

Бассейновый подход к гидрологическому районированию Беларуси как фактор оптимального управления водными ресурсами

А.А. Волчек¹  , П.С. Лопух² 

 Volchak@tut.by, lopuch49@mail.ru

¹Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Речной бассейн – природная среда формирования стока и основной источник формирования водных ресурсов. В связи с изменяющимися природно-климатическими условиями и увеличением антропогенной нагрузки вопросы колебания стока требуют детального исследования с целью прогнозирования состояния водных ресурсов. **Методы.** Исходными данными послужили материалы наблюдений Департамента гидрометеорологии Минприроды Республики Беларусь по действующим гидрологическим постам. **Результаты.** Комплексный анализ формирования стока рек Беларуси с выделением однородных районов по синхронности и цикличности, положенный в основу гидрологического районирования, позволил дать объективную оценку водным ресурсам страны с учетом современных климатических изменений и антропогенных воздействий, создать современную карту среднегодового стока и его изменчивости. Построенная уточненная карта модуля стока рек Беларуси может быть использована при определении характеристик стока в случае отсутствия данных наблюдений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Республика Беларусь, гидрологическое районирование, сток рек, водные ресурсы.

Для цитирования: Волчек А.А., Лопух П.С. Бассейновый подход к гидрологическому районированию Беларуси как фактор оптимального управления водными ресурсами // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 4. С. 48-81. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_1.

Дата поступления 26.05 2023.

BASIN APPROACH TO HYDROLOGICAL ZONING OF BELARUS AS A FACTOR OF OPTIMAL WATER RESOURCES MANAGEMENT

Aleksandr A. Volchek¹  , Petr S. Lopukh² 

 Volchak@tut.by, lopuch49@mail.ru

¹Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

²Belarus State University, Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Relevance. A river basin is the natural environment of runoff formation and the main source of water resources formation. Due to changing natural/climatic conditions and increasing of anthropogenic load the issues of the runoff fluctuations, require more detailed studying in order to forecast the water resources state. **Methods.** Observation materials of Department

© Волчек А.А., Лопух П.С., 2023

of Meteorology of the Ministry of Nature of the Republic of Belarus from currently active hydrological stations served as initial data. **Results.** Integrated analysis of runoff formation of the rivers of Belarus with separation of homogenous areas in terms of synchronism and cyclic recurrence as a basis for hydrological zoning would enable to give an objective assessment of water resources of the country with taking into account current climatic changes and anthropogenic impacts. This enables to compose a contemporary map of average annual runoff and its variability. The resulted elaborated map of the Belarus rivers' runoff module can be used in determination of the runoff characteristics in case of the absence of observation data.

Keywords: Republic of Belarus, hydrological zoning, river runoff, water resources.

For citation: Volchek A.A., Lopukh P.S. Basin approach to hydrological zoning of Belarus as a factor of optimal water resources management. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 4. P. 48-81. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_1.

Received 26.05 2023.

ВВЕДЕНИЕ

Речной бассейн является природной средой формирования стока, который служит основным источником водных ресурсов. Главными отличиями речного стока от других видов природных ресурсов являются его непрерывное возобновление в процессе круговорота воды и колебаний величины стока. В настоящее время территория Беларуси достаточно изучена в гидрологическом отношении, однако вопросы колебания стока во времени требуют детального исследования с целью прогнозирования изменения стока рек в будущем.

Речной сток в основном формируется под воздействием природно-климатических факторов, однако в последнее время антропогенные воздействия становятся все более существенными и в ряде случаев соизмеримы с естественными процессами формирования стока. Мощным антропогенным фактором, оказывающим значительное влияние на речные экосистемы, являются крупномасштабные мелиорации, начало которых приходится на середину 1960-х годов. При этом южная часть Беларуси наиболее сильно подверглась мелиоративным воздействиям, что не могло не сказаться на речном стоке. Кроме того, существенное влияние на сток оказывает наблюдаемое глобальное потепление климата. В последние годы на территории Беларуси отмечен рост среднегодовой температуры воздуха, уменьшение суммарных атмосферных осадков, изменение направления и скорости ветра.

В настоящее время все актуальнее становится проблематика гидрологического районирования территории. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что при нынешней слабо развитой гидрометрической сети определение основных гидрологических характеристик, как правило, осуществляется при отсутствии данных наблюдений. В этом случае установление общих закономерностей функционирования стока, условий его формирования и режима, а также распределения по территории в том или ином районе особенно значимо. Не меньшее значение имеет выделение районов с генетически однородными условиями формирования стока.

По классификации Б.Д. Зайкова, реки Беларуси относятся к группе рек с весенним половодьем восточно-европейского типа, которая характеризуется

Верхнеднепровский гидрологический район включает бассейны рек Днепра, его правого притока Друти и левого притока Сожа. Его выделение обусловлено высокой водностью реки, сложным гидрологическим режимом, связанным с ландшафтными условиями формирования стока в пределах Восточно-Белорусской провинции, Предполесской и Полесской провинций.

В средней и нижней частях водосбор Днепра отличается сложным гидрологическим режимом, нехарактерным для Полесской низменности. В то же время эти части соответствуют центральному гидрологически однородному району, что дает основание выделить их в южный Верхнеднепровский гидрологический подрайон.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Общее количество рек, протекающих по территории Беларуси, составляет около 20,8 тыс. Около 45 % рек относится к бассейну Балтийского моря – это реки водосборов Западной Двины, Немана и Западного Буга, 55 % приходится на реки бассейна Черного моря, к которому относятся водосборы Днепра, Припяти, Березины и Сожа [1]. В Беларуси проходит водораздел между Днепром, Двиной и Неманом, именно здесь в древние времена проходил великий торговый путь «из варяг в греки».

Густота речной сети Беларуси составляет 0,40–0,44 км/км². Бассейны рек: Днепр – Припять с притоками Ясельда, Случь, Горынь, Птичь, Ствига, Уборть, Стыр; Березина; Сож с притоками Ипуть, Проня, Беседь; Друть; Западная Березина – Дисна, Дриса, Уса; Неман – Западная Березина, Щара; Западный Буг – Мухавец, Нарев, Лесная; Бассейн Вилии.

Все крупные реки являются трансграничными. Днепр и Западная Двина берут начало в России, протекают по территории Беларуси и несут свои воды, соответственно, на Украину и в Латвию. Припять из Украины, пройдя территорию Беларуси, опять возвращается в Украину. Западный Буг, вытекающий из Украины, служит государственной границей Беларуси и Польши, Вилия и Неман из Беларуси текут в Литву.

Течение в реках в основном медленное, осложненное перекатами и редкими, незначительными по размерам порогами. Характер течения – равнинный. Питание рек – смешанное (дождевое, снеговое, подземными водами).

Водный режим рек Беларуси определяется весенним половодьем и сроками замерзания. Высота весеннего половодья над обычным (меженным) уровнем воды на крупных реках достигает 8,6–12,8 м, на средних и малых реках – примерно вдвое ниже. Разлив рек продолжается 30–120 суток. Реки замерзают на 80–140 суток со второй декады ноября. В суровые зимы отдельные малые реки могут промерзнуть до дна на срок до 4,5 месяца, а вот в мягкие зимы ледостава на реках не бывает. Вскрываются белорусские реки в конце марта, самое позднее – в первой половине апреля. Наиболее полноводны реки в мае и даже в июне. Весеннее половодье сменяется летне-осенней меженью, когда уровни воды достигают наиболее низких значений, но к октябрю-ноябрю реки снова наполняются, течение становится быстрее.

