

УДК 556.5+574(476)

А. А. ВОЛЧЕК, С. И. ПАРФОМУК, Д. А. ШПОКА

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ ПОСТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ ВОДЫ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ

*Брестский государственный технический университет**(Поступила в редакцию 23.05.2023)*

В настоящее время на территории Беларуси закрыт ряд гидрометрических постов, предназначенных для наблюдения за уровнем воды на реках. Существует несколько причин закрытия постов: снижение финансирования, выход из строя гидрометрического оборудования, а также достигнутая удовлетворительная гидрологическая изученность территории. Проведенные исследования по оптимизации режимной гидрологической сети Беларуси позволили сделать вывод об оптимальном количестве гидрологических постов на территории страны. Но в случае наблюдения за значениями среднегодового уровня воды количество существующих станций является минимально необходимым, а уменьшение их количества недопустимо.

Введение. Уровень воды является основной характеристикой водного режима рек и широко используется при решении многих задач в гидрологии и водном хозяйстве. В настоящее время на территории Беларуси закрыт ряд гидрометрических постов, предназначенных для наблюдения за уровнем воды на реках. Существует несколько причин закрытия постов: снижение финансирования, выход из строя гидрометрического оборудования, а также достигнутая удовлетворительная гидрологическая изученность территории.

Для эксплуатации существующих водохозяйственных объектов, реконструкции физически и морально устаревших, а также строительства новых, требуется достоверная информация об уровне воды. Проблема усложняется тем, что объекты исследования находятся на некотором удалении от гидрометрического поста, на котором ведутся наблюдения за уровнем воды. В этом случае используются данные гидрометрических постов, которые необходимо объективно адаптировать к исследуемому объекту. При этом необходимо знать возможные ошибки при переносе данных.

Климатические изменения и увеличение антропогенной нагрузки на водные ресурсы нарушают естественный уровеньный режим рек, что необходимо учитывать при решении как теоретических, так и практических задач с использованием уровня воды рек.

Ранее нами выполнено исследование оптимального количества гидрологических постов наблюдения за значениями годового, максимального весеннего половодья, минимального летне-осеннего и минимального зимнего видами стока рек Беларуси [1]. В работе сделан вывод, что, в целом, количество гидрологических постов для оценки стока рек страны является оптимальным и уменьшение их количества недопустимо. Дальнейшее потепление климата и рост антропогенной нагрузки потребуют увеличения минимально необходимого количества гидрологических постов.

Целью настоящей работы является определение оптимального количества гидрометрических постов наблюдений за уровнем воды на реках Беларуси.

Материалы и методы исследования. В основу исследования положен метод оптимизации гидрологической сети, разработанный И. Ф. Карасевым [2]. Суть метода состоит в определении трех критериев, оказывающих влияние на оптимальное количество гидрометрических постов наблюдений за уровнем воды на реках.

Первый из критериев – это критерий репрезентативности $A_{\text{репр}}$. Этот критерий вытекает из условия зональности изменения уровня воды на реках. По мере уменьшения площади водосбора увеличивается роль азональных факторов (глубина эрозионного вреза русел, наличие карста, степень дренирования подземных вод и т. п.), поэтому площадь, охватываемая одним гидрометрическим постом, не должна быть слишком малой, чтобы азональные факторы не приобрели степень преобладающих над общими зональными закономерностями формирования стока [3]. Таким образом, репрезентативный критерий $A_{\text{репр}}$ ограничивает $A_{\text{опт}}$ – оптимальную площадь, приходящуюся на один гидрологический пост, снизу, т. е. $A_{\text{репр}} < A_{\text{опт}}$.

Вторым критерием является градиентный критерий $A_{\text{град}}$, определяемый следующей формулой [2]:

$$A_{\text{град}} \geq \frac{8\sigma_0^2}{(\text{grad}H)^2} H_{\text{ср}}^2, \quad (1)$$

где σ_0 – погрешность определения среднемноголетнего уровня воды; $\text{grad}H$ – градиент уровня воды; $H_{\text{ср}}$ – средняя величина уровня воды.

