

3. Изменения климата Беларуси и их последствия / В.Ф.Логинов, Г.И.Сачок и др. / Под общ. Ред. В.Ф.Логинова.-Мн.: ОДО «Тонпик», 2003.-330с.
4. Мешик О.П., Валуев В.Е. Трансформация режима выпадения атмосферных осадков на территории Беларуси // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика.-2005.-№2(33).-С.3-6.
5. Методические указания по тепловоднобалансовым расчетам в гидромелиоративных целях с применением ЭВМ / В.Е.Валуев, А.А.Волчек, Г.В.Фолитар.-Брест: Брестский инженерно – строительный институт, 1987.-42с.
6. Мешик О.П. Исследование и моделирование инфильтрационного питания грунтовых вод на территории Белорусского Полесья // «Вестник БПИ – Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология», №2, 2000.-С.13-17.

УДК 550.34 (476)

Волчек Ан.А.

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ СТОКУ ВОДЫ

Введение

В настоящее время проблема наводнений и методов их прогнозирования является актуальной для многих стран, в том числе и для Беларуси. Объективная оценка максимальных расходов воды весеннего половодья позволит уже на стадии проектных проработок снизить возможные ущербы от наводнений. Изменения климата наложили свой отпечаток и на характер весенних половодий. Все это требует анализа условий формирования максимальных расходов воды, выделение однородных районов и разработки методики прогнозирования. Кроме того, накоплен богатый материал наблюдений за максимальными расходами воды и требует анализа. Поэтому выделение районов с генетически однородными условиями формирования стока, заключающееся в разделении изучаемых объектов на отдельные группы, представляет значительный интерес.

В середине прошлого столетия выполнено районирование территории Беларуси по величине годового стока [1], выделено 6 гидрологических районов, приуроченных к бассейнам основных рек. Вопросам районирования территории Беларуси по максимальному стоку весеннего половодья уделено гораздо меньше внимания.

В настоящей работе предпринята попытка выполнить районирование территории Беларуси по условиям формирования и характеру колебаний максимальных расходов воды весеннего половодья различными методами.

Исходные данные и методика исследования

При районировании территории помимо гидрологических характеристик также необходимо учитывать физико-географические факторы и геологические особенности территории, предусматривать деление территории по признакам сходства и различию водных объектов, направленность гидрологических процессов.

Исходными данными послужили максимальные расходы воды весеннего половодья по 120 речным створам за период инструментальных наблюдений. Выбор створов осуществлялся с учетом равномерного распределения по территории Беларуси. Ограничения на размер водосбора не накладывались. Для районирования по синхронности многолетних колебаний и по цикличности колебаний был принят 50-летний период – с 1951 по 2000 гг. включительно. В результате анализа в районировании этими методами использовалось 85 гидрологических створов. При районировании с использованием пространственных корреляционных функций (ПКФ) использовались все 120 гидрологических створов.

Пропущенные и искаженные данные были восстановлены с помощью программного комплекса «Гидролог».

Районирование по синхронности многолетних колебаний максимального стока

Методика объединения гидрологических створов в районы основана на построении матрицы парных коэффициентов корреляции, полученной в результате пространственного корреляционного анализа [2, 3].

В первую очередь корреляционная матрица рассчитывалась для створов с площадью водосбора, превышающей 4000 км², что позволило определить предварительные границы для предполагаемых районов. После чего парные коэффициенты корреляции были рассчитаны для 85 створов с целью детального уточнения границ.

Объединение гидрологических створов в один район осуществлялось при парном коэффициенте корреляции, превышающем критический уровень, равный 0,50.

Районирование территории по цикличности колебания максимального стока

Объединение гидрологических створов в однородные районы основывалось на анализе сходства изображений спектральной плотности максимальных расходов воды [4]. Спектральная плотность рассчитывается для всех гидрологических створов за одинаковый интервал времени по формуле [5]

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^m \lambda(\tau) r(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi T$ – круговая частота; T – период; m – максимальный сдвиг при оценке ординат автокорреляционной функции; $\lambda(\tau)$ – сглаживающая функция; $r(\tau)$ – автокорреляционная функция.

