

УДК 556.3/+502.51(476)

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

**А. А. Волчек**

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

### Реферат

Статья посвящена количественной оценке водных поверхностных водных ресурсов Беларуси. Дана количественная оценка поверхностных вод их пространственно-временным колебаниям в прошлом, настоящем и будущем. Приведены основные гидрологические характеристики по главным рекам Беларуси: Западная Двина, Западный Буг, Неман, Днепр и Припять с учётом различных сценариев изменения климата. Рассмотрены возможные последствия изменения речного стока в связи с изменением климата и антропогенными воздействиями и обозначены первоочередные задачи исследований по решению водных проблем страны.

**Ключевые слова:** водные ресурсы, пространственно-временные колебания, Беларусь, изменение климата, антропогенные воздействия, прогнозные оценки.

### SPATIO-TEMPORAL FLUCTUATIONS OF RIVERS FLOW IN BELARUS IN MODERN CONDITIONS

A. A. Volchak

### Abstract

The article is devoted to a quantitative assessment of surface water resources in Belarus. A quantitative assessment of surface water and its spatiotemporal fluctuations in the past, present and future is given. The main hydrological characteristics of the main rivers of Belarus are given: Western Dvina, Western Bug, Neman, Dnieper and Pripyat, taking into account various climate change scenarios. The possible consequences of changes in river flow due to climate change and anthropogenic impacts are considered and the priority tasks of research to solve the country's water problems are outlined.

**Keywords:** water resources, spatiotemporal fluctuations, Belarus, climate change, anthropogenic impacts, forecast estimates.

### Введение

Беларусь расположена в центре Европы в бассейнах рек Верхнего Днепра, Западной Двины, Немана, Нарева и занимает территорию площадью 207,6 тыс. км<sup>2</sup>. Наибольшая протяженность с севера на юг 560 км, с запада на восток 650 км. Территория Беларуси является частью Русской равнины и представляет собой чередование обширных холмистых возвышенностей с плоскими равнинами или слабо выгнутыми низинами со средней высотой 159 м над уровнем моря. Территория Беларуси является водораздельной для бассейнов Балтийского и Черного морей. Всего насчитывается 20,8 тыс. рек общей протяженностью 90,6 тыс. км и 10,8 тыс. озер, кроме того, создано 153 водохранилища различного назначения. Реки принадлежат к равнинному типу с преобладанием элементов снегового питания [1].

Целью работы является количественная оценка водных ресурсов Беларуси в современных климатических условиях, а также прогнозные оценки поверхностного стока при различных сценариях развития климата.

### Методы исследования и исходные материалы

Методологической основой исследований явились научные положения о стохастической природе речного стока, что позволило применить современные статистические методы анализа временных рядов. Использованы методы водного и теплотенергетического баланса подстилающей поверхности, математического моделирования. Системный анализ накопленной информации и сравнительно-географический метод позволили синтезировать закономерности пространственно-временных колебаний стока рек Беларуси.

Исходными данными послужили материалы наблюдений республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь за стоком рек по 122 створам для характерных расходов: среднегодовые, максимальные весеннего половодья, минимальные летне-осенние и минимальные зимние за период с 1953 по 2020 гг. Как показали наши исследования, количество гидрологических постов, использованных в настоящем исследовании, достаточно для получения результатов с требуемой для решаемых задач точностью [2]. Кроме того, по пяти рекам (Припять в створе г. Мозыря,

Неман в створе г. Гродно, Западная Двина в створе г. Витебска, Березина в створе г. Бобруйска, Днепр в створах г. Орши и г. Речицы) анализировались гидрологические ряды за период с 1877 по 2020 гг., т. е. 144 года. На предварительном этапе проведен статистический анализ, восстановлены пропущенные данные с помощью программного комплекса «Гидролог-2» [3]. Для исследования влияния современного потепления климата выполнен сравнительный анализ двух интервалов: 1877–1986 гг. до начала потепления и 1987–2020 гг. собственно период потепления. Кроме того, отдельно анализировались ряды наблюдений за последние 50 лет (1971–2020 гг.), т. е. расчетный период, рекомендуемый для определения статистических характеристик и построения математических моделей прогнозирования стока рек Беларуси.

### Полученные результаты и их обсуждение

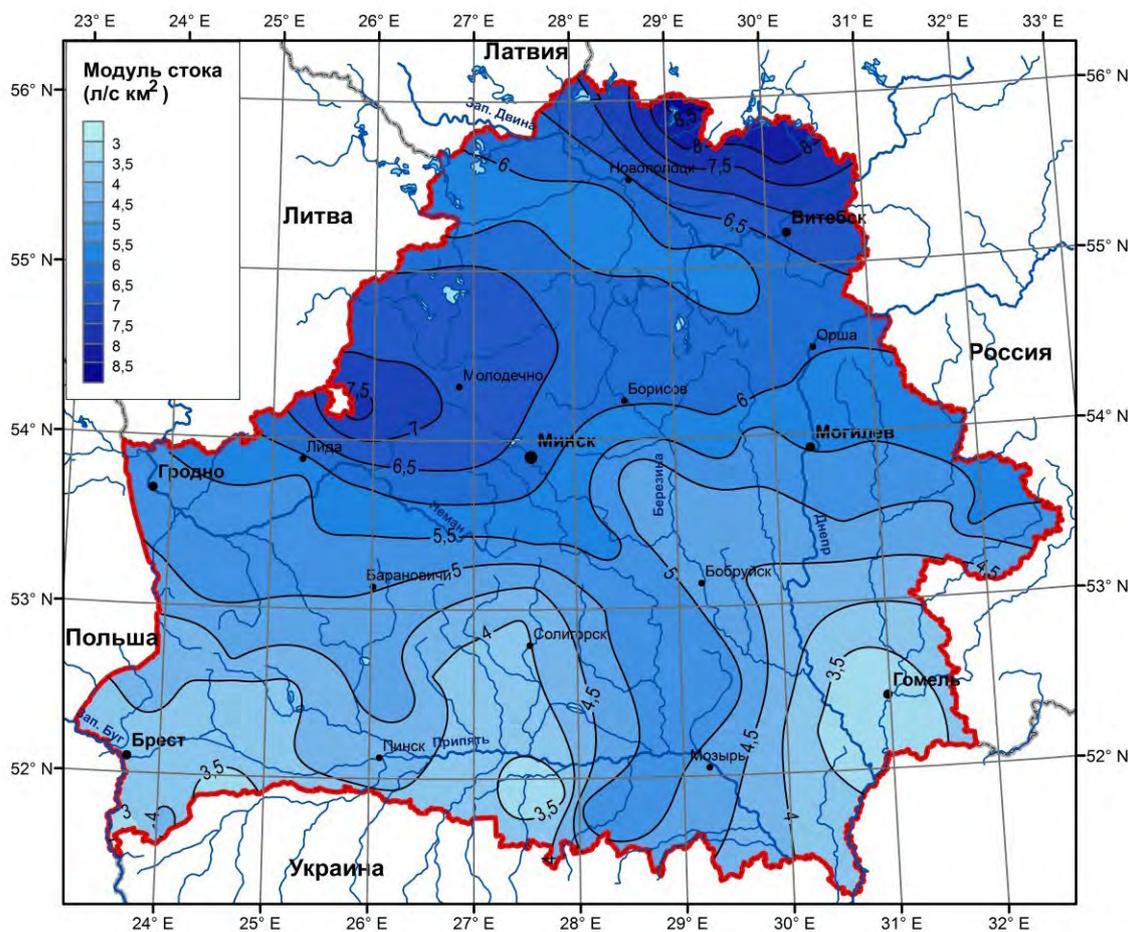
Количественная оценка стока рек Беларуси проведена с использованием данных гидрометрических измерений за период с 1956 по 2005 гг. по бассейнам основных рек (таблица 1) [4, 5].