Погрешность определения среднемноголетнего уровня воды равна [3]

$$\sigma_0 = \frac{C_v}{\sqrt{N}},$$

где C_v – коэффициент вариации уровня воды; N – количество лет наблюдений.

Градиентный критерий определяет минимальную площадь, приходящуюся на один гидрометрический пост, и определяется физико-географическими условиями местности. Этот критерий характеризует надежность информации о про-

странственно-временных изменениях колебаний уровня воды рек. Располагать гидрологические посты чаще, чем требует этот критерий, экономически нецелесообразно, т. е. $A_{\text{град}} \leq A_{\text{опт}}$.

Третий критерий – это корреляционный критерий $A_{\text{корр}}$. Использование данного критерия обусловлено методом гидрологической аналогии, когда данные о неизученном водном объекте получают исходя из данных об объекте, аналогичном исследуемому, по гидрогеологическим и гидрометеорологическим условиям формирования уровня режима. Корреляционный критерий определяется следующим образом [2]:

$$A_{\text{корр}} \leq \frac{\sigma^4}{\alpha^2 C_v^4},$$

где σ – относительная случайная ошибка определения уровня воды по гидрометрическим данным, в первом приближении равная 0,05; $\alpha = 1/L_0$; L_0 – радиус корреляции стока, т. е. расстояние, при котором пространственная корреляционная функция (ПКФ) проходит через ноль [4].

Корреляционный критерий определяет верхнюю границу расчетной оптимальной площади гидрологического поста, т. е. $A_{\text{опт}} \leq A_{\text{корр}}$.

Оптимальная площадь, приходящаяся на один гидрометрический пост, должна находиться в следующем диапазоне:

$$A_{\text{репр}} < A_{\text{град}} \leq A_{\text{опт}} \leq A_{\text{корр}}.$$

Если приведенное выше соотношение между критериями не выполняется, то рекомендуется [2] при $A_{\text{репр}} < A_{\text{корр}} < A_{\text{град}}$ использовать соотношение $A_{\text{корр}} < A_{\text{опт}} < A_{\text{град}}$. Оптимальное число режимных гидрологических постов для территории определяется по формуле

$$N_{\text{опт}} = \frac{A}{A_{\text{опт}}},$$

где A – общая площадь территории.

Исходными данными для исследований послужили ряды многолетних наблюдений за уровнем воды рек по 78 гидрологическим постам Беларуси за период инструментальных наблюдений.

Результаты и их обсуждение. В первую очередь исследовано оптимальное количество гидрологических постов наблюдения за значениями среднегодового уровня воды рек Беларуси. Для нахождения репрезентативного критерия $A_{\text{репр}}$ использовалась методика, основанная на критерии однородности Стьюдента [5]. Проведенные исследования показали, что репрезентативная площадь, приходящаяся на один гидрологический пост наблюдения за значениями среднегодового уровня воды рек, для территории Беларуси составляет 374 км².