Исходными данными для исследования послужили материалы наблюдений Департамента гидрометеорологии Минприроды Республики Беларусь за различными видами стока по действующим гидрологическим постам Беларуси за период инструментальных наблюдений по 2020 г. включительно, опубликованные в материалах государственных кадастров. На сегодняшний день на территории Беларуси функционирует 122 станции наблюдения за стоком, но в исследовании использованы данные 97 постов с наиболее продолжительными и непрерывными периодами наблюдений. В отдельных разделах проанализированы ряды многолетних колебаний максимальных расходов весеннего половодья, минимальных летне-осенних и минимальных зимних расходов воды рек Беларуси. При необходимости непрерывных интервалов данных за начало расчетного периода принимался 1945 г. – период послевоенного восстановления наблюдений на гидрологической сети страны.

Методика оптимизации режимной гидрологической сети

Метод оптимизации гидрологической сети основан на определении трех критериев, оказывающих влияние на оптимальное количество станций наблюдений за стоком [2].

Первый – это критерий репрезентативности $A_{перп}$. Этот критерий вытекает из условия зональности изменения стока. 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 гидрологическим постом не должна быть слишком малой, чтобы азональные факторы не приобрели степень преобладающих над общими зональными закономерностями формирования стока [3]. Таким образом, репрезентативный критерий $A_{перп}$ ограничивает $A_{опт}$ – оптимальную площадь, приходящуюся на один гидрологический пост, снизу, т. е. $A_{перп} < A_{опт}$.

Вторым критерием является градиентный критерий $A_{град}$, определяемый из следующей формулы [2]:

$$A_{град} \geq \frac{8\sigma_0^2}{(gradQ)^2} (\bar{Q})^2, \quad (1)$$

где σ_0 – погрешность определения нормы стока;

$gradQ$ – градиент стока;

\bar{Q} – средняя норма стока.

Погрешность определения нормы стока равна [3]:

$$\sigma_0 = \frac{C_v}{\sqrt{N}}, \quad (2)$$

где C_v – коэффициент вариации стока;

N – количество лет наблюдений.

С помощью градиентного критерия устанавливается минимальная площадь, приходящаяся на один гидрологический пост. Он определяется физико-географическими условиями местности и характеризует надежность информации о пространственно-временных изменениях колебаний речного

стока. Располагать гидрологические посты чаще, чем требует этот критерий, экономически нецелесообразно, т. е. $A_{град} \leq A_{опт}$.

Третий критерий – корреляционный $A_{корр}$. 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 речного стока. Корреляционный критерий определяется следующим образом [2]:

$$A_{корр} \leq \frac{\sigma^4}{\alpha^2 C_v^2}, \quad (3)$$

где σ – относительная случайная ошибка определения стока по гидрометрическим данным, в первом приближении равная 0,05;

$\alpha = 1/L_0$ (L_0 – радиус корреляции стока, т. е. расстояние, при котором пространственные корреляционные функции (ПКФ) проходит через ноль [4]).

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

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

$$A_{репр} < A_{град} \leq A_{опт} \leq A_{корр}. \quad (4)$$

Если приведенное выше соотношение между критериями не выполняется, то рекомендуется [2] при $A_{репр} < A_{корр} < A_{град}$ использовать соотношение $A_{корр} < A_{опт} < A_{град}$.

Оптимальное число режимных гидрологических станций для территории определяется по формуле:

$$N_{опт} = A/A_{опт}, \quad (5)$$

где A – общая площадь территории.

Методы гидрологического районирования территории

Выделяют два вида гидрологического картирования. К первому относится метод изолиний, основанный на непрерывном плавном изменении характеристик стока в пространстве. Второй вид картирования – это гидрологическое районирование, предполагающее постоянство характеристик гидрологического режима в пределах выделенных районов.

Районирование представляет собой выделение территориальных единиц, обладающих однородностью гидрологических характеристик водного режима, а также типичностью либо относительной однородностью водных объектов, которое состоит из нескольких этапов. На первом этапе вся территория разделяется на крупные районы, однородные по самому общему признаку, после чего выделенные районы делятся на подрайоны по более частным признакам. По мере детализации районов повышается их гидрологическая однородность, а разница между характеристиками гидрологического режима, наоборот, уменьшается.

Выделяемые гидрологические районы уникальны в пространстве, т. е. обладают неповторимым сочетанием гидрологических явлений и процессов. Это

различие обусловлено тем, что при районировании территории рассматриваются не только конкретные условия формирования стока и характер гидрографической сети. При гидрологическом районировании, помимо гидрологических характеристик, также необходимо учитывать физико-географические факторы и геологические особенности территории, предусматривать разделение территории по признакам сходства и различия водных объектов, учитывать направленность гидрологических процессов.

Гидрологическое районирование позволяет систематизировать знания о гидрологических режимах отдельных территорий, разобраться в сложном многообразии гидрологических процессов и явлений, решать задачи по моделированию управляемого водного режима, проводить общую мелиоративную оценку земельного фонда.

Первоначально гидрологическое районирование осуществлялось на основе анализа физико-географических факторов. Такое районирование было выполнено М.Д. Семеновым-Тянь-Шанским (1925 г., 1933 г.) и В.И. Рутковским (1933 г.) [5]. Д.И. Кочерину (1932 г.) [6] принадлежит районирование территории по максимальному стоку с учетом климатических факторов, а Д.Л. Соколовскому (1937 г.) [7] – по модулям максимального стока весеннего половодья. В классификационной схеме М.И. Львовича (1938 г.) [8] реки разделялись на районы в зависимости от внутригодового распределения стока по сезонам. Районирование по форме гидрографа годового стока разработано Б.Д. Зайковым (1946 г.) [9]. К.К. Марков (1947 г.) [10] выполнил гидрологическое районирование, основанное на принадлежности бассейнов рек к различным орографическим областям. Районирование с учетом соотношений между элементами водного баланса выполнено В.А. Троицким (1948 г.) [11], а П.С. Кузину (1960 г.) [12] принадлежит гидрологическое районирование с учетом изменения элементов водного баланса. В последнее время гидрологическое районирование рассматривается в работах Л.М. Корытного (1991 г.) [13], В.С. Дружинина А.В. Сикана (1999 г.) [14], В.М. Саковича (2004 г.) [4] и др.

В настоящее время выполнено несколько видов районирования для территории Беларуси. Это физико-географическое и ландшафтное районирования [15], а также агроклиматическое районирование [16]. В середине прошлого столетия проведено районирование территории Беларуси по величине годового стока [17], выделено шесть гидрологических районов, приуроченных к бассейнам основных рек. Однако проблема гидрологического районирования, в частности, для территории Беларуси, еще не решена. Она остается одной из главных задач гидрологии, поэтому вопросы, связанные с районированием территории по различным характеристикам гидрологического режима, требуют дальнейшего изучения.

В настоящей работе использовано несколько методов гидрологического районирования территории. Методика объединения гидрологических створов в районы по синхронности колебаний годового стока основана на построении матрицы парных коэффициентов корреляции, полученной в результате пространственного корреляционного анализа [4, 18].