В связи с тем, что в современных условиях, под воздействием естественных и антропогенных факторов, происходят изменения речного стока, полученные результаты за 50-летний период сопоставлялись с данными за период с начала инструментальных наблюдений по 1996 г. Как видно из таблицы 1, суммарные поверхностные ресурсы Беларуси практически не изменились. В то же время произошло перераспределение естественных водных ресурсов по бассейнам основных рек. Наряду с увеличением стока Припяти и незначительным ростом водности Западной Двины отмечено уменьшение поверхностных вод остальных речных систем страны за последние годы. Отмечен рост ресурсов поверхностных вод Брестской и Гомельской областей, а для Гродненской области характерно уменьшение водных ресурсов ввиду снижения водности Немана и Вилии.

В процессе оценки водных ресурсов территории наиболее значима роль карт распределения модуля среднесезонного годового стока. Наглядное представление о пространственной структуре стока рек Беларуси можно получить из карты модулей среднесезонного годового стока рек Беларуси осредненный за период с 1953 по 2020 гг., т. е. за последние 65 лет (рисунок 1) [6].

**Таблица 1** – Естественные ресурсы речных вод Беларуси по бассейнам основных рек в 1956–2005 гг. (числитель) и изменение стока по отношению к периоду до 1996 г. в км<sup>3</sup> (знаменатель)

Речной бассейн	Речной сток, км <sup>3</sup> /год									
	местный					общий				
	Обеспеченность, %					Обеспеченность, %				
	5	25	50	75	95	5	25	50	75	95
Западная Двина	<u>10,6</u> 0,1	<u>7,8</u> 0,1	<u>6,9</u> 0,1	<u>5,5</u> 0,0	<u>4,4</u> 0,1	<u>22,3</u> 0,4	<u>16,4</u> 0,2	<u>14,1</u> 0,2	<u>11,6</u> 0,3	<u>9,0</u> 0,4
Неман	<u>8,0</u> -0,5	<u>6,7</u> -0,4	<u>6,2</u> -0,4	<u>5,4</u> -0,5	<u>4,9</u> -0,3	<u>8,1</u> -0,5	<u>6,8</u> -0,4	<u>6,3</u> -0,4	<u>5,5</u> -0,5	<u>5,0</u> -0,3
Виля	<u>2,9</u> -0,3	<u>2,4</u> -0,3	<u>2,1</u> -0,2	<u>1,8</u> -0,2	<u>1,4</u> -0,4	<u>2,9</u> -0,3	<u>2,4</u> -0,3	<u>2,1</u> -0,2	<u>1,8</u> -0,2	<u>1,4</u> -0,4
Западный Буг	<u>2,8</u> -0,2	<u>1,6</u> -0,2	<u>1,3</u> -0,1	<u>0,9</u> -0,2	<u>0,7</u> -0,1	<u>2,8</u> -0,2	<u>1,6</u> -0,2	<u>1,3</u> -0,1	<u>0,9</u> -0,2	<u>0,7</u> -0,1
Припять	<u>11,2</u> 1,3	<u>7,6</u> 1,1	<u>6,6</u> 1,0	<u>5,0</u> 0,6	<u>3,5</u> 0,4	<u>23,9</u> 1,7	<u>16,8</u> 1,5	<u>14,4</u> 1,4	<u>11,0</u> 0,9	<u>8,3</u> 1,3
Днепр	<u>16,3</u> -0,1	<u>11,8</u> 0,1	<u>11,0</u> -0,3	<u>9,5</u> 0,1	<u>7,8</u> 0,2	<u>28,2</u> 0,0	<u>20,3</u> 0,1	<u>18,7</u> -0,2	<u>15,6</u> -0,1	<u>13,1</u> 0,3
в т. ч.:										
Бережина	<u>6,3</u> 0,1	<u>5,0</u> 0,1	<u>4,5</u> 0,0	<u>4,0</u> 0,1	<u>3,4</u> 0,1	<u>6,3</u> 0,1	<u>5,0</u> 0,1	<u>4,5</u> 0,0	<u>4,0</u> 0,1	<u>3,4</u> 0,1
Сож	<u>4,9</u> -0,1	<u>3,4</u> -0,1	<u>3,0</u> 0,0	<u>2,4</u> -0,1	<u>1,8</u> -0,2	<u>10,6</u> 0,0	<u>7,6</u> 0,1	<u>6,6</u> 0,2	<u>5,4</u> 0,2	<u>4,4</u> 0,1
В целом по Беларуси	<u>51,8</u> 0,3	<u>37,9</u> 0,4	<u>34,1</u> 0,1	<u>28,1</u> -0,2	<u>22,7</u> -0,1	<u>88,2</u> 1,1	<u>64,3</u> 0,9	<u>56,9</u> 0,7	<u>46,4</u> 0,2	<u>37,5</u> 1,2



**Рисунок 1** – Карта модулей среднемноголетнего годового стока рек Беларуси, л/с с км<sup>2</sup>

Это позволило учесть усилившиеся в последние десятилетия процессы глобального потепления климата и антропогенных воздействий, которые, несомненно, наложили свой отпечаток на формирование стока рек. В распределении годового стока рек Беларуси наблюдается общее зональное понижение его в направлении с се-

вера на юг и юго-запад, что увязывается с распределением годовых осадков и запасов воды в снежном покрове. О характере колебаний речного стока можно судить по карте коэффициентов вариации, определенных за тот же период (рисунок 2) [6].

Карта поверхностного стока рек Беларуси приведена на рисунке 3.