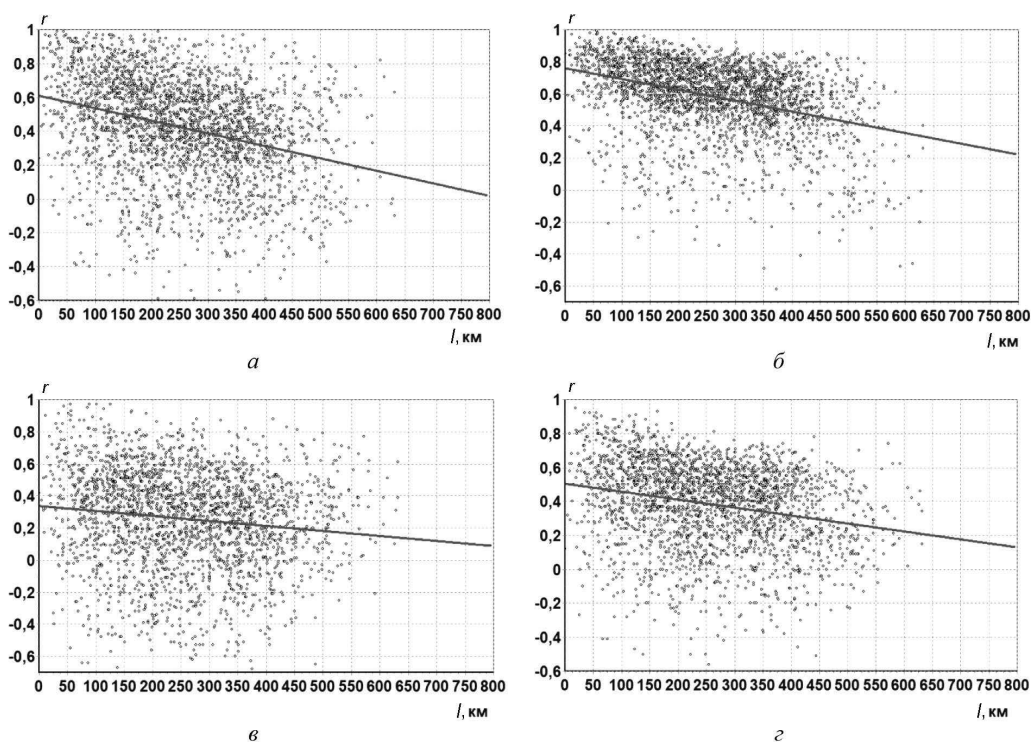


Рис. 1. Пространственные корреляционные функции уровня воды рек Беларуси:
 а – среднегодовой уровень; б – максимальный уровень; в – минимальный уровень периода открытого русла; з – минимальный уровень зимнего периода

Градиентный критерий $A_{\text{град}}$ находился исходя из значений среднегодового уровня воды исследуемых рек и значений градиентов уровня. Для нахождения параметров, входящих в (1), построены карты коэффициента вариации и абсолютных значений уровня воды. Таким образом, рассчитанное значение градиентного критерия для территории Беларуси составило 2153 км^2 .

Расчет корреляционного критерия $A_{\text{корр}}$ основан на нахождении радиуса корреляции уровня воды рек L_0 . Для его определения построена ПКФ среднегодового уровня воды рек $r(l)$, где r – коэффициент парной корреляции; l – расстояние между гидрометрическими постами. ПКФ уровня воды рек Беларуси приведены на рис. 1.

Радиус корреляции для территории Беларуси составил 823 км, а соответствующее значение корреляционного критерия $A_{\text{корр}} = 155 \text{ км}^2$.

Имея соотношение $A_{\text{корр}} < A_{\text{град}}$, оптимальная площадь, приходящаяся на один гидрологический пост, находится из соотношения $A_{\text{корр}} < A_{\text{опт}} < A_{\text{град}}$.

Если исходить из градиентного критерия, то общее число гидрометрических постов для территории Беларуси равно

$$N_{\text{опт}} = \frac{A}{A_{\text{град}}} = \frac{207600}{2153} \approx 96.$$

Если исходить из корреляционного критерия, тогда оптимальное количество гидрометрических постов наблюдения за значениями среднегодового уровня воды рек равно

$$N_{\text{опт}} = \frac{A}{A_{\text{корр}}} = \frac{207600}{155} \approx 1339.$$

Дальнейшее исследование проводилось для экстремальных значений уровня воды рек: максимальный, минимальный периода открытого русла и минимальный зимнего периода. Для максимального уровня значение репрезентативного критерия $A_{\text{репр}}$ равно 735 км², значение градиентного критерия $A_{\text{град}}$ составило 1722 км². Радиус корреляции при построении ПКФ максимального уровня воды рек Беларуси равен 1133 км, как показано на рис. 1. Значение корреляционного критерия $A_{\text{корр}} = 336$ км².