Методика районирования по условиям колебаний годового стока основана на анализе сходства изображений спектральной плотности среднегодовых расходов воды [14]. В зависимости от вида спектра территорию разделяют на районы. Спектральная плотность рассчитывается для всех гидрологических створов за одинаковый интервал времени по формуле [19]:

$$S(w) = \frac{1}{\pi} \int_0^m \lambda(\tau) r(\tau) \cos(w\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $w = 2\pi/T$ – круговая частота; T – период;

m – максимальный сдвиг при оценке ординат автокорреляционной функции;

$\lambda(\tau)$ – сглаживающая функция;

$r(\tau)$ – автокорреляционная функция.

В качестве сглаживающей функции $\lambda(\tau)$ применяется корреляционное окно Наттола [19]:

$$\lambda(\tau) = \sum_{k=0}^3 \alpha_k \cos[(\pi k \tau)/m], \quad (7)$$

где α_k – весовые коэффициенты ($\alpha_0 = 0,364$; $\alpha_1 = 0,489$; $\alpha_2 = 1,137$; $\alpha_3 = 0,011$).

Окно Наттола используется 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 назначается из нулевой гипотезы H_0 : гидрологический ряд представляет собой «белый шум». Доверительный интервал [20] для выборочного спектра в этом случае определяется выражением:

$$\frac{\chi^2_{1-\alpha}}{\nu 2\pi} < S^* < \frac{\chi^2_{\alpha}}{\nu 2\pi}, \quad (8)$$

где χ^2 – ордината распределения Пирсона;

ν – число степеней свободы;

$\alpha = 5\%$ – уровень значимости.

Число степеней свободы [19] для окна Наттола при длине ряда n и максимальном сдвиге m определяется по формуле:

$$\nu = \frac{5,5n}{m}. \quad (9)$$

В основу объединения гидрологических створов в районы с использованием ПКФ положено утверждение, что поля гидрометрических характеристик являются изменчивыми в пространстве и во времени. Детерминированно задать интересующие величины в каждой точке и в момент времени невозможно, поэтому гидрологическую величину рассматривают как случайную. Статистический подход требует отказа от отдельного рассмотрения индивидуальных свойств случайного поля. Анализируются лишь их статистические характеристики, которые позволяют установить общие особенности, присущие всему набору реализаций. Эти общие закономерности принято называть статистической структурой случайного поля.

На основе этого по сравнительно небольшому количеству данных можно судить о свойствах изучаемой гидрометрической характеристики в пределах большой территории. Для описания связи между значениями поля в различных точках наиболее употребляемыми являются такие характеристики статистической структуры как корреляционные, ковариационные и спектральные функции. В силу того, что данные функции однозначно связаны между собой и равно пригодны для описания статистической структуры, предпочтение отдано корреляционным функциям как более точным и универсальным, отличающимся меньшей зависимостью от изменений географического и сезонного характера.

Для однородных изотропных полей ПКФ зависит только от расстояния между точками, т. е.

$$r = f(\rho). \quad (10)$$

При этом ПКФ принимает одни и те же значения для любой пары точек с одинаковыми расстояниями (ρ), т. к. пары точек всегда могут быть совмещены друг с другом с помощью параллельного переноса, вращения и зеркального отображения.

После построения ПКФ как функции $r = f(\rho)$, в поле координат (r , ρ) строится зависимость парных коэффициентов корреляции годовых расходов воды от расстояний между центрами тяжести водосборов. Полученная линия регрессии $r = f(\rho)$ принимается за истинную зависимость, отвечающую природе пространственной корреляционной связности речного стока. Принималось, что отклонения эмпирических точек от линии регрессии обусловлены случайными флуктуациями выборочных данных [21]. Проверка нуль-гипотезы H_0 об однородности ПКФ осуществлялась с помощью преобразования Фишера:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} + \frac{r}{2(n-1)}, \quad (11)$$

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 [21]:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}. \quad (12)$$

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.

Принцип районирования заключается в объединении створов с однородными ПКФ в отдельные районы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация режимной гидрологической сети Беларуси

Количество станций наблюдений за стоком воды рек Беларуси в последнее время значительно сократилось. Существует несколько причин закрытия постов: снижение финансирования, выход из строя гидрометрического оборудования, а также достигнутая удовлетворительная гидрологическая изученность территории. Ввиду необходимости оптимизации существующей режимной гидрологической сети определено оптимальное количество станций наблюдений за разными видами стока рек Беларуси [22].

В первую очередь, было исследовано оптимальное количество гидрологических постов наблюдения за значениями годового стока рек Беларуси. Для нахождения репрезентативного критерия $A_{репр}$ использована методика, основанная на критерии однородности Стьюдента [23]. Проведенные исследования показали, что репрезентативная площадь, приходящаяся на один гидрологический пост наблюдения за величинами годового стока, для территории Беларуси составляет 374 км².

Градиентный критерий $A_{град}$ определяли, исходя из значений среднегодовых норм стока исследуемых рек и значений градиентов стока. Для нахождения параметров, входящих в формулу (1), были построены карты коэффициента вариации и модуля стока. Таким образом, рассчитанное значение градиентного критерия для территории Беларуси составило 1739 км².

Расчет корреляционного критерия $A_{корр}$ основан на нахождении радиуса корреляции стока L_0 . Для его определения была построена ПКФ годового стока $r(l)$, где r – коэффициент парной корреляции, l – расстояние между водосборами, представленная на рис. 2.

Радиус корреляции для территории Беларуси составил 688 км, а соответствующее значение корреляционного критерия $A_{корр}$ – 1218 км².

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

Если исходить из градиентного критерия, то общее число режимных стокowych постов для территории Беларуси равно $N_{опт} = A/A_{град} = 207600/1739 \approx 119$. Если исходить из корреляционного критерия, тогда оптимальное количество гидрологических станций наблюдения за значениями годового стока равно $N_{опт} = A/A_{корр} = 207600/1218 \approx 170$.

Дальнейшее исследование проводилось для экстремальных значений стока: максимального весеннего половодья, минимального летне-осеннего и минимального зимнего. Для максимального стока значение репрезентативного критерия составило 969 км², значение градиентного критерия $A_{град}$ – 3297 км². Радиус корреляции при построении ПКФ максимального стока рек Беларуси равен 1140 км (рис. 2). Значение корреляционного критерия $A_{корр} = 97$ км².

При исследовании минимальных видов стока были получены следующие результаты. Для минимального летне-осеннего стока: $A_{репр} = 363$ км², $A_{град} = 2812$ км², $A_{корр} = 847$ км². Для минимального зимнего стока значения репрезентативного, градиентного и корреляционного критериев, соответственно, равны 567, 2166 и 5154 км². При нахождении корреляционных критериев

$A_{корр}$ построены графики ПКФ минимального летне-осеннего и минимального зимнего стока рек Беларуси (рис. 2).

Значения наименьшего и наибольшего количества станций наблюдений за максимальными и минимальными видами стока приведены в табл. 1.

