейных трендов для интервалов с различным типом атмосферной циркуляции показал широкий диапазон колебаний градиентов изменений максимальных уровней – от -146,7 (1940 – 1948 гг. (*C*)) до 30,3 (1949 – 1964 гг. (*E+C*)) см/10 лет, меньшие градиенты имели место для других типов атмосферной циркуляции.

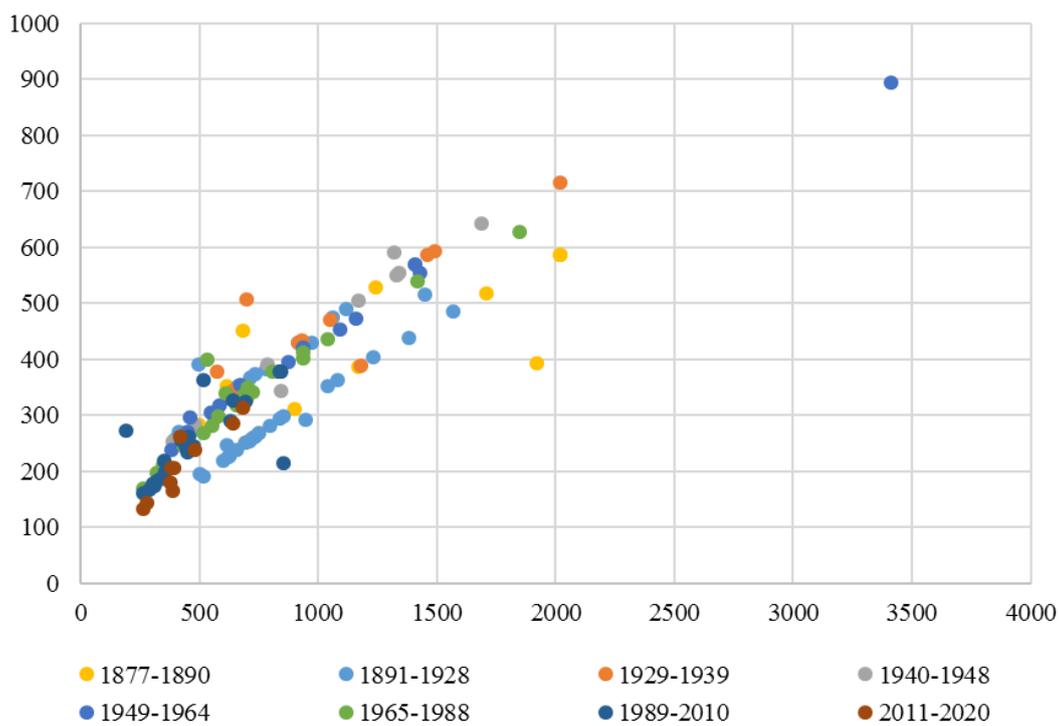
**Таблица 4** – Основные статистические параметры максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно

Период	n, лет	Тип атмосферной циркуляции	Статистические параметры						
			H <sub>ср</sub> , см	C <sub>v</sub>	r(1)	линейный тренд		Зависимости $H_{\max}(t)=A \cdot \ln(Q_{\max}(t))-B$	
						α, см/10 лет	r	A	B
1877 – 1890	10	C	390	0,32	0,06	19,6	0,07	182	-855
1891 – 1928	38	W	327	0,30	-0,01	28,3	0,32	220	-1138
1929 – 1939	11	E	467	0,27	0,13	-126,0	-0,34	253	-1274
1940 – 1948	9	C	457	0,31	0,10	-146,7	-0,28	271	-1397
1949 – 1964	16	E+C	406	0,40	-0,42	30,3	0,09	280	-1466
1965 – 1988	24	E	332	0,32	0,18	-11,3	-0,08	224	-1112
1989 – 2010	22	W	238	0,28	-0,14	19,3	0,18	118	-471
2011 – 2020	10	E	390	0,32	0,12	-93,0	0,46	185	-898