При исследовании минимального уровня воды рек Беларуси получены следующие результаты. Для минимального уровня воды периода открытого русла: $A_{\text{репр}} = 618$ км², $A_{\text{град}} = 1601$ км², $A_{\text{корр}} = 241$ км², а для минимального уровня воды зимнего периода значения репрезентативного, градиентного и корреляционного критериев соответственно равны 618, 1825 и 188 км². При нахождении корреляционных критериев $A_{\text{корр}}$ строились графики ПКФ минимального периода открытого русла и зимнего периода уровня воды рек Беларуси, приведенные на рис. 1.

Значения наименьшего и наибольшего количества гидрометрических постов наблюдений за максимальным и минимальным уровнем воды рек Беларуси приведены в табл. 1. Полученные в ходе расчетов значения наименьшего и наибольшего количества гидрометрических постов наблюдений за уровнем сильно отличаются ввиду больших значений коэффициентов вариации и среднего значения уровня воды, вводящих в расчетные формулы для определения корреляционного и градиентного критериев соответственно.

Т а б л и ц а 1. Оптимальное количество гидрометрических постов на территории Беларуси

Количество гидрометрических постов	Уровень воды рек			
	среднегодовой	максимальный	минимальный	
			открытого русла	зимний
Наименьшее	96	121	130	114
Наибольшее	1339	619	860	1103

На сегодняшний день на территории Беларуси функционирует 97 гидрологических речных постов. Анализируя полученные в ходе исследований результаты,

можно сделать вывод, что такое количество гидрометрических постов соответствует необходимому количеству для наблюдения только за среднегодовыми значениями уровня воды в реках Беларуси. Дальнейшее уменьшение количества гидрометрических постов на территории Беларуси недопустимо ввиду определяющего значения среднегодового уровня воды в гидрологических и агротехнических расчетах, гидротехническом строительстве и других отраслях народного хозяйства. Для наблюдения за максимальным, минимальным периода открытого русла и минимальным зимнего периода уровнем воды рек количество гидрометрических станций не соответствует минимально необходимым значениям. Поэтому для анализа таких видов уровня воды в среднем по территории Беларуси количество гидрологических речных постов должно быть увеличено.

Согласно нормативным документам, определение расчетных гидрологических характеристик должно основываться на данных гидрометеорологических наблюдений, в том числе регулярных наблюдений последних лет [6]. Поэтому исходные временные ряды наблюдений за уровнем воды рек Беларуси разбиты на два интервала: период до современного потепления климата (до 1987 г. включительно) и период климатических изменений (с 1988 г.). Для нахождения корреля-