В качестве сглаживающей функции $\lambda(\tau)$ применялось корреляционное окно Наттола [5]

$$\lambda(\tau) = \sum_{k=0}^3 a_k \cos\left[\frac{\pi k \tau}{m}\right], \quad (2)$$

где a_k – весовые коэффициенты ($a_0 = 0,364$; $a_1 = 0,489$; $a_2 = 1,137$; $a_3 = 0,011$).

Окно Наттола использовалось для упрощения выделения типовых спектров, т. к. его применение позволяет снизить величину шумовой компоненты и получить сглаженный спектр.

Максимальный по длительности период, выделяемый на спектре, не должен превышать 1/3 длины ряда. Уровень значимости пиков назначался из нулевой гипотезы H_0 : гидрологический ряд представляет собой «белый шум». Доверительный интервал [6] для выборочного спектра в этом случае определяется выражением

Волчек Анастасия Александровна, ассистент каф. сельскохозяйственных гидротехнических мелиораций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

$$\frac{\chi_{1-\alpha}^2}{\nu 2\pi} < S^* < \frac{\chi_{\alpha}^2}{\nu 2\pi} \quad (3)$$

где χ^2 – ордината распределения Пирсона; ν – число степеней свободы; $\alpha = 5\%$ – уровень значимости.

Число степеней свободы [3] для окна Наттола при длине ряда n и максимальном сдвиге m определяется по следующей формуле

$$\nu = \frac{5,5n}{m} \quad (4)$$

Районирование с помощью пространственных корреляционных функций

Проверка нуль-гипотезы H_0 об однородности ПКФ осуществляется с помощью преобразования Фишера:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} + \frac{r}{2(n-1)}, \quad (5)$$

где r – парный коэффициент корреляции, n – количество совместных лет наблюдений.

Это преобразование дает хорошие результаты даже при небольшом числе совместных лет наблюдений и высоких значениях r , а выборочные значения Z распределены по нормальному закону с дисперсией [7]:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}} \quad (6)$$

Далее рассчитывается количество точек, попавших в диапазон $\pm\sigma_z$; $\pm 2\sigma_z$; $\pm 3\sigma_z$, которое сопоставляется с теоретическими вероятностями для нормального закона распределения.

Нуль-гипотеза не опровергается и ПКФ считается однородной, если эмпирические и теоретические вероятности оказываются близкими. В противном случае, когда имеет место существенное расхождение между эмпирическими и теоретическими вероятностями, нулевая гипотеза опровергается и признается альтернативная гипотеза о неоднородности эмпирической ПКФ. В этом случае исходное поле стока уменьшается.

Обсуждение результатов

Районирование по синхронности многолетних колебаний максимального стока

При разделении территории на районы учитывались физико-географическое и ландшафтное районирование Беларуси [8], а также положение водоразделов бассейнов рек страны. Территория Беларуси с выделенными районами синхронных колебаний максимального стока приведена на рис. 1.

В результате проведенных исследований можно выделить пять районов на территории Беларуси в зависимости от синхронности многолетних колебаний максимального стока. Первый выделенный район включает в себя 11 створов бассейна реки Припяти – Припятский район (южный). Неманский район (район № II) содержит 21 изучаемый створ, а III район (северный или Западно-Двинский) – 12 створов притоков 3. Двины. Вилейско-Березинский район (район № IV) включает 25 исследуемых створов. Пятый район (Днепровский) содержит 16 створов бассейна Днепра.

В табл. 1 представлены средние коэффициенты корреляции внутри каждого из выделенных районов и средние коэффициенты корреляции с остальными районами республики.

Таблица 1. Средние районные и межрайонные коэффициенты корреляции

Номер района	I	II	III	IV	V
I	0,67	0,58	0,49	0,51	0,57
II		0,65	0,54	0,60	0,62
III			0,76	0,72	0,69
IV				0,74	0,70
V					0,77

Средние значения внутрирайонных коэффициентов корреляции изменяются в пределах от 0,65 до 0,77, что говорит о высоком уровне синхронности колебаний максимального стока для каждой группы выделенных в отдельный район створов. Средние значения межрайонных корреляционных коэффициентов не превышают значений внутри района, что говорит о корректном выделении районов.