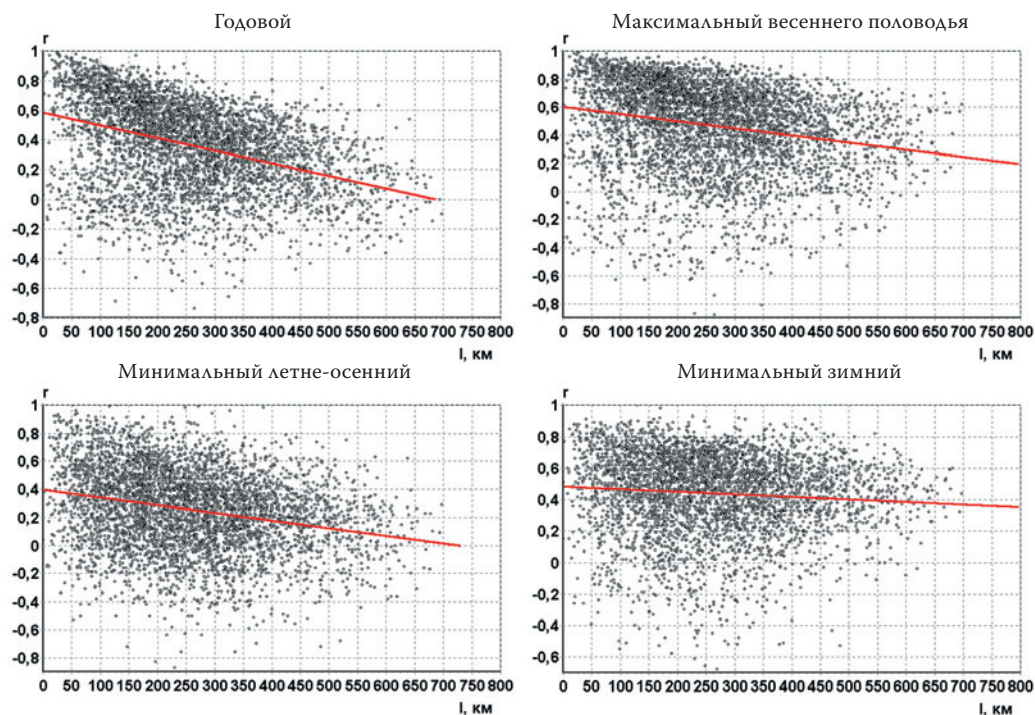


Рис. 2. ПКФ различных видов стока рек Беларуси.
Fig. 2. PKF of different kinds of runoff of the rivers of Belarus.

Таблица 1. Наименьшее и наибольшее количество гидрологических постов на территории Беларуси
Table 1. The least and the most number of hydrological stations on the territory of Belarus.

Количество гидрологических постов	Вид стока			
	годовой	максимальный	минимальный летне-осенний	минимальный зимний
Наименьшее	119	63	74	40
Наибольшее	170	2138	245	96

Существующее на сегодняшний день на территории Беларуси количество станций наблюдений за стоком, равное 122, достаточно для измерения максимального и минимального летне-осеннего видов стока. Для измерения минимального зимнего стока количество станций превышает максимально необходимое значение.

Значения наименьшего и наибольшего количества гидрологических постов наблюдений за максимальным стоком существенно отличаются ввиду больших зна-

чений коэффициентов вариации и модуля стока, вводящихся в расчетные формулы для определения корреляционного и градиентного критериев соответственно.

Что касается годовых значений стока рек Беларуси, то количество станций наблюдений за ним приближается к критической минимальной отметке. Дальнейшее сокращение гидрологических постов на территории Беларуси недопустимо ввиду определяющего значения среднегодового стока в гидрологических и агротехнических расчетах, гидротехническом строительстве и других отраслях народного хозяйства [24, 25].

Районирование по синхронности колебаний годового стока

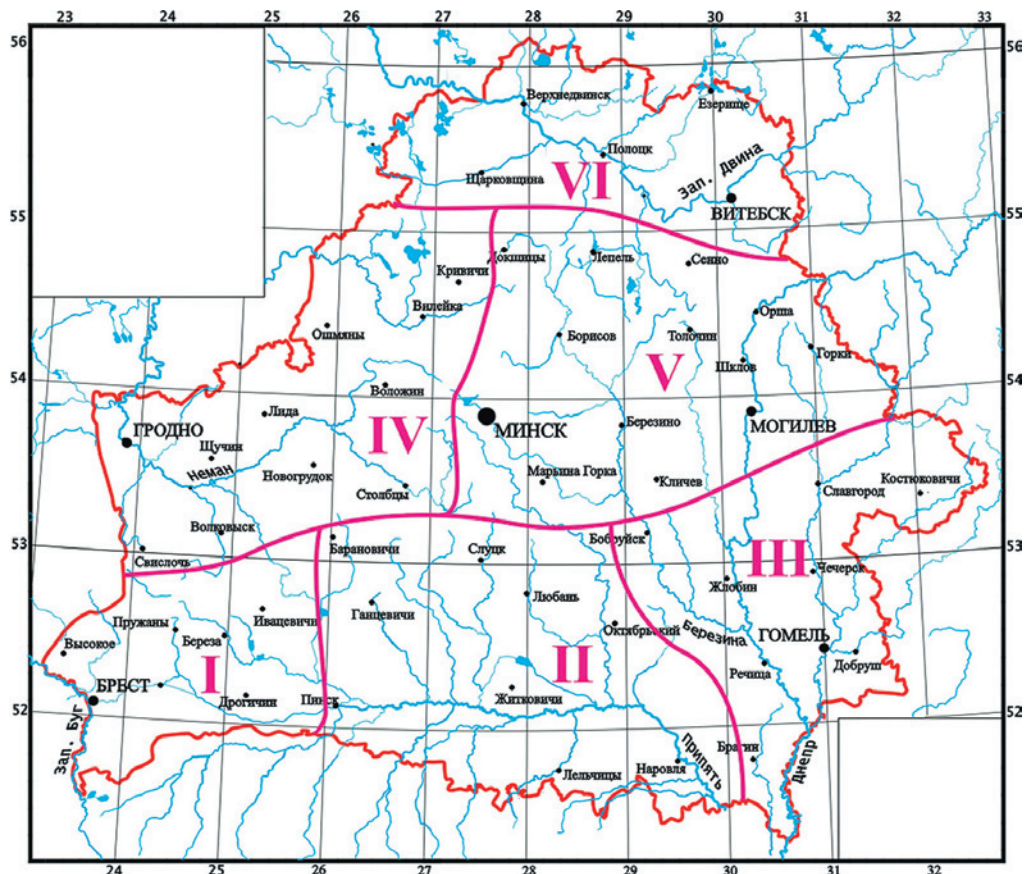
Для районирования территории отобраны гидрологические створы с одинаковыми периодами наблюдений с учетом равномерности распределения по территории Беларуси.

В первую очередь, корреляционная матрица рассчитывалась для створов с площадью водосбора, превышающей 4000 км², что позволило провести приблизительные границы для предполагаемых районов. После чего парные коэффициенты корреляции были рассчитаны для всех створов с целью детального уточнения границ. Процесс районирования представлял собой объединение створов в один район в случае, когда парный коэффициент корреляции превышал необходимый уровень (он изменялся от 0,85 до 0,70). При разделении территории на районы учитывались физико-географическое и ландшафтное районирование Беларуси [23] и положения водоразделов бассейнов рек страны. Территория Беларуси с выделенными районами синхронных колебаний годового стока представлена на рис. 3.

В табл. 2. даны средние коэффициенты корреляции внутри каждого из выделенных районов и средние коэффициенты корреляции с остальными районами Беларуси. Средние значения внутрирайонных коэффициентов корреляции изменяются в пределах от 0,70 до 0,81, что свидетельствует о высоком уровне синхронности колебаний годового стока для каждой группы выделенных в отдельный район створов. Средние значения межрайонных корреляционных коэффициентов колеблются в районе 0,50 и не превышают 0,68, это подтверждает верное выделение районов.