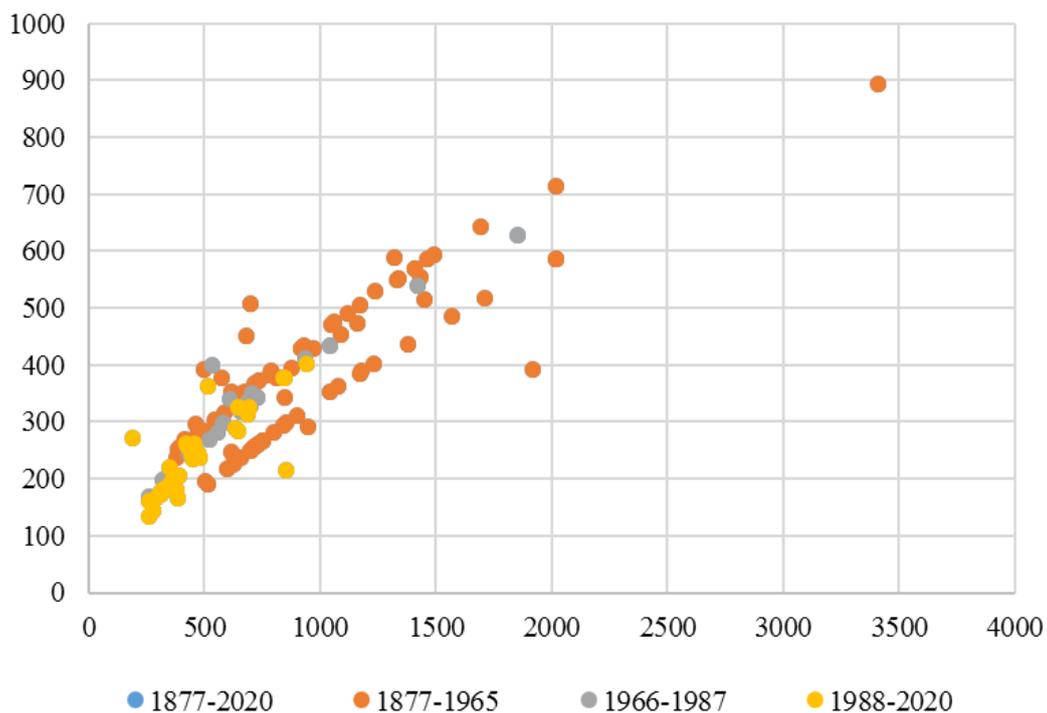
Проверка гипотезы однородности рассматриваемых параметров максимальных уровней воды для периодов с разными типами циркуляции основана на использовании критериев Стьюдента и Фишера.

В то же время можно полагать, что для отдельных временных периодов с преобладанием того или иного типа атмосферной циркуляции выполняются условия стационарности. Переход же от одного состояния к другому происходит в естественных условиях под воздействием внешних климатических факторов, существенно изменяющих соотношение между осадками и испарением в пределах территории бассейна р. Неман. В итоге можно сделать вывод, что многолетние колебания максимальных уровней воды р. Неман вызваны климатическими факторами, причина которых кроется в процессах крупномасштабного влагообмена в системе океан – атмосфера – суша [1].

Важной гидрологической характеристикой является связь уровней воды с их расходами, т.е. зависимость  $H=f(Q)$ . Для всего исследуемого периода связь представлена моделью (1). На рисунке 4 представлены данные модели, построенные для различных интервалов, параметры которых представлены в таблицах 2 и 4. Все модели имеют высокие, статистически значимые коэффициенты корреляции – от 0,78 до 0,96.



а



б

а – по типам атмосферной циркуляции;

б – по антропогенным и климатическим влияниям

**Рисунок 4** – Графики зависимости  $H=f(Q)$  для различных интервалов

Как видно из рисунка 4, в целом различия в характере зависимостей  $H=f(Q)$  сохраняются.