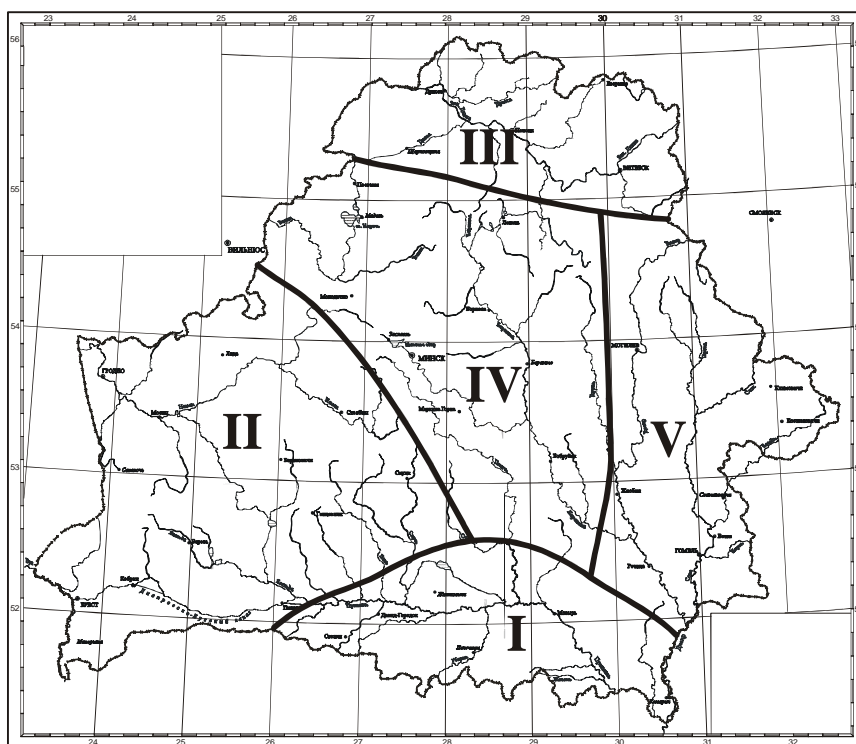


Рис. 1. Районы синхронных колебаний максимального стока весеннего половодья территории Беларуси

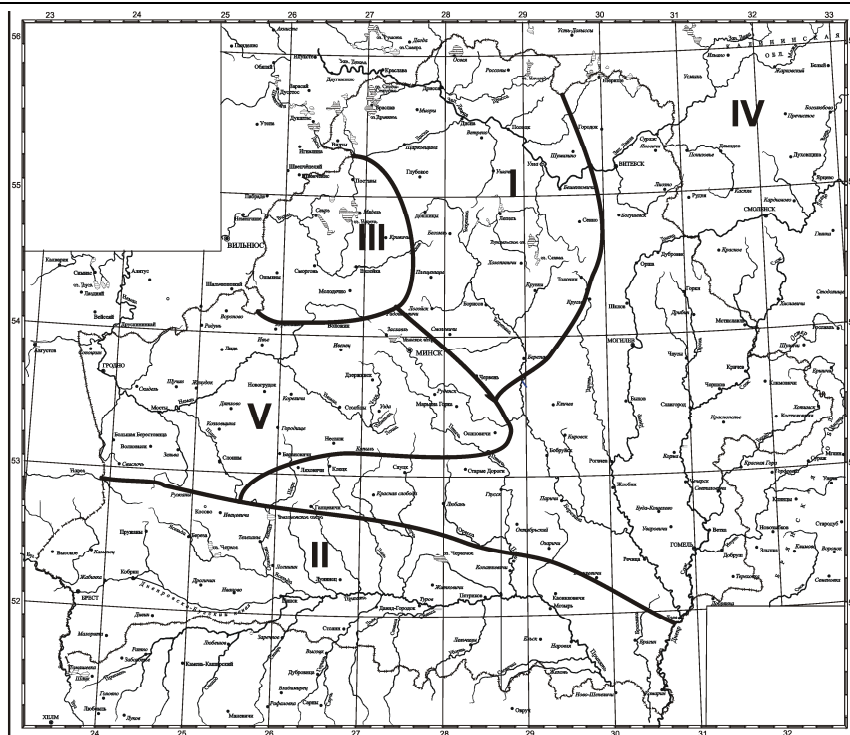


Рис. 2. Схема гидрологически однородных районов по цикличности для территории Беларуси

Районирование территории по цикличности максимального стока

Как показали исследования, в пределах Беларуси можно выделить 5 районов (рис. 2). При проведении границ районов помимо очертаний спектров учитывалось положение водоразделов и гидрографические особенности речных систем [8]. Первая группа спектров имеет значимую трехлетнюю гармонику, к этому району относятся части бассейнов Западной Двины и Березины. Она обнаружена у 12 из 85 исследуемых створов. Типичным представителем этой зоны является спектр временного ряда максимальных расходов воды р. Улла – с. Промыслы (рис. 3).