Таблица 2. Средние районные и межрайонные коэффициенты корреляции
Table 2. Average regional and inter-regional indices of correlation

№ района	I	II	III	IV	V	VI
I	0,74	0,56	0,44	0,47	0,35	0,34
II	–	0,70	0,49	0,50	0,47	0,40
III	–	–	0,76	0,50	0,68	0,45
IV	–	–	–	0,70	0,57	0,50
V	–	–	–	–	0,78	0,56
VI	–	–	–	–	–	0,81



I – юго-западный, II – Припятский, III – юго-восточный,
IV – Неманский, V – центральный, VI – Западнодвинский

Рис. 3. Районы синхронных колебаний годового стока рек Беларуси.
Fig. 3. Areas of synchronous fluctuations of the annual runoff of the rivers of Belarus.

Районирование по условиям колебаний годового стока

В зависимости от вида спектра годового стока территория Беларуси разделена на три типовых района. Первая группа спектров представляет собой гладкую кривую без значимых пиков в высокочастотной области. Она обнаружена у рек бассейна Припяти и Западного Буга. Типичным представителем этой зоны является спектр временного ряда годовых расходов воды р. Припять – г. Туров (рис. 4). В подтверждение к сказанному на рис. 5 представлены спектры еще шести гидрологических створов юго-западного района страны.

Для спектра стока рек центральной части Беларуси характерна значимая пятилетняя гармоника. Такой спектр представлен водосборами бассейнов Немана, Березины и части Днепра. Типичным представителем этой зоны является спектр р. Сож – г. Гомель (рис. 6). В подтверждение к сказанному на рис. 7 показаны спектры годового стока шести рек центральной части Беларуси.

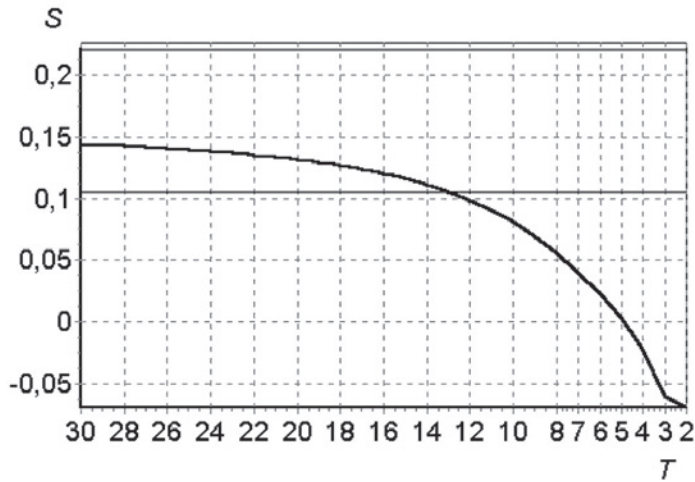


Рис. 4. Типовой для юго-западного района Беларуси (I район) спектр временных рядов годового стока, р. Припять – г. Туров.

Fig. 4. The Pripjat River – the city of Turov annual runoff time series typical for southwestern region of Belarus (area I).

В северо-восточном районе страны находятся водосборы, расположенные в бассейнах Западной Двины и верхней части Днепра. Данная группа спектров представляет собой кривую с наличием значимого пика четырехлетнего колебания. Типичный спектр для этого района приведен на рис. 8, р. Западная Двина – г. Полоцк. На рис. 9 представлены еще шесть спектров для створов северо-восточного региона.

Разделение территории Беларуси на районы проводилось с учетом форм спектров и ландшафтных особенностей [23], а также положений водоразделов бассейнов рек. Территория Беларуси, разделенная на районы в зависимости от очертаний выборочных спектров среднегодовых расходов воды, представлены на рис. 10.

Районирование территории Беларуси способствовало проведению групповой оценки основных статистических характеристик. Средние значения модуля годового стока (\bar{q}), коэффициентов вариации (C_v), отношений коэффициентов асимметрии и вариации (C_s/C_v), а также коэффициентов автокорреляции ($r(1)$) для водосборов трех районов Беларуси представлены в табл. 3.

Таблица 3. Основные статистические характеристики рядов годового стока водосборов Беларуси

Table 3. The main statistical characteristics of annual runoff series for catchments of Belarus

Номер района	\bar{q} , л/(с·км ²)	C_v	C_s/C_v	$r(1)$
I	4,50	0,35	2,29	0,26
II	5,82	0,29	4,58	0,07