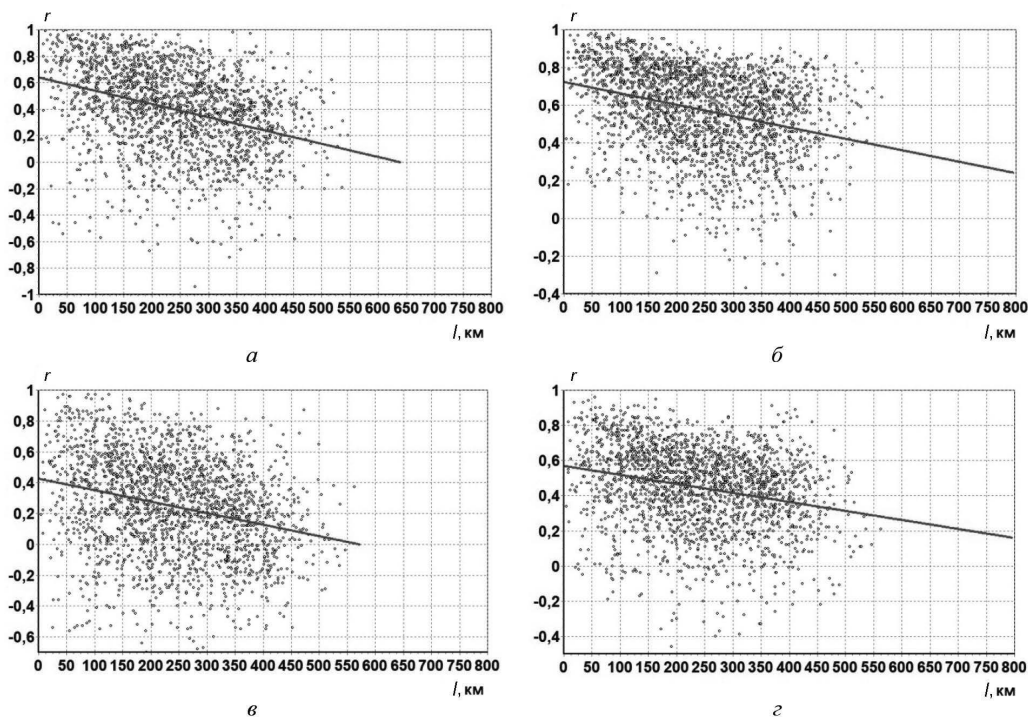


Рис. 2. Пространственные корреляционные функции уровня воды рек Беларуси до 1987 г.: а – среднегодовой уровень; б – максимальный уровень; в – минимальный уровень периода открытого русла; г – минимальный уровень зимнего периода

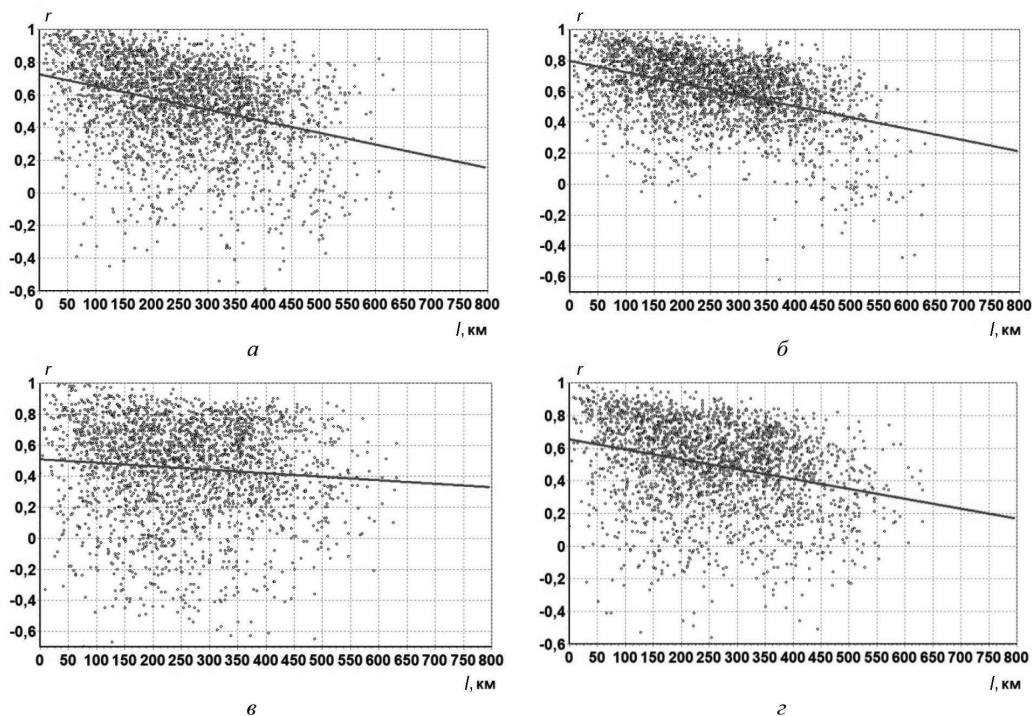


Рис. 3. Пространственные корреляционные функции уровня воды рек Беларуси с 1988 г.: а – среднегодовой уровень; б – максимальный уровень; в – минимальный уровень периода открытого русла; г – минимальный уровень зимнего периода