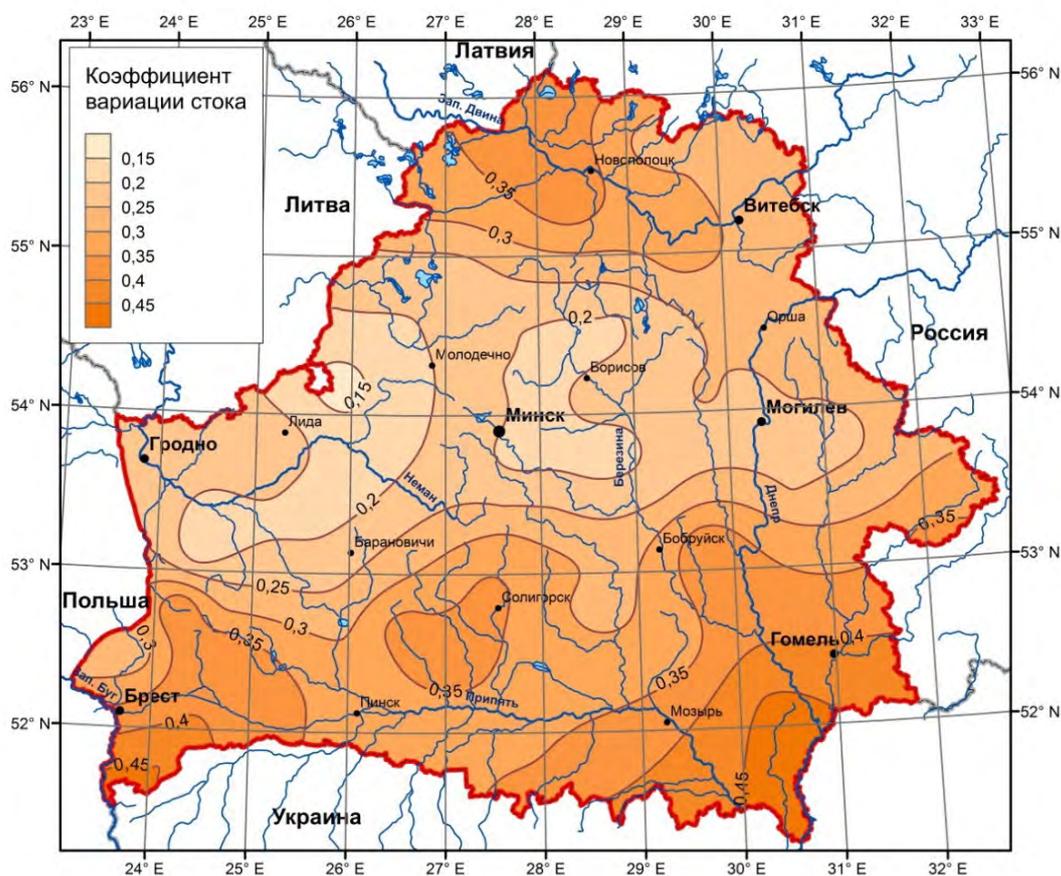


Рисунок 2 – Карта коэффициентов вариации среднемноголетнего годового стока рек Беларуси

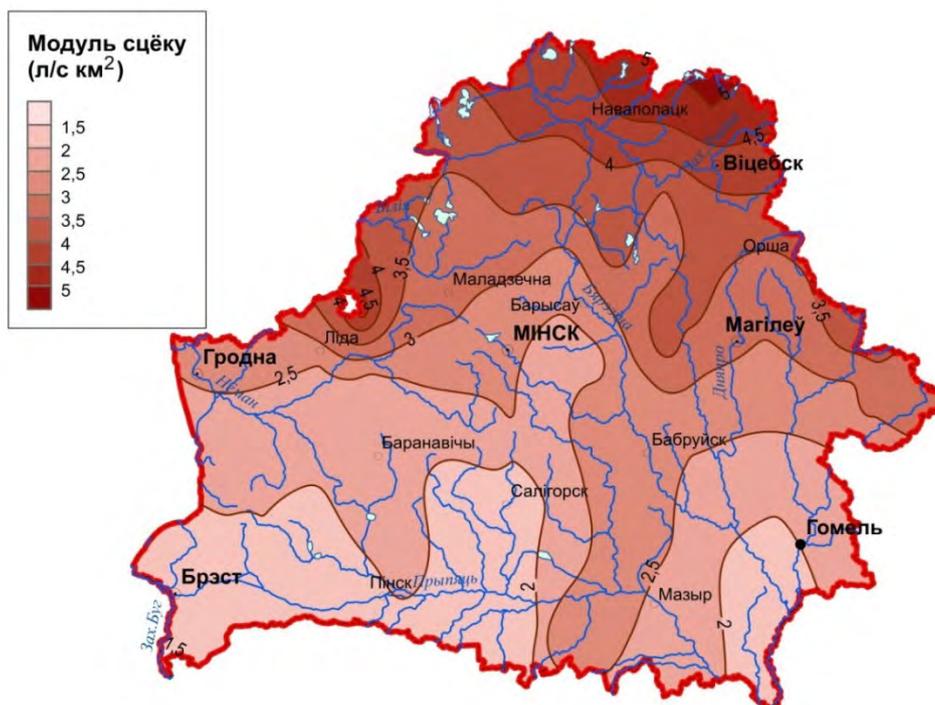


Рисунок 3 – Карта среднемноголетнего годового стока поверхностного стока рек Беларуси

*Наводнения*

По числу жертв и причиненному ущербу наводнения занимают первое место среди стихийных бедствий. Вместе с тем, как это ни парадоксально, до сего времени нет надежных долгосрочных прогнозов их появления, достоверных и общепринятых методик подсчета причиняемых ими ущербов и общепринятой концепции защиты.

За последние 100 лет на реках Беларуси наводнения, причинившие ощутимые ущербы имели место 10–12 раз. Наиболее часто, в среднем раз в 2–3 года, весенние наводнения бывают на Припяти в верхнем и среднем течении, Западной Двине и раз в 4–5 лет на Припяти в нижнем течении Березины [7]. Наиболее значительными из них явились наводнения в 1956, 1958, 1974, 1979, 1993 и 1999 гг. Одно из последних крупных половодий произошло в 1999 г., когда площадь подтопления составила 255 тыс. га. При этом необходимо отметить, что последствия водной стихии окончательно устраняются только через 3–4 года [7].

В таблице 2 представлены наиболее значительные наводнения на реках Беларуси, вызванные весенним половодьем за период инструментальных наблюдений.

Возникновению весенних наводнений содействуют многоснежные зимы без оттепелей, позднее и дружное таяние снега, значительное выпадение осадков в период снеготаяния. Наводнения такого типа наблюдались на Немане в 1958 году (самое существенное за последние 150 лет), на Припяти в 1977 и 1979 годах, в верховьях Днепра и Западной Двины в 1908 и 1931 годах. Летне-осенние наводнения вызываются интенсивными осадками. Огромные осенние наводнения отмечены в 1948, 1950, 1958, 1960, 1974 годах; наибольшее за последние 120 лет осеннее наводнение в 1974 обхватило бассейны Западного Буга и Припяти; количество осадков при этом в отдельных пунктах за октябрь было в 3–6 раз больше обычного. Зимние наводнения чаще всего отмечаются в

бассейне Припяти, и также бывают в бассейнах Немана и Западного Буга при мощных оттепелях.

Самый высокий подъем за период наблюдений на реках бассейна Западной Двины и Днепра наблюдался в 1931 году и составил соответственно 8–10 и 6,5–8,5 м по течению рек. Вероятность появления такого уровня воды – один раз в 100 лет. В бассейне Немана с такой же вероятностью наибольший уровень отмечался в 1958-м, на Припяти в 1895, 1979, 1999 гг. В период весеннего половодья, которому предшествуют суровые зимы со значительной толщиной льда и «дружной» весной, могут быть заторы льда. Они сопровождаются резкими подъемами уровня воды. Например, на Западной Двине у г. п. Улла в 1951 г. подъем составил 6 м. На реках Западный Буг и Мухавец затор льда в 1979 году стал причиной формирования высокого уровня воды, в результате которого происходил ее выход на пойму и затопление прилегающих территорий.

Наибольший ущерб народному хозяйству наносят высокие уровни в период весеннего половодья в бассейне р. Припять. Это связано с равнинным низинным рельефом местности, а также малой вредностью рек и, как следствие, малыми уклонами, что определяет малую пропускную способность русел рек. Как показывает анализ данных о наводнениях 1845 и 1931 гг., возможно формирование в будущем и более катастрофических по физическим характеристикам паводков и половодий. Вероятность появления расхода воды, превосходящего наводнения 1845 г., в ближайшие 100 лет – 38 %, а в ближайшие 10 лет – 5,8 %. Такая ситуация возможна при усилении антропогенной нагрузки на территорию водосбора, выражающейся в существенном изменении условий формирования стока.

В таблице 3 приведены расходы воды десяти наибольших наводнений в период весеннего половодья на р. Припять в створе г. Мозыря и их обеспеченности [7].