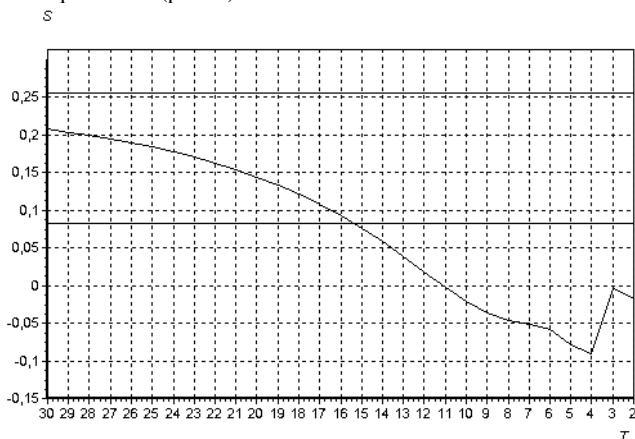


Рис. 3. Типовой для I района спектр временных рядов максимального стока р. Улла – с. Промыслы.

Для второго района характерно наличие значимого пика на периоде 4-го года. Такой спектр характерен 12 створам бассейнов Припяти, Западного Буга и части Немана. Типичным представителем этой зоны является спектр р. Припять – г. Мозырь (рис. 4).

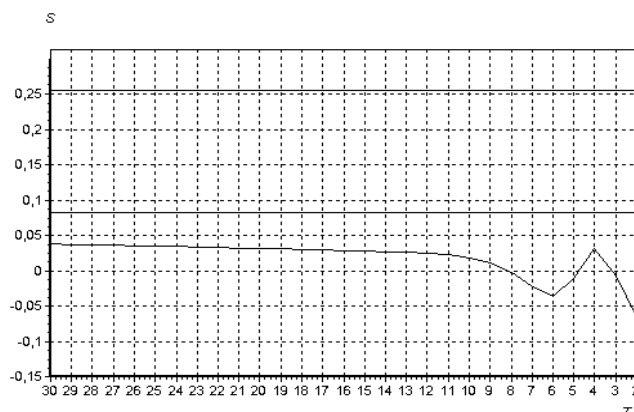


Рис. 4. Типовой для II района спектр временных рядов максимального стока р. Припять – г. Мозырь.

Третьему (охватывает бассейн Вилии) району присущи шестилетние гармоники. Типичный спектр для этого района приведен на рис. 5, соответствующий р. Ошмянка – с. Великие Яцны.

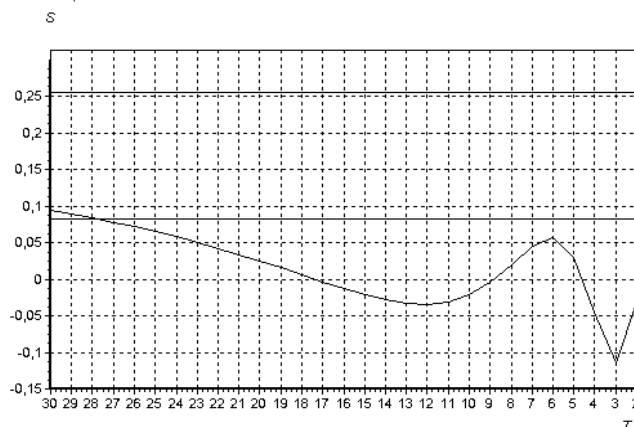


Рис. 5. Типовой для III района спектр временных рядов максимального стока р. Ошмянка – с. Великие Яцны.

Наибольшим по площади является IV район, который охватывает бассейн Днепра и часть бассейна Западной Двины. Для этого района присущи значимые семилетние периоды для 23 створов рек Беларуси. Типичный спектр для этого района приведен на рис. 6, соответствующий р. Днепр – г. Речица.