ционного критерия построены ПКФ уровня воды рек Беларуси для двух периодов, приведенные на рис. 2 и 3 соответственно. Значения репрезентативного, градиентного и корреляционного критериев для двух версий исследуемых рядов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Значения критериев для периодов до и после потепления климата

Период	Уровень воды	Значение критериев, км ²		
		$A_{\text{репр}}$	$A_{\text{град}}$	$A_{\text{корр}}$
До 1987 г.	Среднегодовой	454	6117	33
	Максимальный	760	3576	269
	Минимальный открытого русла	492	5302	22
	Минимальный зимний	492	4096	114
С 1988 г.	Среднегодовой	374	3464	159
	Максимальный	735	4329	146
	Минимальный открытого русла	618	3550	651
	Минимальный зимний	618	4360	97

Значения наименьшего и наибольшего количества гидрометрических постов наблюдений за характерным уровнем воды для двух исследуемых интервалов приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. **Оптимальное количество гидрометрических постов до и после потепления климата**

Период	Уровень воды	Количество гидрометрических постов	
		наименьшее	наибольшее
До 1987 г.	Среднегодовой	34	6207
	Максимальный	58	770
	Минимальный открытого русла	39	9472
	Минимальный зимний	51	1814
С 1988 г.	Среднегодовой	60	1308
	Максимальный	48	1417
	Минимальный открытого русла	58	319
	Минимальный зимний	48	2137

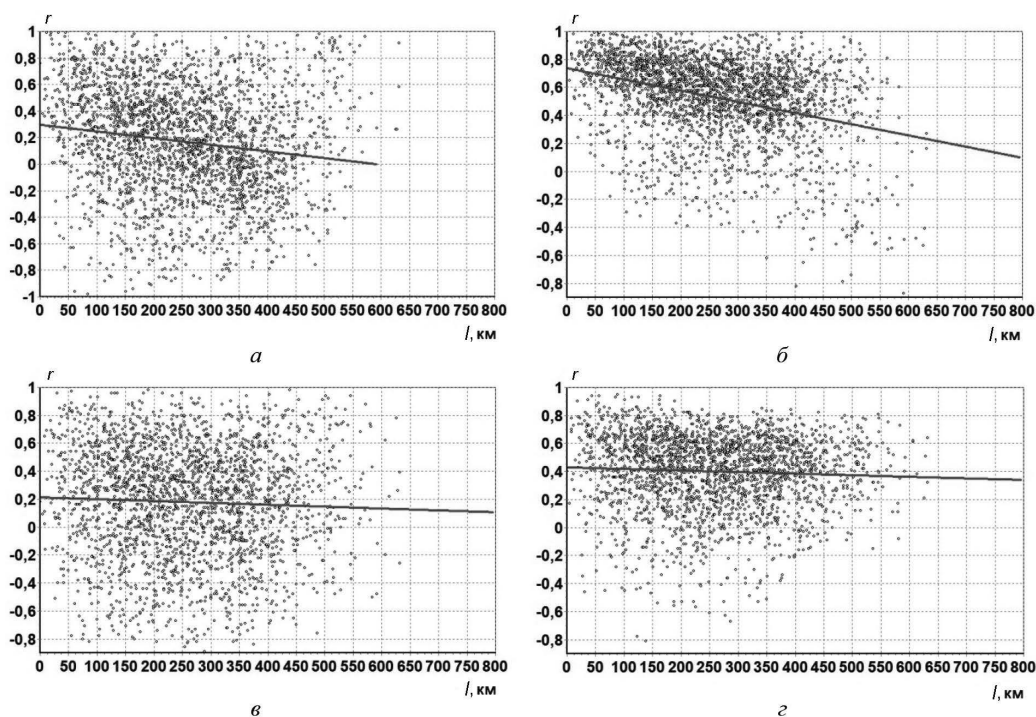


Рис. 4. Пространственные корреляционные функции уровня воды рек Беларуси для маловодных периодов: *a* – среднегодовой уровень; *б* – максимальный уровень; *в* – минимальный уровень периода открытого русла; *г* – минимальный уровень зимнего периода