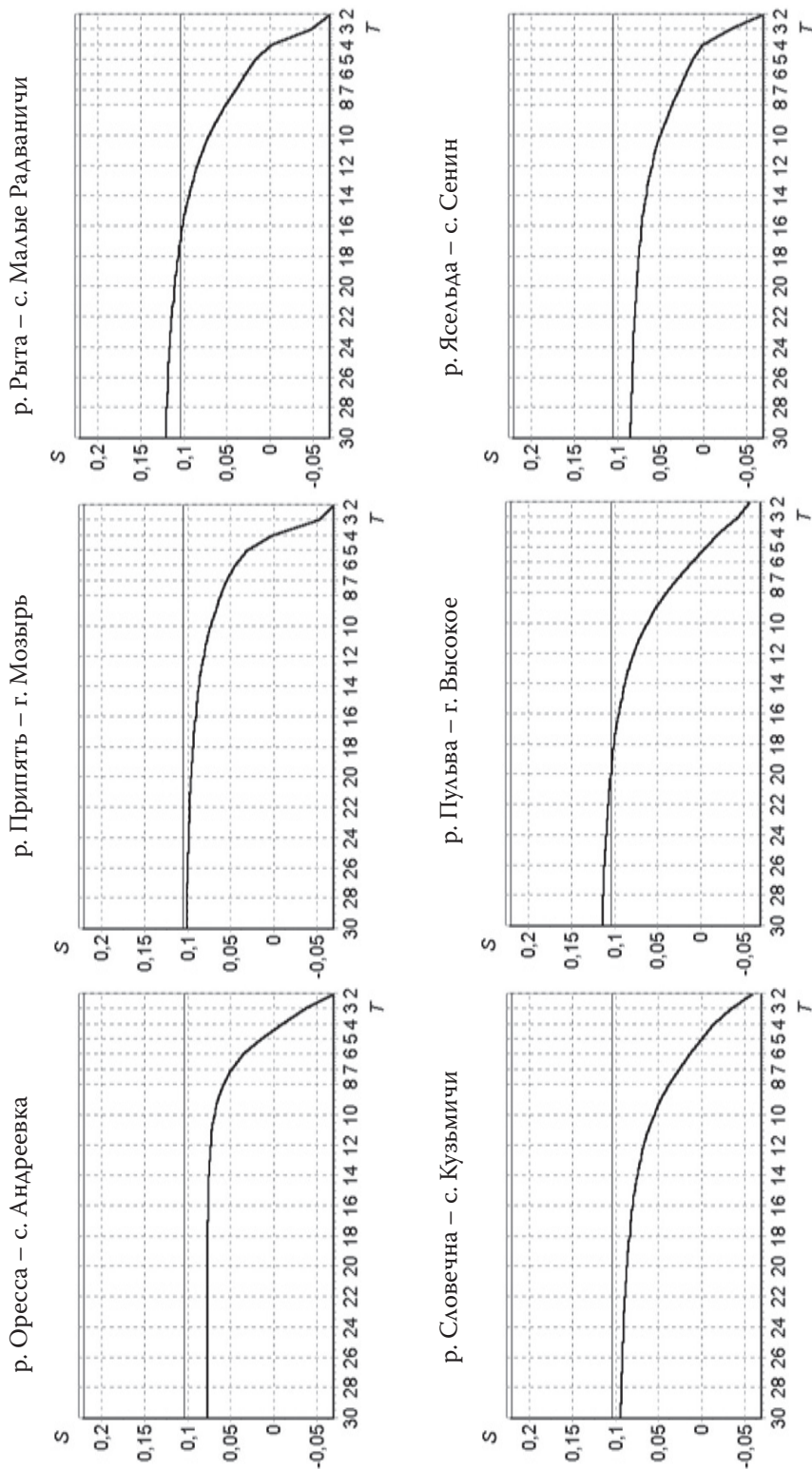


Рис. 5. Наиболее характерные спектры временных рядов годового стока
 для юго-западного района Беларуси.

Fig. 5. The most typical annual runoff time series specters for southwestern region of Belarus.

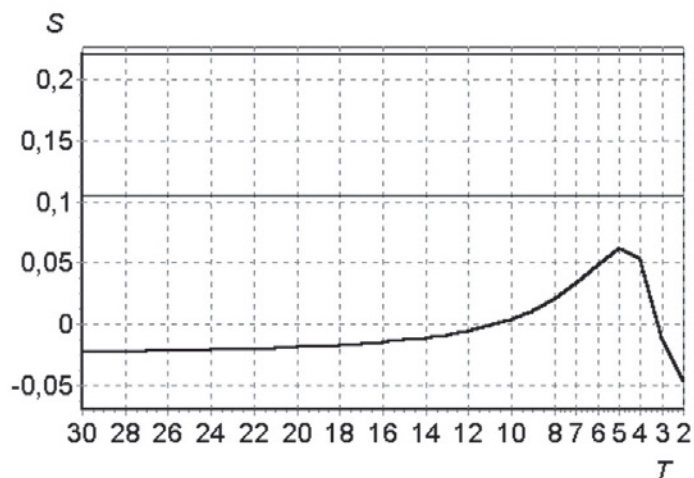


Рис. 6. Типовой для центрального района Беларуси (II район) спектр временных рядов годового стока, р. Сож – г. Гомель.

Fig. 6. The Sozh River – the city of Gomel specter of the annual runoff time series typical for the central area of Belarus (area II).

Значение модуля годового стока имеет ярко выраженную тенденцию к возрастанию от I к III району, т. е. с юго-запада на северо-восток территории республики. Коэффициент вариации, наоборот, уменьшается от первого района к третьему. Коэффициент автокорреляции и соотношение коэффициентов асимметрии и вариации не имеют подобных пространственных тенденций, но в центральном районе отмечается наименьший коэффициент автокорреляции и наибольшее соотношение C_s/C_v годового стока.

Норма стока для рек изменяется незначительно и напрямую зависит от площади водосбора (A). Таким образом, для определения нормы стока неизученных рек помимо карт изолиний, приведенных в ТКП [26], можно рекомендовать зависимости $Q=f(A)$, как это показано на рис. 11. Полученная зависимость описывается следующей формулой

$$Q = \alpha \cdot A + \beta, \quad (13)$$

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

Таблица 4. Параметры уравнения (13)

Table 4. Parameters of Equation (13)

Район	α	β	Коэффициент корреляции
Юго-западный	0,0039	1,854	0,998
Центральный	0,0059	0,736	0,994
Северо-восточный	0,0077	-3,179	0,996
Вся территория	0,0047	9,292	0,953

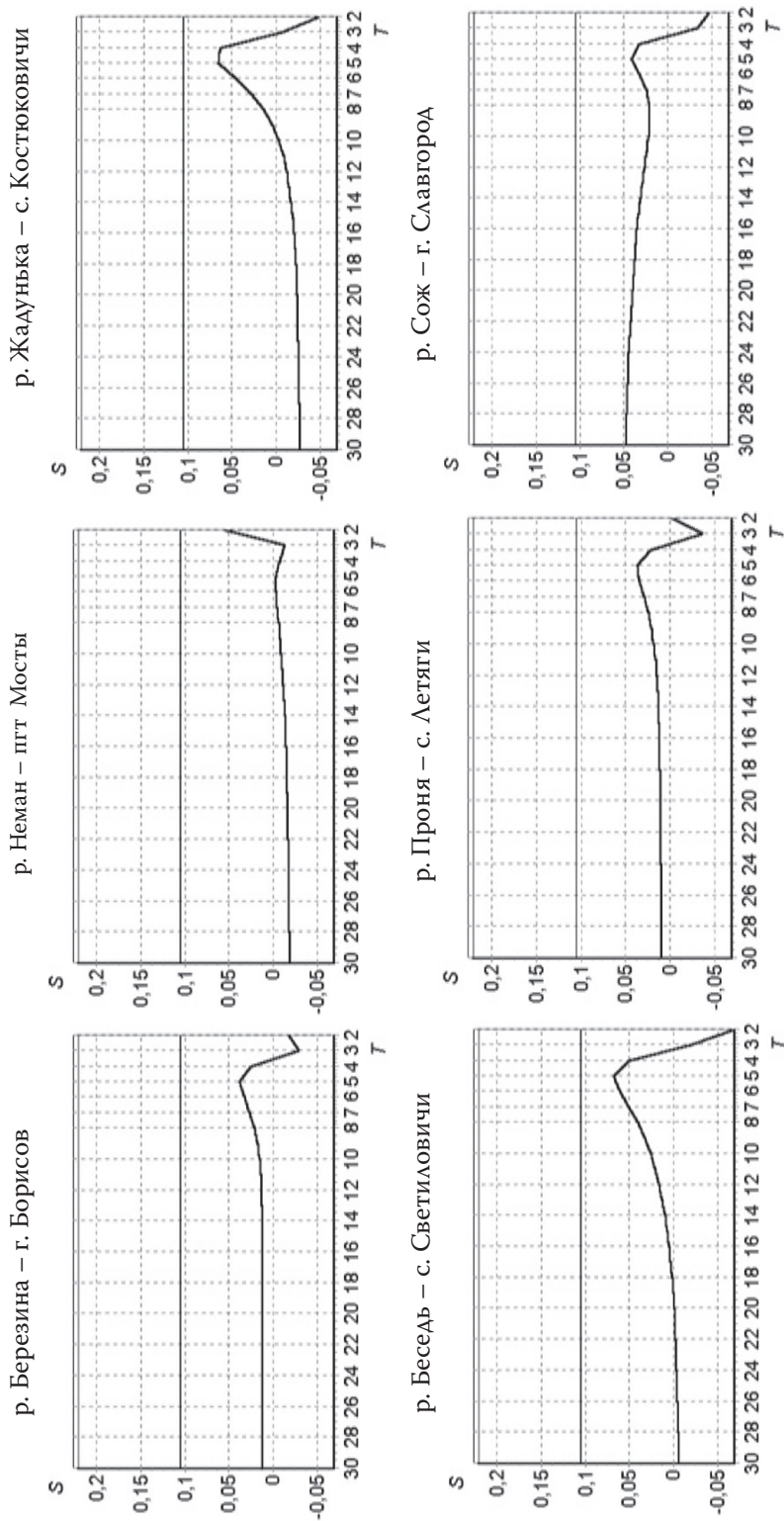


Рис. 7. Наиболее характерные спектры временных рядов годового стока
для центрального района Беларуси.
Fig 7. The most characteristic specters of the annual runoff time series for the central area of Belarus.