**Таблица 2 – Годы с наводнениями на реках Беларуси в период весенних половодий**

Река-пост	Характеристика наводнения		
	катастрофическое $P < 1\%$	Выдающееся $P = 1-2\%$	Большое $P = 3-10\%$
Западная Двина – г. Витебск	1931	1878, 1929, 1956	1958, 1962
Неман – г. Гродно	1958	1931	
Днепр – г. Орша	1931	1908, 1956	1907, 1917, 1929, 1958
Днепр – г. Речица		1956, 1958	1907, 1915, 1916, 1917, 1928, 1947, 1970
Березина – г. Бобруйск		1931, 1956	1883, 1917, 1924, 1932, 1958
Припять – г. Мозырь	1845	1888, 1895, 1979	1886, 1889, 1907, 1924, 1931, 1932, 1934, 1940, 1956, 1958, 1966, 1970, 1999

**Таблица 3 – Максимальные расходы воды весеннего половодья р. Припять – г. Мозырь**

Годы	1845	1877	1895	1888	1889	1940	1979	1932	1970	1958
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	11000	7500	5670	5100	4700	4520	4310	4220	4140	4010
$P, \%$	0,81	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	5,7	6,5	7,3	8,1

На рисунке 4 дана карта среднесезонных максимальных модулей стока весеннего половодья рек Беларуси, построенная с учетом современных климатических изменений.

Несмотря на то, что для территории Республики Беларусь проблема наводнений актуальна, практически до высокого летне-осеннего паводка 1974 г. в бассейне р. Припять, строгого учета ущерба от наводнений не проводилось.

Наводнения, как и некоторые другие виды чрезвычайных ситуаций природного характера, в определенной степени поддаются прогнозированию, что позволяет предотвратить массовые жертвы среди населения и уменьшить вред.

Избежать катастрофических последствий наводнений можно при соблюдении трех условий: своевременный прогноз чрезвычайной ситуации, эффективные действия властей всех уровней по ее предотвращению, строгая персональная ответственность за несоблюдение первых двух условий [7]. К сожалению, все эти условия в ряде случаев не выполняются. Последнее значимое наводнение было в 1999 г., а, следовательно, за последние годы не было серьезной практической проверки служб, технических возможностей и навыков специалистов и властей всех уровней.

По мнению специалистов, профилактика наводнений, прогнозы, отселение людей, а главное – ремонт дамб и проведение противопаводковых мероприятий, в том числе и экстренных, позволяют предотвратить наводнения примерно в 70 % обычных паводков. При этом затраты на профилактику и ликвидацию последствий наводнений находятся в соотношении 1:30.

*Маловодия*

Для рек Беларуси характерно наличие в году двух периодов низкого стока – летне-осеннего и зимнего. Летне-осенняя межень обычно наступает в конце мая – середине июня, после окончания весеннего половодья. В отдельные годы при раннем окончании половодья она устанавливается в конце апреля – начале мая, в годы с затяжным весенним половодьем – в конце июня, а на больших реках даже середине июля при отсутствии осенних паводков летне-осенняя межень продолжается до появления ледяных образований. В среднем окончание летне-осенней межени отмечается в середине ноября – начале декабря. Наиболее ранние сроки окончания летне-осенней межени – третья декада октября, наиболее поздние – начало декабря.

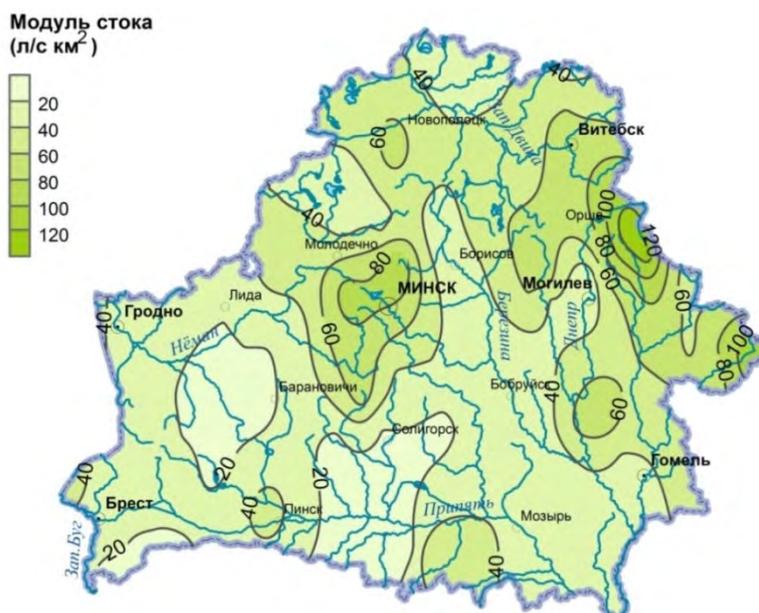


Рисунок 4 – Карта средних максимальных модулей стока весеннего половодья рек Беларуси

В переходный период от летне-осенней межени к зимней происходит нарушение связи уровней и расходов воды, что связано с появлением ледовых образований на реках.

Зимняя межень в среднем устанавливается в ноябре – середине декабря. В отдельные годы даты установления зимней межени сдвигаются на конец октября – начало ноября (раннее наступление) или январь (позднее наступление). Зимняя межень продолжается до начала весеннего половодья.

В летне-осенний период минимальный сток наблюдается, как правило, в конце лета, начале осени и в зимний период – в конце зимнего периода, когда истощаются подземные воды. Формирование минимальных расходов воды в зимний и летне-осенний период тесно связано с режимом подземного стока и его значение значительно колеблется. Наименьшее подземное питание рек наблюдается на юге территории в бассейне р. Днепр (ниже г. Рогачев), в бассейнах рек Припять и Западный Буг. Небольшое подземное питание наблюдается также на востоке и на крайнем северо-западе Беларуси (бассейн р. Западная Двина). Наибольшее подземное питание наблюдается на северо-западе и центральной части в пределах

Ошмянской, Новогрудской, Минской возвышенностей (бассейны рек Вилия, Неман).

В соответствии с изменением подземного стока распределяется и минимальный сток. Для годового стока изменение модуля стока зависит от широты – уменьшение с севера на юг, а для минимального стока такой закономерности не наблюдается, то есть для минимального стока уменьшается зависимость от климатических факторов и усиливается влияние физико-географических факторов. В первую очередь на величину минимального стока оказывает влияние дренирующая способность рек, которая зависит от геоморфологических и почвенных условий водосборов. На водосборах рек притоков Припяти грунтовые воды очень близко расположены к поверхности, но подземный сток невысокий из-за равнинного рельефа, малых уклонов и малоразвитых и врезанных на незначительную глубину русел рек. Поэтому здесь наблюдается самый низкий минимальный сток. На реках, отличающихся большими уклонами, повышенным эрозийным врезом (реки бассейна Вилии и Немана), характерно более значительное подземное питание, и поэтому минимальный сток здесь выше (рисунок 5).