При анализе полученных значений наименьшего и наибольшего количества гидрометрических постов наблюдений за уровнем воды до современных климатических изменений и после можно заключить, что наименьшее количество гидрологических постов наблюдений за среднегодовым значением уровня воды в реках Беларуси увеличилось почти в 2 раза, а наибольшее уменьшилось. Минимальное количество станций наблюдения за максимальным уровнем воды уменьшилось на 10 станций. Количество гидрометрических постов наблюдений за минимальным уровнем периода открытого русла и зимнего периода равно 58 и 48 соответственно.

Далее было исследовано оптимальное количество станций наблюдений за уровнем воды в реках Беларуси в многоводные и маловодные периоды, когда уровень воды соответственно выше и ниже среднегодового. Пространственные корреляционные функции уровня воды рек для маловодных и многоводных периодов представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Значения репрезентативного, градиентного и корреляционного критериев для маловодных и многоводных периодов исследуемых рядов приведены в табл. 4.

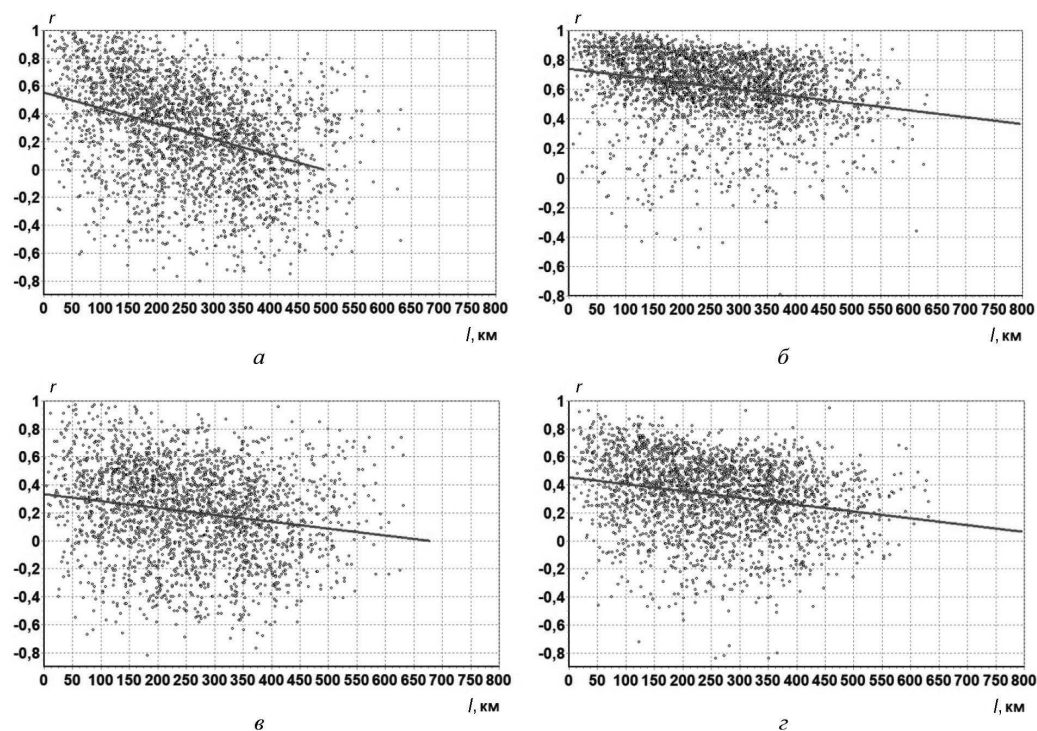


Рис. 5. Пространственные корреляционные функции уровня воды рек Беларуси для многоводных периодов: *а* – среднегодовой уровень; *б* – максимальный уровень; *в* – минимальный уровень периода открытого русла; *г* – минимальный уровень зимнего периода