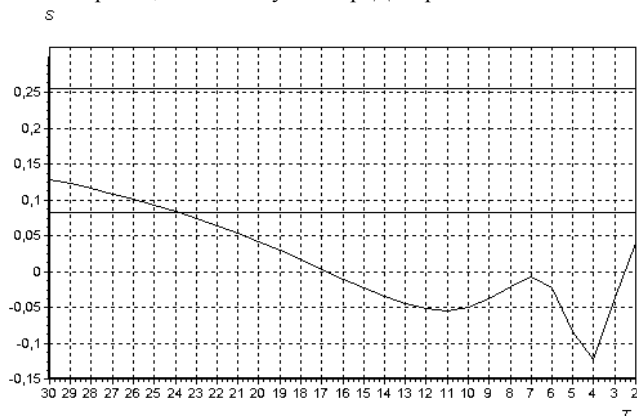


Рис. 6. Типовой для IV района спектр временных рядов максимального стока р. Днепр – г. Речица.

Пятый выделенный район включает бассейн Немана и отмечается значимыми пиками на периоде 8 лет. К этому району относятся 13 исследуемых створов. Типичный спектр для этого района приведен на рис. 7, соответствующий р. Неман – г. Гродно.

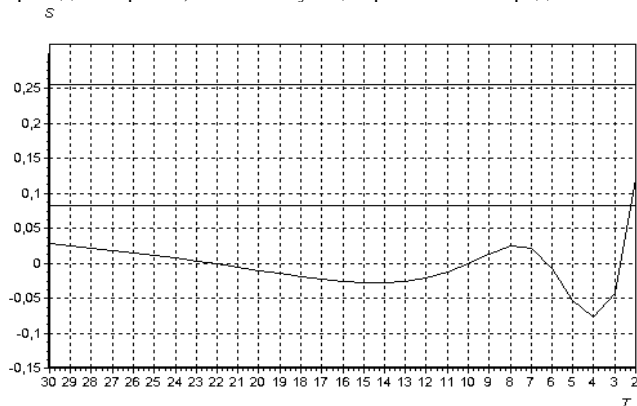


Рис. 7. Типовой для V района и спектр временных рядов максимального стока р. Неман – г. Гродно.

Районирование территории Беларуси способствовало проведению групповой оценки основных статистических характеристик. Средние значения норм максимального стока (\bar{q}), коэффициенты вариации (C_v), отношения коэффициентов асимметрии и вариации (C_s/C_v), а также коэффициенты автокорреляции ($r(1)$) для водосборов пяти районов Беларуси приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные статистические характеристики рядов максимального стока выделенных районов

Номер района	$\bar{q}, л/(с \cdot км^2)$	C_v	C_s/C_v	$r(1)$
I	69,2	0,66	0,43	0,06
II	26,3	0,81	0,53	0,13
III	56,7	0,89	0,43	-0,01
IV	52,3	0,73	0,42	0,02
V	108,3	0,77	0,45	0,03

Наименьшее значение нормы максимального стока и наибольшее значение коэффициента автокорреляции имеет II район, где произошли крупные мелиоративные работы по осушению болот. Наименьший коэффициент автокорреляции приходится на III район.

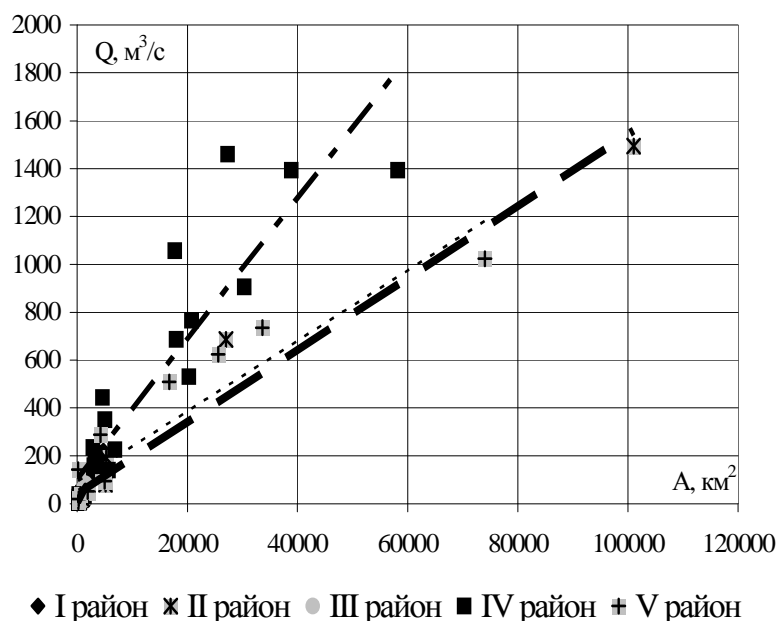
Норма стока весеннего половодья рек изменяется незначительно и определяется площадью водосбора (A). Таким образом, для определения нормы стока неизученных рек помимо карт изолиний, приведенных в пособиях СНиП [9], можно рекомендовать зависимости $Q = f(A)$, как это показано на рис. 8. Полученная зависимость описывается следующей формулой:

$$Q = \alpha \cdot A + \beta, \quad (7)$$

где α, β – эмпирические коэффициенты, зависящие от района, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Параметры уравнения (7)

Номер района	α	β	Коэффициент корреляции
I	0,0427	3,6532	0,97
II	0,0150	41,1010	0,98
III	0,0449	10,8360	0,96
IV	0,0294	103,1000	0,91
V	0,0147	91,3930	0,94
Вся территория	0,0191	0,7528	0,87



◆ I район * II район ● III район ■ IV район + V район

Рис. 8. Зависимость максимального расхода воды весеннего половодья от площади водосбора для I, II, III, IV и V района

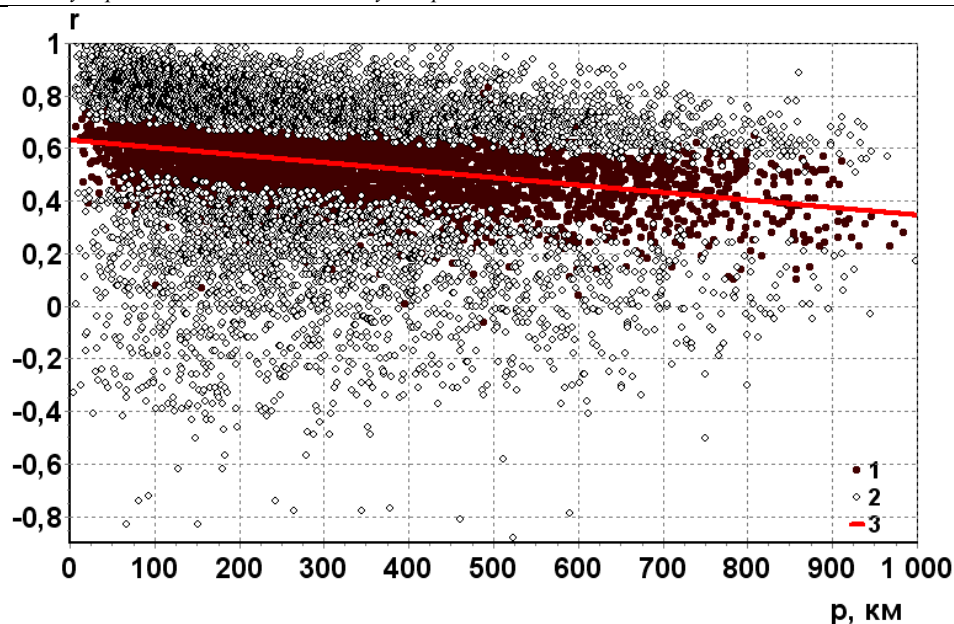


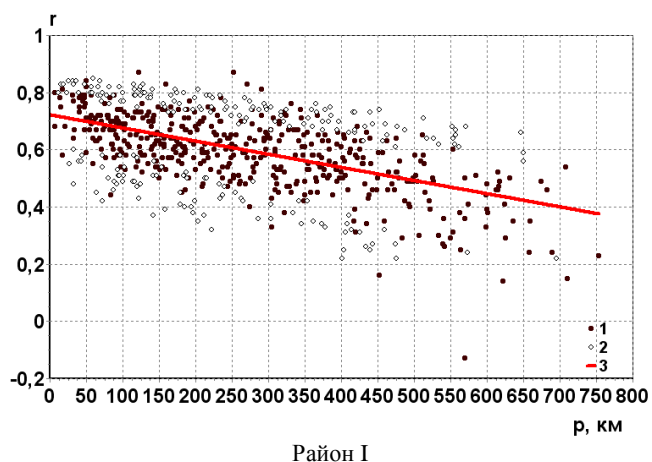
Рис. 9. ПКФ максимального стока рек Беларуси (1 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне $\pm\sigma_z$; 2 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне $\pm 2\sigma_z$; 3 – линия регрессии $r = f(\rho)$)

Сток рек выделенных районов отличается также мощностью короткопериодных составляющих в спектре. Для всех районов характерен «красный шум».