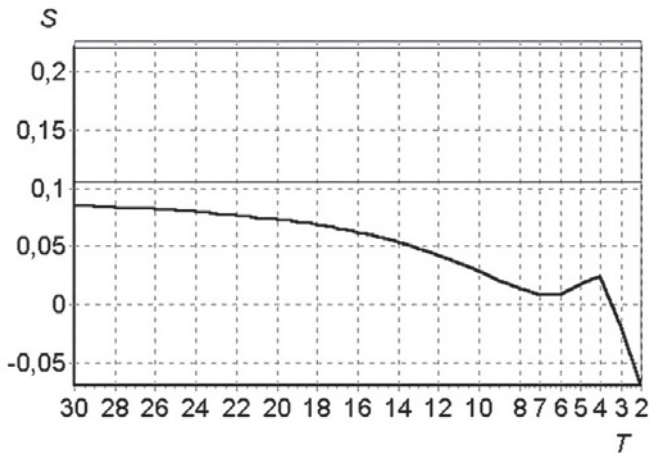


Рис. 8. Типовой для северо-восточного района Беларуси (III район) спектр временных рядов годового стока, р. Западная Двина – г. Полоцк.
 Fig. 8. The Zapadnaya Dvina River – the city of Polotsk annual runoff time series specter typical for the northeastern part of Belarus (area III).

Сток рек выделенных районов отличается также мощностью долгопериодных составляющих в спектре. Максимальная «степень покраснения» спектра стока рек наблюдается в юго-западном районе. В северо-восточном районе мощность долгопериодных составляющих ниже, чем в юго-западном. В центральном районе «красный шум» наименее выражен.

Гидрологически однородные районы сопоставлены с районами, выделенными при различных видах районирования. С точки зрения гидрологического районирования [21] выявленный северо-восточный район совпадает с Западно-Двинским и Верхнеднепровским бассейнами. Юго-западный район совпадает с Припятским бассейном, за исключением территории нижней части Днепра. Выделенный центральный район включает Неманский, Центральнo-Березинский, а также почти весь Вилейский и восточную часть Припятского бассейнов. Если провести сопоставление с физико-географическими районами [15], то северо-восточный район соответствует Поозерской и Западно-Белорусской провинциям. Центральный район – совокупности Западно-Белорусской, Предполесской и части Полесской провинций с низовьем Днепра. Юго-западный район включает остальную часть Полесской провинции. Сопоставляя выделенные районы с районами, определенными при агроклиматическом районировании [16], можно констатировать, что первый район в значительной степени совпадает с южной, второй – с центральной, третий – с северной агроклиматической областью.

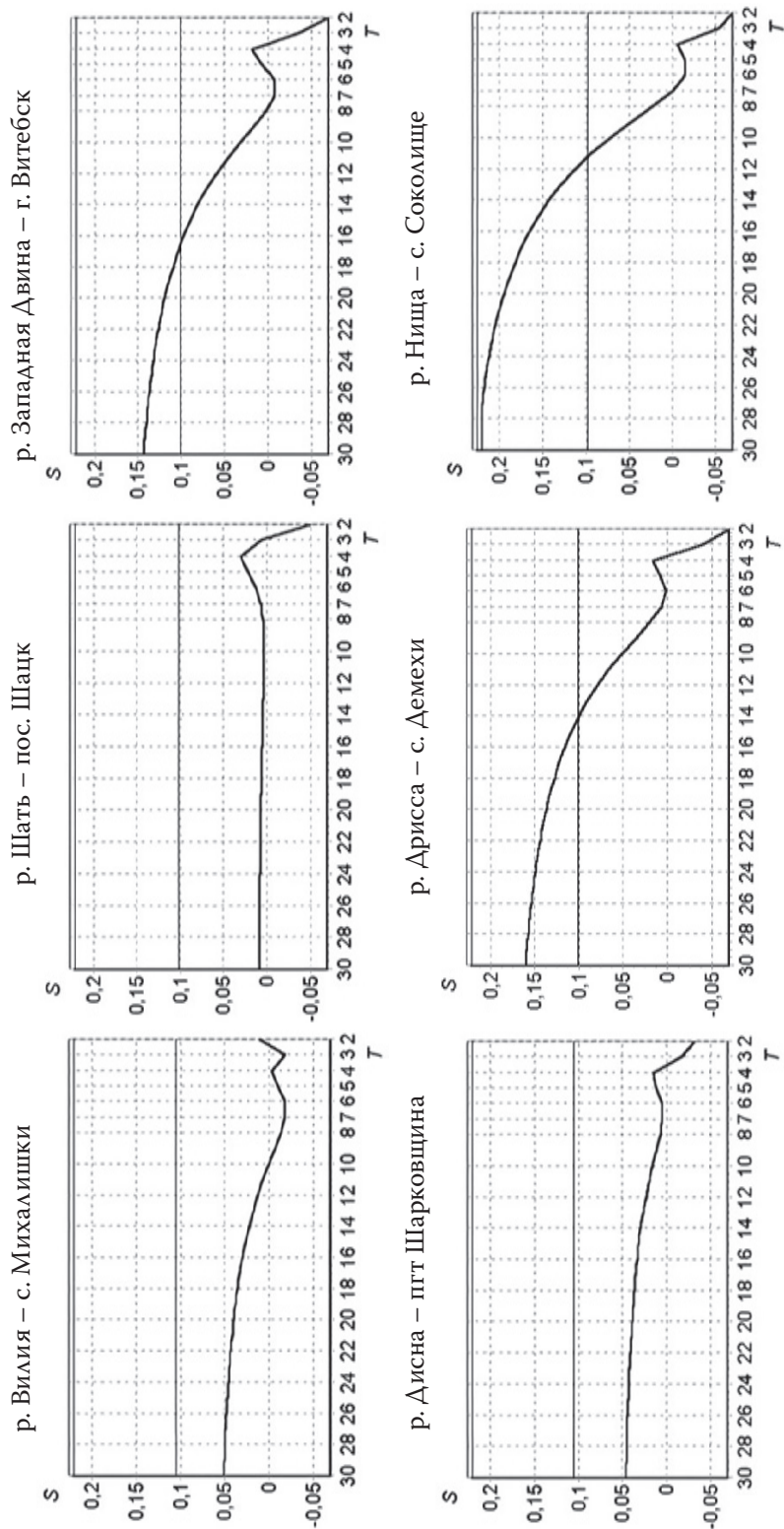
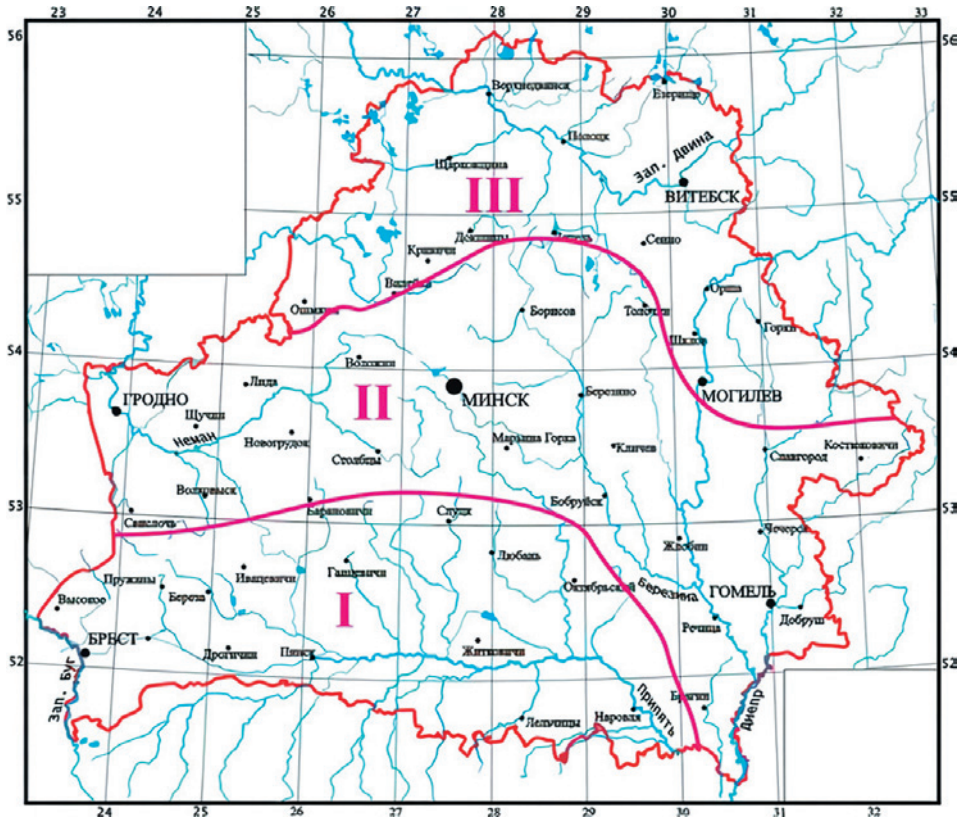