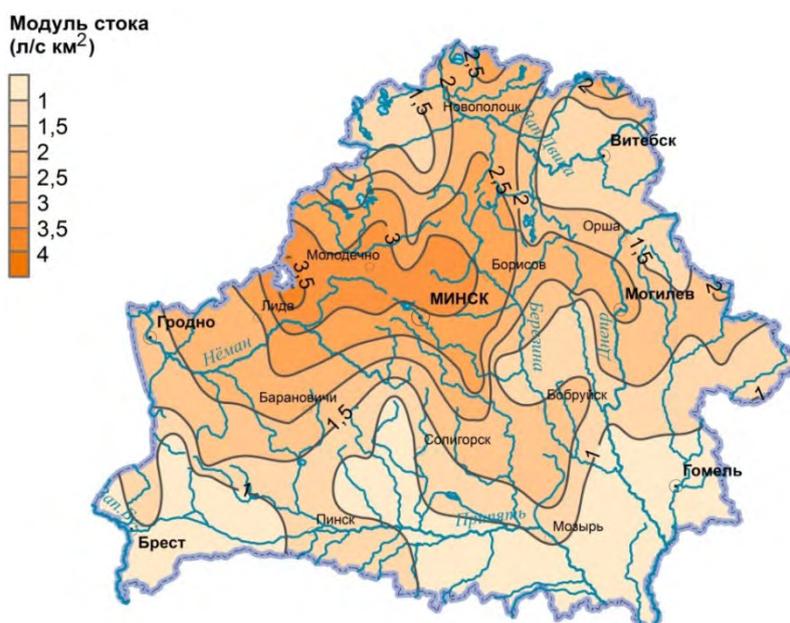


Рисунок 5 – Карта среднееголетнего минимального летне-осеннего стока рек Беларуси

Многолетний ход минимального стока на малых и средних реках, как правило, соответствует ходу на больших реках.

Минимальные значения наблюдаемых наименьших расходов воды летне-осеннего периода ниже средних многолетних в 1,6–3,5 раза, а по отдельным рекам – в 8 раз. В маловодные годы на малых реках может наблюдаться их пересыхание (р. Нача – д. Нача в 2002 г. – 20 дней).

В маловодные годы наблюдаемые наименьшие зимние расходы воды были ниже средних многолетних значений в 1,6–8,0 раза на реках бассейна Западной Двины, в 1,7–4,0 раза на реках бассейна

Немана и Западного Буга, в 2,0–3,5 раза на реках бассейна Днепра, в 2,8–3,1 раза на реках бассейна Сожа, в 3,1–6,5 раза на реках бассейна Припяти, а на отдельных притоках Припяти наблюдаемые наименьшие зимние расходы воды были ниже средних многолетних значений более, чем в 10 раз (р. Уборть – с. Краснобережье – в 14 раз в 1936 г.) (рисунок 6).

В пределах Полесья нулевой сток отмечен на 17 водотоках с площадями водосборов 11–1280 км<sup>2</sup>. Средняя продолжительность одного случая нулевого стока может достигать летом 195 суток, зимой – 75–100 суток.

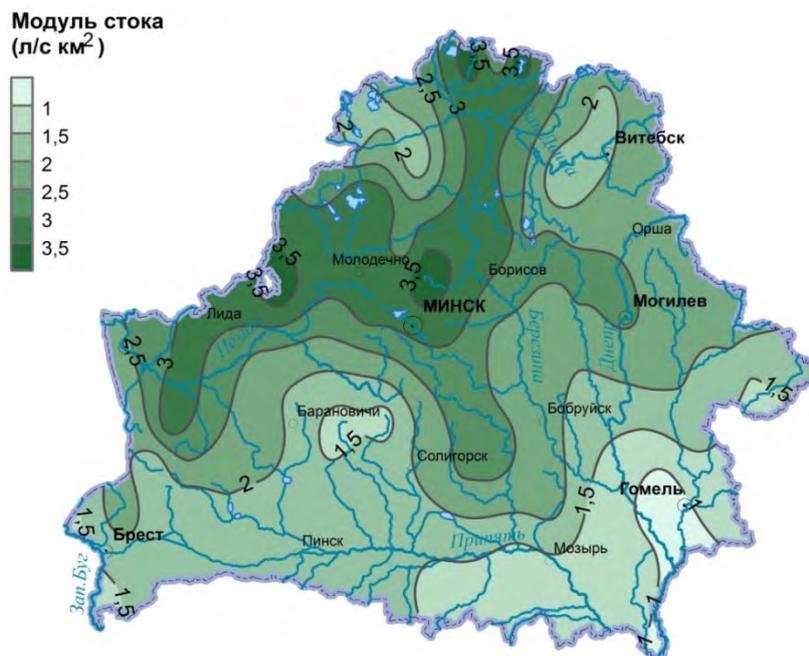


Рисунок 6 – Карта среднемноголетнего минимального зимнего стока рек Беларуси

*Антропогенные воздействия на речной сток*

Начиная с 50-х годов прошлого столетия развернулась дискуссия о влиянии мелиорации на речной сток. Основное воздействие на водный режим рек было оказано в период широкомасштабных гидротехнических мелиораций, особенно в Полесской низменности. При этом водные ресурсы Полесья сильнее других регионов подверглись антропогенным воздействиям. Было осушено 23 % территории, общая протяженность открытой мелиоративной сети превысила 65000 км, существенно преобразовалась гидрографическая сеть, особенно, если учесть спрямление и углубление самой Припяти и крупных ее притоков. Кроме того, обвалование отдельных участков Припяти и строительство польдерных мелиоративных систем, которые исключают затопление обвалованных участков поймы, привело к тому, что грунтовые воды понизились на 1,0–1,5 м, вслед за ними снизились уровни воды в реках, в некоторых – вплоть до пересыхания. Все это выразилось в изменении гидрологического режима рек.

Оценка изменений речного стока Беларуси за период с 1877 по 2020 гг. показала, что в среднем по территории имеет место некоторая тенденция уменьшения среднегодового стока, хотя статистически и незначимая. Максимальные сток весеннего половодья статистически значимо уменьшается со скоростью –  $0,051 \cdot Q_{\max}$ , а минимальный летне-осенний и зимний сток растет со скоростью  $0,010 Q_{\min.л.-о}$  и  $0,047 Q_{\min.з.}$ , соответственно (таблица 4) [9].

За период современного потепления тенденции изменения стока имеют такую же тенденцию, как период инструментальных наблюдений, за исключением минимального летне-осеннего стока. За последние 50 лет сохраняется аналогичная тенденция изменения стока. Статистически значимо уменьшение максимального стока весеннего половодья и рост минимального зимнего стока.

Детальная оценка изменения стока основных рек Беларуси за рассматриваемые периоды представлена в таблице 5 и на рисунке 7 [9].