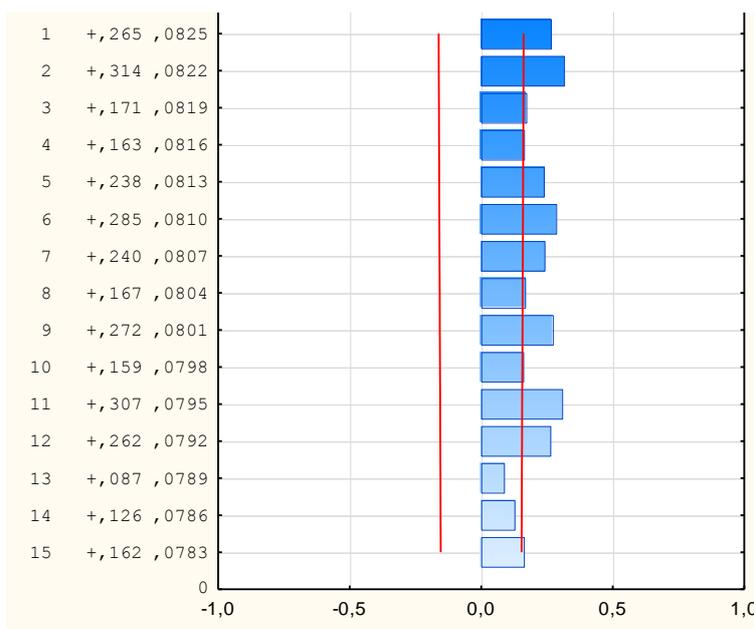
## ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

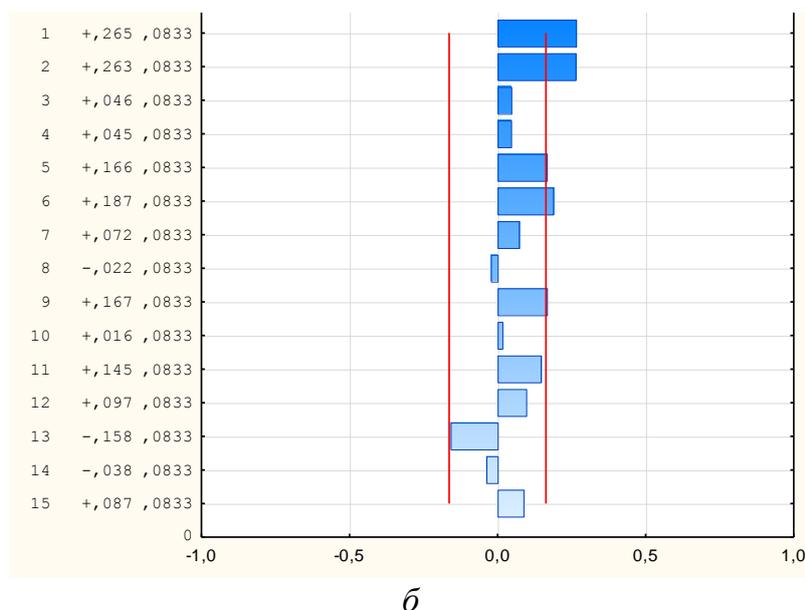
Когда тренд явно не выражен, необходимо рассматривать совместно выборочные автокорреляционную (АКФ) и частную автокорреляционную (ЧАКФ) функции данного процесса, с помощью которых определяется характер изменения годового стока рек. При этом используются следующие критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [1, 13, 14] приведенные в таблица 5.

**Таблица 5** – Критерии нестационарности процесса и выбора модели

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при $\tau=1$	(АР(1)) авторегрессия первого порядка
Форма затухания в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при $\tau=1$ $\tau=2$	(АР(2)) авторегрессия второго порядка
Высокое значение при $\tau=1$ , остальные значения нулевые	Экспоненциально затухает или осциллирует с изменением знака	(СС(1)) скользящее среднее первого порядка
Высокое значение при $\tau=1$ и $\tau=2$ , остальные значения нулевые	Форма синусоидальной волны или экспоненциально затухает	(СС(2)) скользящее среднее второго порядка
Экспоненциально затухает, начиная с $\tau=1$ (затухание может быть монотонным или осциллирующим)	Экспоненциально затухающие значения ординат либо монотонно осциллируют	(АР СС(1)) авторегрессия и скользящее среднее первого порядка

Исследуемый временной ряд максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно (рисунок 7) отвечает модели АР(2).