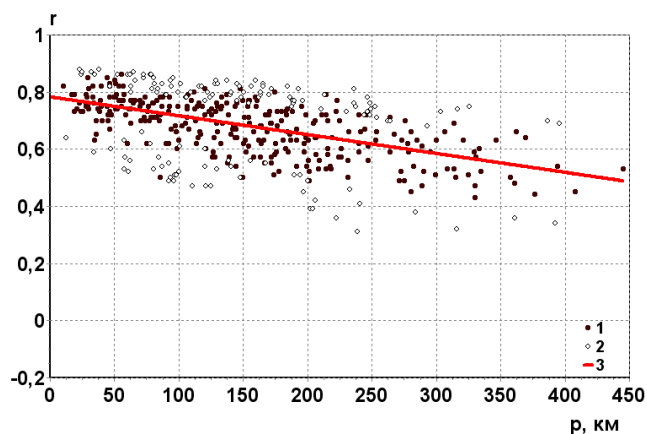
Районирование с помощью пространственных корреляционных функций

В первую очередь ПКФ была рассчитана по 6880 парному коэффициенту корреляции, полученным по всем 120 градациям наблюдений. Среднее число совместных лет наблюдений при расчете парных коэффициентов корреляции составляло не менее 20 лет. Оценка однородности ПКФ максимального стока рек Беларуси показала, что рассматриваемая функция неоднородна, как это показано на рис. 9.

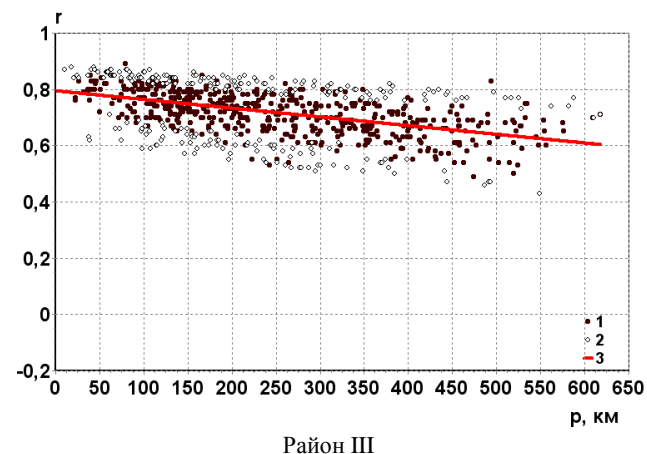
В связи с тем, что исходное поле оказалось неоднородным, оно было разделено на более мелкие районы. В нашем случае для территории Беларуси выделено 3 однородных района, ПКФ которых приведены на рис. 10.



Район I



Район II



Район III

Рис. 10. ПКФ максимального стока однородных районов Беларуси (1 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне $\pm\sigma_z$; 2 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне $\pm 2\sigma_z$; 3 – линия регрессии $r = f(\rho)$)