Таблица 4 – Значение линейных трендов стока рек Беларуси

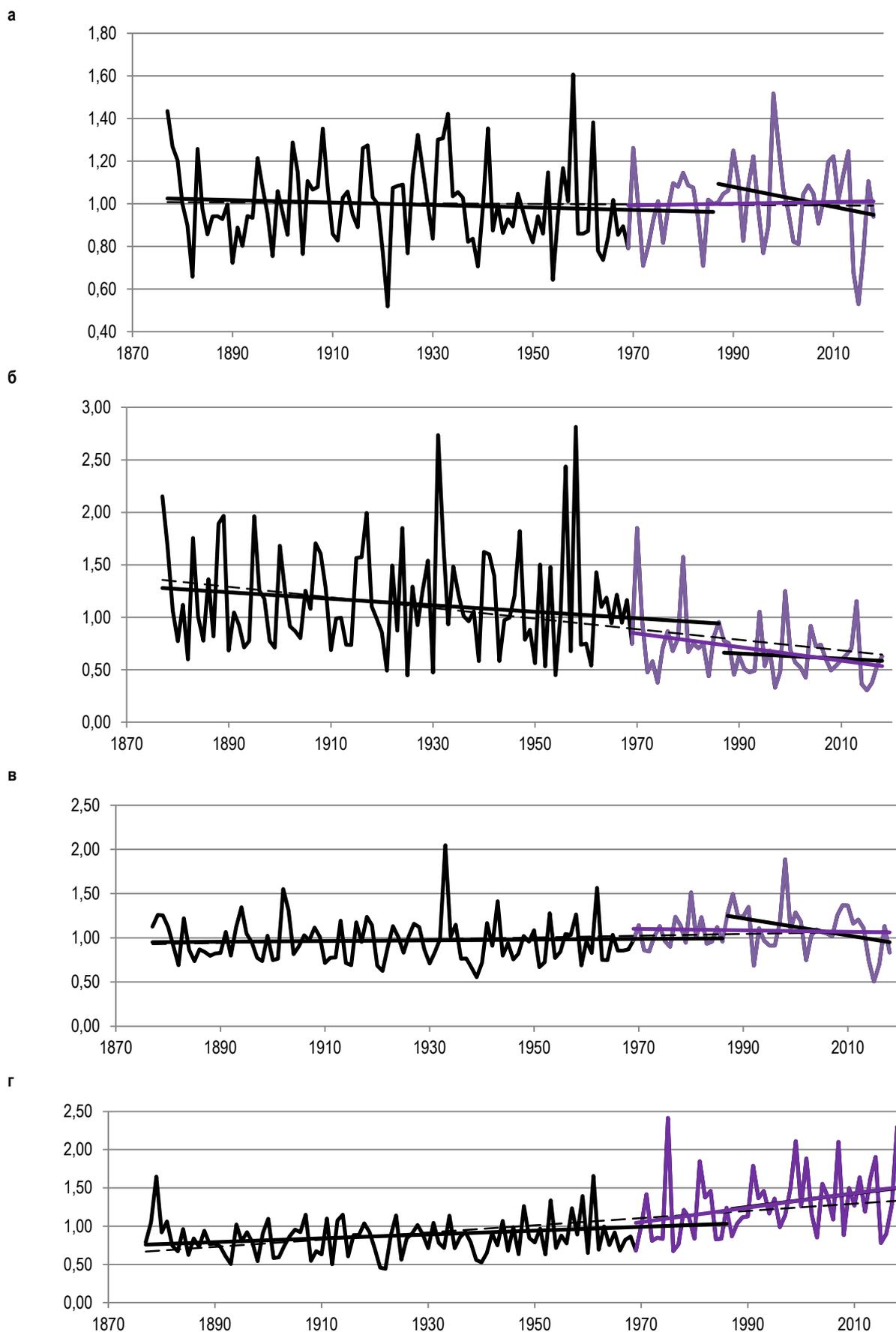
Период	1877–2018 гг. (142 года)	1877–1986 гг. (110 лет)	1987–2018 гг. (32 года)	1969–2018 гг. (50 лет)
Вид стока	<i>Средний годовой</i>			
$\alpha_{10 \text{ лет}} / r$	$-0,001 Q_{\text{ср.год}} / -0,03$	$-0,006 Q_{\text{ср.год}} / -0,10$	$-0,047 Q_{\text{ср.год}} / -0,22$	$0,004 Q_{\text{ср.год}} / 0,03$
Вид стока	<i>Максимальный весеннего половодья</i>			
$\alpha_{10 \text{ лет}} / r$	$-0,051 Q_{\max} / -0,42$	$-0,031 Q_{\max} / -0,20$	$-0,025 Q_{\max} / -0,10$	$-0,065 Q_{\max} / -0,32$
Вид стока	<i>Минимальный летне-осенний</i>			
$\alpha_{10 \text{ лет}} / r$	$0,010 Q_{\min.л.-о} / 0,17$	$0,004 Q_{\min.л.-о} / 0,05$	$-0,096 Q_{\min.л.-о} / -0,34$	$-0,008 Q_{\min.л.-о} / -0,05$
Вид стока	<i>Минимальный зимний</i>			
$\alpha_{10 \text{ лет}} / r$	$0,047 Q_{\min.з.} / 0,52$	$0,025 Q_{\min.з.} / 0,27$	$0,088 Q_{\min.з.} / 0,21$	$0,095 Q_{\min.з.} / 0,32$

Примечание – Выделены статистически значимые величины.

Таблица 5 – Статистические характеристики гидрологических параметров рек Беларуси