**Рисунок 7** – Автокорреляционная функция (а) и частная автокорреляционная функция (б) максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно

Модель AP(1) имеет следующий вид:

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

где  $H_{max}(t)$  и  $H_{max}(t-1)$ , см – максимальные уровни воды в  $t$ -й и предшествующий ему  $(t-1)$ -й годы;  $\xi(t)$  – гауссовский «белый шум» с нулевым средним и  $\sigma_{\xi} = \sigma_H \cdot \sqrt{1 - r(1)^2}$ .

В соответствии с уравнением (6) для временного ряда максимальных уровней воды р. Неман при  $r(1)=0,27$  и  $\bar{H}_{max}=342$  см (таблица 1), а также  $\sigma_{\xi} = 125,29$  см и  $\sigma_H = 130,12$  см.

$$H_{max}(t) = 0,27 \cdot H_{max}(t-1) + 250 + \xi(t).$$

Модель AP(1) имеет следующий вид:

$$H_{max}(t) = \bar{H}_{max} + r(1) \cdot [H_{max}(t-1) - \bar{H}_{max}] + r(2) \cdot [H_{max}(t-2) - \bar{H}_{max}] + \xi(t), \quad (7)$$

где  $H_{max}(t)$ ,  $H_{max}(t-1)$  и  $H_{max}(t-2)$ , см – максимальные уровни воды в  $t$ -й и предшествующие ему  $(t-1)$ -й и  $(t-2)$ -й годы;  $\xi(t)$  – гауссовский «белый шум» с нулевым средним и  $\sigma_{\xi} = \sigma_H \cdot \sqrt{1 - r(1)^2}$ .

В соответствии с уравнением (7) для временного ряда максимальных уровней воды р. Неман при  $r(1)=0,27$ ,  $r(2)=0,32$  и  $H_{cp}=372$  см (таблица 1), а также  $\sigma_{\xi} = 125,29$  см и  $\sigma_H = 130,12$  см.

$$H_{max}(t) = 372 + 0,27 \cdot [H_{max}(t-1) - 372] + 0,32 \cdot [H_{max}(t-2) - 372] + \xi(t)$$

$$H_{max}(t) = 0,27 \cdot H_{max}(t-1) + 0,32 \cdot H_{max}(t-2) + 153 + \xi(t)$$

Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик максимальных уровней воды р. Неман за 144 летний период

позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменениях в динамике среднемноголетних максимальных уровней воды, обусловленных естественными климатическими изменениями гидрологического цикла и антропогенными воздействиями. Так как  $\overline{H}_{max} \neq const$ , можно сделать вывод о стационарности режима максимальных уровней воды лишь на отдельных интервалах периода наблюдений. В тоже время характер колебаний максимальных уровней воды является однородным и его дисперсия  $\sigma_{\overline{H}_{max}} = const$ . В этом случае практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике основных гидрологических характеристик: плавного возрастания или убывания (монотонный тренд), периодических изменений (циклический тренд), постоянства в течение каких-то периодов времени и резкого изменения при переходе от одного отрезка к другому (ступенчатый тренд). Все эти ситуации могут быть описаны полиномиальной аппроксимацией тренда вида [1]:

$$H_{max}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot \varphi_i(t), \quad (8)$$

где  $\varphi_i(t) \dots \varphi_k(t)$  – заданные функции времени;  $a_0 \dots a_k$  – коэффициенты регрессии.

Функции времени могут быть либо линейными, степенными, показательными или логарифмическими при монотонном тренде, либо тригонометрическими при циклическом и кусочно-постоянными при ступенчатом тренде. Во всех этих случаях параметры  $a_0 \dots a_k$  оцениваются по имеющемуся ряду наблюдений  $H_{max1} \dots H_{maxn}$ .

Результаты проведенных исследований закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды р. Неман в створе г. Гродно позволяют считать установленным наличие определенной связи стока смежных лет. Это служит основанием для описания максимальных уровней воды в виде простой цепи Маркова, т. е.

$$H_{max}(t) = r(1) \cdot H_{max}(t-1) + \xi(t), \quad (9)$$

где  $H_{max}(t)$  – максимальный уровень воды текущего года;  $H_{max}(t-1)$  – максимальный уровень воды в предшествующий год;  $\xi(t)$  – независимая от  $\overline{H}_{max}$  случайная величина.