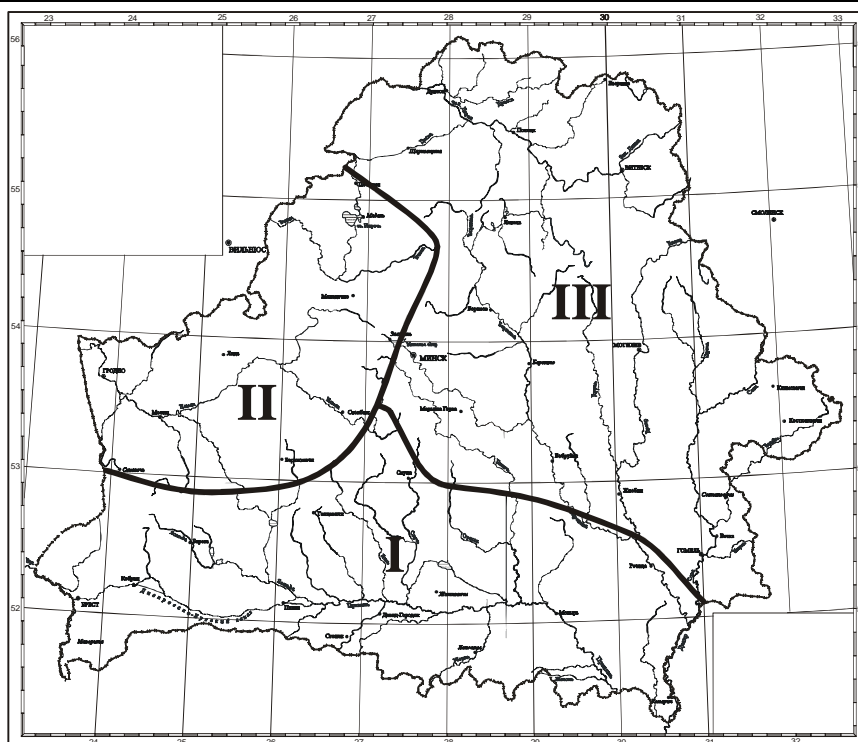


Рис. 11. Однородные районы по многолетним колебаниям максимального стока рек Беларуси

Для выделенных районов получены зависимости $r = f(\rho)$, которые можно представить следующей формулой:

$$r = -\alpha \cdot \rho + \beta, \quad (8)$$

где α , β – эмпирические коэффициенты, представленные в табл. 4.

Таблица 4. Параметры уравнения (8)

Район	$\alpha \cdot 10^{-2}$	β	Коэффициент корреляции
I	-0,046	0,72152	0,53
II	-0,066	0,78223	0,50
III	-0,031	0,79415	0,46

Первый выделенный район включает в себя 42 речных створа бассейнов Западного Буга, Припяти и часть бассейна Днепра. Второму району соответствуют 34 водосбора Немана. Район III содержит 44 речных створа Западной Двины и Днепра, в том числе 4 створа бассейна Припяти.

Районирование территории Беларуси в зависимости от характера многолетних колебаний максимального речного стока весеннего половодья приведено на рис. 11.

Выводы

Выполнена первая попытка комплексного районирования территории Беларуси по максимальным расходам воды весеннего половодья по трем критериям: по синхронности многолетних колебаний, по цикличности колебания на основе анализа сходства спектральной плотности, по однородности пространственных корреляционных функций. Результаты трех видов районирования представлены на соответствующих картах-схемах. В результате исследования установлена однородность формирования максимальных расходов воды весеннего половодья для бассейна Припяти и Немана. Схожие

очертания имеют II и IV районы, выделенные на основе цикличности колебаний, и I и III районы, установленные по ПКФ, соответственно.

Особенности выделенных генетически однородных районов необходимо учитывать при разработке математических моделей расчета и прогнозирования стока рек Беларуси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеоздат. – Т.5. – ч.1., 1966. – 718 с.
2. Сакович В. М. Районирование территории Северо-Запада Карелии по синхронности многолетних колебаний минимального летне-осеннего стока // Водные ресурсы Северо-Западного региона России. – С.–Пб., 1999. – С. 29 – 31.
3. Исследование и расчеты речного стока/ Под ред. В.Д. Быкова. – М.: Издательство московского университета, 1981. – 228 с.
4. Дружинин В. С., Сикан А. В. Районирование территории Северо-Запада РФ по условиям формирования годового стока // Водные ресурсы Северо-Западного региона России. – С.–Пб., 1999. – С. 24 – 29.
5. Марпл - мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. Кайсл Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных/ Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 138 с.
7. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 424 с.
8. Марцинкевич Г.И., Клицунова Н.К., Счастливая И.И., Якушко О.Ф. Теоретические проблемы и результаты комплексного географического районирования территории Беларуси// Выбранные научные работы БГУ. У сямі тамах. – Том 7. – Мн.: БГУ, 2001. – С. 332 – 356.
9. Пособие к строительным нормам и правилам. ПН-98 к СНиП 2.01.14-83 Определение расчетных гидрологических характеристик. Пособие к СНиП 2.01.14-83. – Мн.: РУП «Минсктиппроект», 2000. – 174 с.