Параметры	Припять-Мозырь	Неман-Гродно	Зап. Двина-Витебск	Березина-Бобруйск	Днепр-Орша	Днепр-Речица	Припять-Мозырь	Неман-Гродно	Зап. Двина-Витебск	Березина-Бобруйск	Днепр-Орша	Днепр-Речица
Вид стока	Средний годовой											
Период	1877–2020 гг. (144 года)						1877–1986 гг. (110 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	394	195	226	119	127	364	387	198	221	119	125	365
C <sub>v</sub>	0,31	0,18	0,27	0,19	0,26	0,21	0,31	0,18	0,27	0,19	0,26	0,22
α10 лет	3,27	-0,79	-0,06	-0,02	-0,34	<b>-3,08</b>	2,20	0,41	0,08	-2,76	<b>-1,97</b>	<b>-5,55</b>
r	0,11	-0,09	-0,01	0,00	-0,04	<b>-0,16</b>	0,06	0,04	0,01	-0,15	<b>-0,20</b>	<b>-0,22</b>
% от Q <sub>ср</sub>	0,83	-0,41	-0,03	-0,02	-0,27	-0,85	0,57	0,21	0,04	-2,32	-1,58	-1,52
Период	1987–2020 гг. (34 года)						1971–2020 гг. (50 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	418	184	242	118	134	360	432	188	228	117	126	348
C <sub>v</sub>	0,29	0,16	0,27	0,19	0,26	0,20	0,29	0,16	0,27	0,17	0,25	0,19
α10 лет	-6,42	-0,16	-3,66	-29,3	-9,40	-10,5	-15,75	-2,59	-0,33	5,75	4,33	7,27
r	-0,05	0,00	-0,15	<b>-0,42</b>	-0,26	-0,14	-0,18	-0,13	-0,02	0,14	0,20	0,16
% от Q <sub>ср</sub>	-1,54	-0,09	-1,51	-24,8	-7,02	-2,92	-3,65	-1,37	-0,14	4,91	3,44	2,09
Период	1877–2020 гг. (144года)						1877–1986 гг. (110 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	1599	798	1517	594	793	1730	1760	887	1608	679	875	1969
C <sub>v</sub>	0,72	0,57	0,36	0,71	0,44	0,59	0,70	0,54	0,33	0,64	0,40	0,52
α10 лет	<b>-75,2</b>	<b>-39,0</b>	<b>-35,8</b>	-44,4	<b>-40,3</b>	<b>-106,1</b>	-51,9	-19,8	-16,4	-28,2	<b>-28,2</b>	<b>-81,3</b>
r	<b>-0,27</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,47</b>	-0,13	-0,13	-0,12	-0,17	<b>-0,26</b>	<b>-0,25</b>
% от Q <sub>ср</sub>	-4,70	-4,89	-2,36	-7,48	-5,08	-6,13	-2,95	-4,40	-1,02	-4,15	-3,22	-4,13
Период	1987–2020 гг. (34 года)						1971–2020 гг. (50 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	1047	492	1203	300	510	911	1266	549	1229	356	536	1024
C <sub>v</sub>	0,58	0,40	0,37	0,51	0,38	0,41	0,68	0,53	0,34	0,59	0,34	0,49
α10 лет	106,2	-57,7	-15,3	-110,3	-24,3	-33,7	<b>-169,7</b>	<b>-60,1</b>	<b>-49,5</b>	-47,2	-26,8	<b>-102,3</b>
r	0,20	-0,27	-0,09	-0,23	-0,12	-0,08	<b>-0,29</b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,34</b>	-0,16	-0,21	<b>-0,30</b>
% от Q <sub>ср</sub>	10,1	-11,7	-1,27	-36,8	-4,77	-3,7	-13,4	-10,9	-4,03	-13,3	-5,00	-9,99
Период	1877–2020 гг. (144 года)						1877–1986 гг. (110 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	155	89,5	52,2	55,6	34,0	154	149	90,2	51,4	54,8	31,2	149
C <sub>v</sub>	0,47	0,19	0,41	0,22	0,36	0,24	0,48	0,18	0,42	0,22	0,34	0,22
α10 лет	2,70	0,26	0,19	-0,18	<b>1,08</b>	1,40	2,34	1,19	-0,12	-0,76	0,44	-0,14
r	0,15	0,06	0,06	-0,03	<b>0,36</b>	0,16	0,10	<b>0,23</b>	-0,03	-0,11	0,13	-0,01
% от Q <sub>ср</sub>	1,75	0,29	0,36	-0,32	3,18	0,91	1,57	1,32	-0,23	-1,39	1,41	-0,09
Период	1987–2020 гг. (34 года)						1971–2050 гг. (50 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	174	86,8	55,0	58,7	43,5	171	183	90,4	51,5	58,7	40,0	164
C <sub>v</sub>	0,41	0,21	0,37	0,22	0,30	0,26	0,39	0,20	0,34	0,21	0,29	0,23
α10 лет	-21,3	-3,90	-3,60	<b>-8,11</b>	-2,92	<b>-14,0</b>	-13,9	-3,49	-0,93	0,90	<b>2,26</b>	1,81
r	-0,28	-0,20	-0,26	<b>-0,37</b>	-0,21	<b>-0,30</b>	<b>-0,28</b>	<b>-0,29</b>	-0,11	0,07	<b>0,28</b>	0,07
% от Q <sub>ср</sub>	-12,2	-4,49	-6,54	-13,8	-6,71	-8,21	-7,58	-3,86	-1,81	1,53	5,66	1,10
Период	1877–2020 гг. (144 года)						1877–1986 гг. (110 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	155	71,5	53,2	51,5	29,6	129	136	69,8	47,8	48,4	24,7	109
C <sub>v</sub>	0,68	0,30	0,48	0,28	0,52	0,48	0,75	0,29	0,43	0,26	0,42	0,42
α10 лет	<b>10,6</b>	0,47	1,41	-0,18	2,19	<b>9,31</b>	<b>8,54</b>	-0,52	<b>0,79</b>	-0,76	<b>1,27</b>	<b>5,70</b>
r	<b>0,41</b>	0,09	<b>0,40</b>	-0,03	<b>0,58</b>	<b>0,62</b>	<b>0,27</b>	-0,08	<b>0,20</b>	-0,11	<b>0,39</b>	<b>0,40</b>
% от Q <sub>ср</sub>	6,82	0,66	2,65	-0,35	7,40	7,23	6,27	-0,75	1,65	-1,57	5,14	5,24
Период	1987–2020 гг. (34 года)						1971–2020 гг. (50 лет)					
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	221	77,5	72,0	62,0	46,4	198	225	72,8	64,2	59,8	42,0	180
C <sub>v</sub>	0,42	0,31	0,43	0,26	0,40	0,31	0,59	0,37	0,45	0,27	0,41	0,35
α10 лет	27,5	<b>12,0</b>	3,30	<b>-8,11</b>	-0,08	6,35	2,70	<b>7,58</b>	2,56	0,90	<b>3,76</b>	<b>17,1</b>
r	0,28	<b>0,46</b>	0,19	<b>-0,37</b>	0,00	0,10	0,03	<b>0,41</b>	0,23	0,07	<b>0,32</b>	<b>0,40</b>
% от Q <sub>ср</sub>	12,4	15,5	4,58	-13,1	-0,17	3,21	1,20	10,4	3,99	1,51	8,95	9,52

Примечание – Выделены статистически значимые величины.



а) – годовые; б) – максимальные весеннего половодья; в) – минимальные летне-осенние; г) – минимальные зимние  
Рисунок 7 – Динамика модулей стока воды рек Беларуси

Суммарные ресурсы поверхностных вод Беларуси практически не изменились. В то же время произошло перераспределение естественных водных ресурсов по бассейнам основных рек. Современный этап использования водных ресурсов в Республике Беларусь характеризуется стабилизацией их потребления.

#### Прогнозные оценки изменения стока рек Беларуси

Исследования по оценке и прогнозу изменения климата для территории Беларуси выполняются с учетом обязательств Республики Беларусь по Рамочной конвенции ООН об изменении климата [10].

Для прогнозных оценок изменения стока рек бассейнов адаптирован метод гидролого-климатических расчетов, предложенный В. С. Мезенцевым, основанный на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов [11]. Положив в основу гидролого-климатическую гипотезу В. С. Мезенцева [11], нами разработана многофакторная модель, включающая стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом разрезе. Разработанная модель использована для оценки возможных изменений водных ресурсов рек в зависимости от тех или иных гипотез климатических колебаний и антропогенных воздействий на характеристики водосборов [12, 13, 14].

Моделирование водного баланса исследуемой реки реализовано в виде компьютерной программы и осуществляется в два этапа. На первом этапе производится настройка модели по известным составляющим водного и теплового балансов исследуемой реки. При настройке модели преследуется цель достичь наибольшего соответствия рассчитанного климатического и руслового стоков. Первый этап заканчивается построением графиков климатического и руслового стока и выводом ошибки моделирования.

Хорошее совпадение измеренного и рассчитанного стока свидетельствует о корректности модели. Полученные параметры модели использованы при проведении численного эксперимента.

Второй этап представляет собой непосредственный расчет водного баланса исследуемой реки, используя параметры, полученные при калибровке модели. Расчет элементов водного баланса исследуемой реки производится с учетом конкретных особенностей рассматриваемого водосбора.

По прогнозным оценкам на период до 2035 года изменение объемов стока возможна резкая дифференциация между северной и южной частью республики, между малыми и большими реками. При незначительном изменении стока в среднем за год, высокая вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Особенно значительно может измениться сток в летние месяцы с его снижением во все сезоны на юге Беларуси. Вместе с тем для севера Беларуси прогнозируются не столь значительные изменения стока, как для юга.

Следует отметить, что прогнозные оценки изменения стока рек в условиях изменяющегося климата следует рассматривать как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей, исходя из различных факторов, основные из которых:

- погрешность выявленных тенденций изменения метеорологических и гидрологических характеристик с учетом оценки статистической значимости этих тенденций;
- неопределенность и неоднозначность сценариев изменения климата;
- неопределенность результатов расчетов с использованием гидрологических моделей для прогнозирования стока, обусловленную как погрешностями самих моделей и их верификации, так и с неопределенностями используемых в них данных и коэффициентов;
- неопределенность прогнозов влияния факторов антропогенной нагрузки на водные ресурсы с учетом изменения климата.

Однако значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании водоохраных и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речными бассейнами в Беларуси.

Особенно это актуально в связи с тем, что одним из наиболее негативных последствий изменения климата для речного стока яв-

ляется возможное увеличение частоты и интенсивности неблагоприятных метеорологических и гидрологических явлений. К этим явлениям относятся ливни, засухи, поздние заморозки, наводнения, обусловленные паводками и половодьями, особенно при соединении факторов таяния снега и осадков в виде мокрого снега и дождя, а также возможного увеличения продолжительности половодья.

Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений.

Проблема возникновения маловодных периодов также актуальна для бассейнов рек Республики Беларусь. Хотя в настоящее и будущее время нет явных предпосылок для возникновения дефицита водных ресурсов, тем не менее, повышается вероятность наступления длительных маловодных периодов. Во время маловодных периодов может произойти ухудшение экологического состояния и рекреационного потенциала поверхностных водных объектов и прилегающих территорий, изменение гидрогеологического режима грунтовых вод, истощение почвенного покрова в пойме и т. п.

Кроме того, за счет возможного увеличения частоты и продолжительности засушливых периодов повышаются риски существенного уменьшения стока малых рек со снижением в них уровня воды, ухудшением ее качества и уменьшением рекреационного потенциала этих рек.

Поэтому разработка и реализация мер по адаптации к изменению климата в части совершенствования управления водными ресурсами является актуальной задачей.

#### Заключение

В обозримом будущем в стране не следует ожидать значительного роста или падения водопотребления и существующие водные ресурсы в полной мере будут удовлетворять потребности всех отраслей экономики и требованиям экологического стока. Однако это не снимает с повестки дня вопросов очистки природных и сточных вод, сохранения качества природных вод, обеспечения безопасности функционирования водных экосистем.

Интенсивное освоение речных пойм в совокупности с прогнозируемым изменением климата приведет к увеличению разрушительной силы наводнений и их повторяемости. Минимизировать негативные последствия катастрофических наводнений можно, имея своевременный прогноз и эффективные действия властей. К сожалению, эти условия в ряде случаев не выполняются. Борьба с наводнениями является межгосударственной проблемой и в ее решении должны принимать все страны, расположенные на водосборе.

Главной задачей в исследовании водных ресурсов Беларуси на нынешнем этапе является их комплексная оценка современного состояния с учетом пространственно-временных колебаний и изменений основных составляющих водного баланса речных водосборов. При этом необходимо учитывать влияния на них различных природных и антропогенных факторов, прогноз изменения водных ресурсов при различных сценариях развития климата. На основе полученных научных результатов разработать мероприятия по минимизации возможных негативных последствий в случае изменения режима водных ресурсов.

**Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ № X23-127 от 02.05.2023.**

#### Список цитированных источников

1. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёры, вадасховішчы, турысцкі патынцьял водных аб'ектаў / маст.: Ю. А. Тарэеў, У. І. Цярэнцьеў. – Мінск: БелЭн, 2007. – 480 с.
2. Волчек, А. А. Оптимизация режимной гидрологической сети Беларуси / А. А. Волчек // Мелиорация. – 2020. – № 4 (94). – С. 24–29.
3. Волчек, А. А. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. – 2009. – № 1. – С. 22–30.

4. Логинов, В. Ф. Современные изменения водных ресурсов Республики Беларусь / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, С. И. Парфомук // География и природные ресурсы. – 2008. – № 4. – С. 149–154.
5. Волчек, А. А. Водные ресурсы Республики Беларусь на современном этапе / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2011. – № 2 (68). – С. 2–5.
6. Волчек, А. А. Пространственно-временная структура среднесноголетнего годового стока рек Беларуси / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 2 (125). – С. 75–80.
7. Логинов, В. Ф. Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Ан. А. Волчек. – Минск : Беларуская навука, 2014. – 244 с.
8. Воробьев, Ю. Л. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. – М. : ДЭКС-ПРЕСС, 2003. – 352 с.
9. Волчек, А. А. Водные ресурсы Беларуси и экологические риски // Вопросы географии / Русское географическое общество / редкол.: В. М. Котляков [и др.]. – М. : Медиа-ПРЕСС, 2023. – Сб. 157. Водные проблемы и их решение. – С. 81–104.
10. 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. – 228 с.
11. Мезенцев, В. С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования / В. С. Мезенцев // Водные ресурсы. – 1995. – Т. 22, № 3. – С. 299–301.
12. Волчек, А. А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) / А. А. Волчек // Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР). – 1986. – № 12. – С. 17–21.
13. Волчек, А. А. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 1. – С. 50–62.
14. Статистические методы в природопользовании : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев [и др.]. – Брест : БПИ, 1999. – 252 с.
1. Blakitny skarb Belarusi: Reki, azyory, vadaskhovishchy, tursyski patyncyyal vodnyh ab'ektaŭ / mast.: YU. A. Tareeŭ, U. I. Syarenc'eŭ. – Minsk : BelEn, 2007. – 480 s.
2. Volchek, A. A. Optimizaciya rezhimnoj gidrologicheskoj seti Belarusi / A. A. Volchek // Melioraciya. – 2020. – № 4 (94). – S. 24–29.
3. Volchek, A. A. Paket prikladnyh programm dlya opredeleniya raschetnyh charakteristik rechnogo stoka / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vestnik Paleskaga dzhzyarzhaj'naga universiteta. Seryya pryrodaznaučnyh navuk. – 2009. – № 1. – S. 22–30.
4. Loginov, V. F. Sovremennye izmeneniya vodnyh resursov Respubliki Belarus' / V. F. Loginov, A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Geografija i prirodnye resursy. – 2008. – № 4. – S. 149–154.
5. Volchek, A. A. Vodnye resursy Respubliki Belarus' na sovremennom etape / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – 2011. – № 2 (68). – S. 2–5.
6. Volchek, A. A. Prostranstvenno-vremennaya struktura srednogoletnogo godovogo stoka rek Belarusi / A. A. Volchek, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 2 (125). – S. 75–80.
7. Loginov, V. F. Vesennije polovod'ja na rekah Belarusi: prostranstvenno-vremennye kolebaniya i prognoz / V. F. Loginov, A. A. Volchek, An. A. Volchek. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2014. – 244 s.
8. Vorob'ev, YU. L. Katastroficheskie navodneniya nachala XXI veka: uroki i vyvody / YU. L. Vorob'ev, V. A. Akimov, YU. I. Sokolov. – M. : DEKS-PRESS, 2003. – 352 s.
9. Volchek, A. A. Vodnye resursy Belarusi i ekologicheskie riski // Voprosy geografii / Russkoe geograficheskoe obshchestvo / redkol.: V. M. Kotlyakov [i dr.]. – M. : Media-PRESS, 2023. – Sb. 157. Vodnye problemy i ih reshenie. – S. 81–104.
10. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetoм izmeneniya klimata / A. A. Volchek [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 228 s.
11. Mezencev, V. S. Gidrologo-klimaticheskaya gipoteza i primery ee ispol'zovaniya / V. S. Mezencev // Vodnye resursy. – 1995. – T. 22, № 3. – S. 299–301.
12. Volchek, A. A. Metodika opredeleniya maksimal'no vozmozhnogo isparenija po massovym meteodannym (na primere Belorussii) / A. A. Volchek // Nauchno-tekhnicheskaya informaciya po melioracii i vodnomu hozyajstvu (Minvodhoz BSSR). – 1986. – № 12. – S. 17–21.
13. Volchek, A. A. Ocenka transformacii vodnogo rezhima malyh rek Belorusskogo Poles'ya pod vozdejstviem prirodnyh i antropogennyh faktorov (na primere r. YAsel'da) / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. – 2007. – № 1. – S. 50–62.
14. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii : uchebnoe posobie dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij / V. E. Valuev [i dr.]. – Brest : BPI, 1999. – 252 s.

Материал поступил 22.05.2024, одобрен 24.06.2024, принят к публикации 24.06.2024