Первое слагаемое в правой части (9) можно трактовать как максимальный уровень воды, обусловленный зимними атмосферными осадками предшествующего года, аккумулярованными бассейном реки, и сбросом их в русло в данном году. При этом случайная составляющая  $\xi(t)$  в (9), очевидно, должна включать в себя и ту часть максимального уровня воды текущего года, которая сформирована за счет зимних осадков этого года. В результате можно записать следующие уравнения [1]:

$$H(t) = a \cdot H(t-1) + b \cdot W_{oc}(t) + \xi(t_1), \quad (10)$$

$$H(t) = c \cdot W_{oc}(t-1) + d \cdot W_{oc}(t) + \xi(t_2), \quad (11)$$

где  $W_{oc}(t)$  и  $W_{oc}(t-1)$  – зимние осадки текущего и предшествующего годов.

Нами предпринята попытка описать колебания максимальных уровней воды р. Неман – г. Гродно с помощью сложной модели Маркова со сдвигом до 15 лет. Регрессионно-корреляционный анализ показал, что для построения модели могут использоваться  $H(t-2)$ ,  $H(t-3)$ ,  $H(t-7)$  и  $H(t-12)$  частный вид модели можно записать:

$$H(t) = 0,12 \cdot H(t-2) + 0,21 \cdot H(t-3) + 0,22 \cdot H(t-7) + 0,19 \cdot H(t-12) + 81 + \xi(t) \quad (12)$$

Коэффициент множественной корреляции для уравнения (12) составляет  $R=0,48 > R^T_{(131, 5\%)}=0,19$ ,  $F=1,25$ .

**Заключение.** Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик максимальных уровней воды р. Неман в створе г. Гродно за 144-летний период позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике уровенного режима, обусловленными естественно-климатическими изменениями гидрологического цикла и антропогенными воздействиями. Стационарность процесса многолетних колебаний максимальных уровней воды р. Неман можно отмечать лишь на отдельных отрезках временного ряда. При анализе закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды рек использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса рассматриваемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических.

#### Список цитированных источников

1. Исмайылов, Г. Х., Федоров, В. М. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги // Вод. Ресурсы. 2001. Т. 28. №5. С. 517–525.
2. Логинов, В. Ф., Волчек, А. А. Колебания годового воды р. Неман у г. Гродно / Водные ресурсы, 2006, том 33, №6. С. 635 – 663.
3. Раткович, Д. Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 255 с.
4. Природообустройство Полесья : монография : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского, А. Н. Рокочинского, А. А. Волчека, О. П. Мешика, Е. Езнаха. – Рязань : Мещер. ф-л ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2018. – Кн. 1 : Белорусское Полесье. – Т. 1. – 408 с.
5. Волчек, А. А. Автоматизация гидрологических расчетов // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей Среды: Труды международной научно-практической конференции / Брест. политехн. институт. – Биберах – Брест – Ноттингем, 1998. – С.55 – 59.
6. Волчек, А. А. К вопросу восстановления пропусков в гидрологических рядах наблюдений / А. А. Волчек, С. В. Сидак // 9th International Scientific and Technical Conference «Modern Problems of Water Management, Environmental Protection, Architecture and Construction» 25 – 27 July, 2019. – Tbilisi, Georgia, 2019. – С. 296 –300.

7. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.
8. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А. А. Волчек. – Москва : КНОРУС, 2021. – 418 с.
9. Статистические методы в природопользовании : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев, А. А. Волчек, П. С. Пойта, П. В. Шведовский. – Брест: Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
10. Логинов, В. Ф., Волчек, А. А., Шведовский, П. С. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов. – Брест: Изд-во БГТУ, 2004. – 301 с.
11. Христофоров, А. В. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: Из-во МГУ, 1994. – 141 с.
12. Логинов, В. Ф. Причины и следствия климатических изменений. Мн. Наука і тэхніка, 1992. 319 с.
13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. – 406 с.
14. Любушина, А. А., Писаренко, В. Ф., Болгова, М. В., Рукавишников Т.А. Исследование общих эффектов вариаций стока рек // Метеорология и гидрология, 2003. – №7. – с. 76 – 84.