Т а б л и ц а 4. Значения критериев для маловодных и многоводных периодов

Период	Уровень воды	Значения критериев, км ²		
		$A_{\text{репр}}$	$A_{\text{град}}$	$A_{\text{корр}}$
Маловодный	Среднегодовой	374	4565	72
	Максимальный	735	3891	141
	Минимальный открытого русла	618	3473	385
	Минимальный зимний	618	4904	1404
Многоводный	Среднегодовой	374	8968	21
	Максимальный	920	5554	179
	Минимальный открытого русла	618	4998	49
	Минимальный зимний	618	5149	84

Значения наименьшего и наибольшего количества станций наблюдений за различными видами стока для маловодных и многоводных периодов приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Оптимальное количество гидрометрических постов для маловодных и многоводных периодов

Период	Уровень воды	Количество гидрометрических постов	
		Наименьшее	Наибольшее
Маловодный	Среднегодовой	45	2869
	Максимальный	53	1473
	Минимальный открытого русла	60	540
	Минимальный зимний	42	148
Многоводный	Среднегодовой	23	9877
	Максимальный	37	1159
	Минимальный открытого русла	42	4229
	Минимальный зимний	40	2471

Результаты в табл. 5 свидетельствуют о том, что в различные по водности периоды количество гидрологических постов наблюдений за уровнем воды соответствует имеющемуся количеству для всех видов стока. При этом количество станций в маловодные периоды больше, чем многоводные. Максимальное количество гидрологических постов больше имеющегося на сегодняшний день для всех видов уровня воды.

Заключение. Предпринята попытка исследования оптимального количества гидрологических постов наблюдения за значениями годового, максимального весеннего половодья, минимального периода открытого русла и минимального зимнего периода уровня воды в реках Беларуси. Проведенные исследования по оптимизации режимной гидрологической сети Беларуси позволили сделать

вывод об оптимальном количестве гидрологических постов на территории страны. Но в случае наблюдения за значениями среднегодового уровня воды количество существующих станций является минимально необходимым, а уменьшение их количества недопустимо. Исследования влияния потепления климата и начала активной антропогенной деятельности показали увеличение минимально необходимого количества гидрологических постов. При изучении маловодных и многоводных периодов различного уровня воды рек Беларуси установлено, что количество станций в маловодные периоды больше, чем многоводные. Полученные результаты в целом подтвердили выводы из [1], когда исследованию подлежали расходы воды рек Беларуси, и было установлено, что уменьшение количества гидрологических станций на территории Беларуси недопустимо.

Литература

1. *Логинов В. Ф., Волчек А. А., Волчек Ан. А., Парфомук С. И.* // Природопользование. Минск: ОДО «Тонпик», 2006. Вып. 12. С. 51–57.
2. *Карасев И. Ф.* // Труды ГГИ. 1968. Вып. 164. С. 3–36.
3. *Коваленко В. В., Пивоварова И. И.* Оптимизация режимной гидрологической сети на основе стохастической модели формирования речного стока. СПб.: РГГМУ, 2000. – 43 с.
5. *Волчек А. А.* Гидрологические расчеты: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2021. – 418 с.
4. *Гайдукова Е. В., Хаустов В. А.* // Исследовано в России. 2004. С. 1499–1510.
6. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168–2009(02250). Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.

A. A. VOLCHAK, S. I. PARFOMUK, D. A. SHPOKA

OPTIMIZATION OF THE HYDROMETRIC STATIONS AMOUNT FOR OBSERVATION ON WATER LEVELS ON THE RIVERS OF BELARUS

Summary

Currently, a couple of gauging stations for monitoring the water levels in rivers have been closed on the territory of Belarus. There are several reasons for the closure of stations: reduced funding, failure of hydrometric equipment, as well as the achieved satisfactory hydrological knowledge of the territory. The studies carried out to optimize the regime hydrological network of Belarus made it possible to make a conclusion about the optimal amount of hydrological posts on the territory of the country. But in the case of monitoring the values of the average annual water levels the amount of existing stations is the minimum necessary and a decrease in their amount is unacceptable.