Рис. 9. Наиболее характерные спектры временных рядов годового стока для северо-восточного района Беларуси.
 Fig. 9. The most characteristic spectra of the annual runoff time series for northeastern part of Belarus.



I – юго-западный, II – центральный, III – северо-восточный

Рис. 10. Схема гидрологически однородных районов для территории Беларуси.
Fig. 10. The scheme of hydrological homogenous regions for the territory of Belarus.

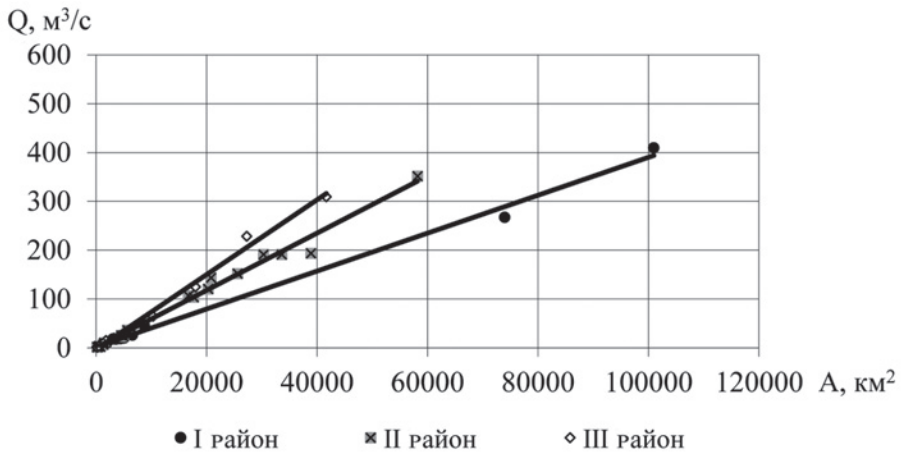


Рис. 11. Зависимость среднего многолетнего расхода воды от площади водосбора для I, II и III районов.
Fig. 11. Dependence of average many-year water flow on the catchment area for regions I, II, and III.

Районирование по характеру колебаний годового стока рек с помощью пространственных корреляционных функций

В конце прошлого столетия были рассчитаны ПКФ стока рек Беларуси, но они учитывали данные до 1981 г. [27]. Для районирования территории Беларуси использованы данные до 2020 г. включительно. В первую очередь ПКФ рек Беларуси рассчитана по 3321 парному коэффициенту корреляции, полученному по всем 82 грациям наблюдений (рис. 12).

Среднее число совместных лет наблюдений при расчете парных коэффициентов корреляции составляло не менее 20 лет. Оценка однородности ПКФ годового стока рек Беларуси показала, что рассматриваемая функция неоднородна, поэтому исходное поле было разделено на более мелкие районы. В нашем случае для территории Беларуси выделено четыре однородных района, ПКФ которых приведены на рис. 13.

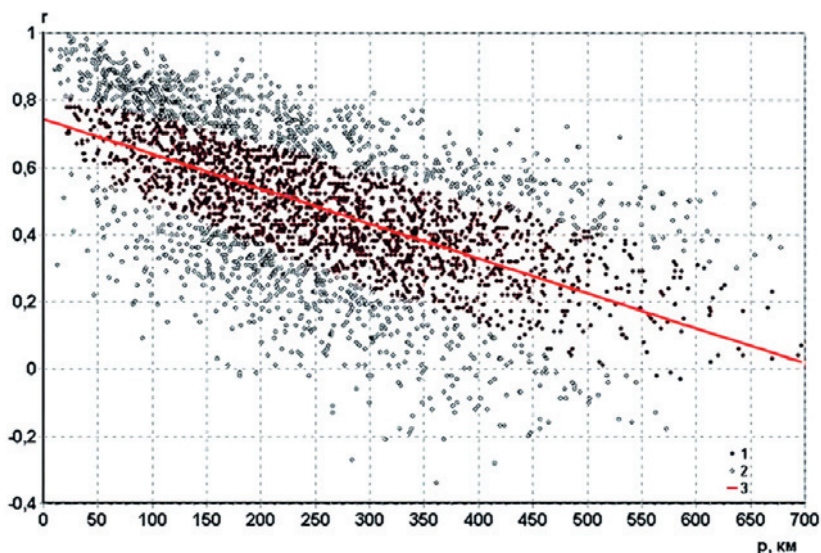


Рис. 12. ПКФ годового стока рек Беларуси: 1 – эмпирические коэффициенты корреляции в диапазоне $\pm\sigma_z$; 2 – коэффициенты парной корреляции в диапазоне $\pm 2\sigma_z$; 3 – линия регрессии $r=f(\rho)$.

Fig. 12. PFK of the Belarus rivers annual runoff: 1 is empiric indices of correlation in the range $\pm\sigma_z$; 2 is indices of pair correlation in the range $\pm 2\sigma_z$; 3 is the regression line $r=f(\rho)$.

Таблица 5. Параметры уравнения (14)

Table 5. Parameters of Equation (14)

Район	$\alpha \cdot 10^{-2}$	β	Коэффициент корреляции
I	0,135	0,844	0,64±0,04
II	0,107	0,758	0,49±0,04
III	0,189	0,830	0,65±0,04
IV	0,082	0,901	0,71±0,07

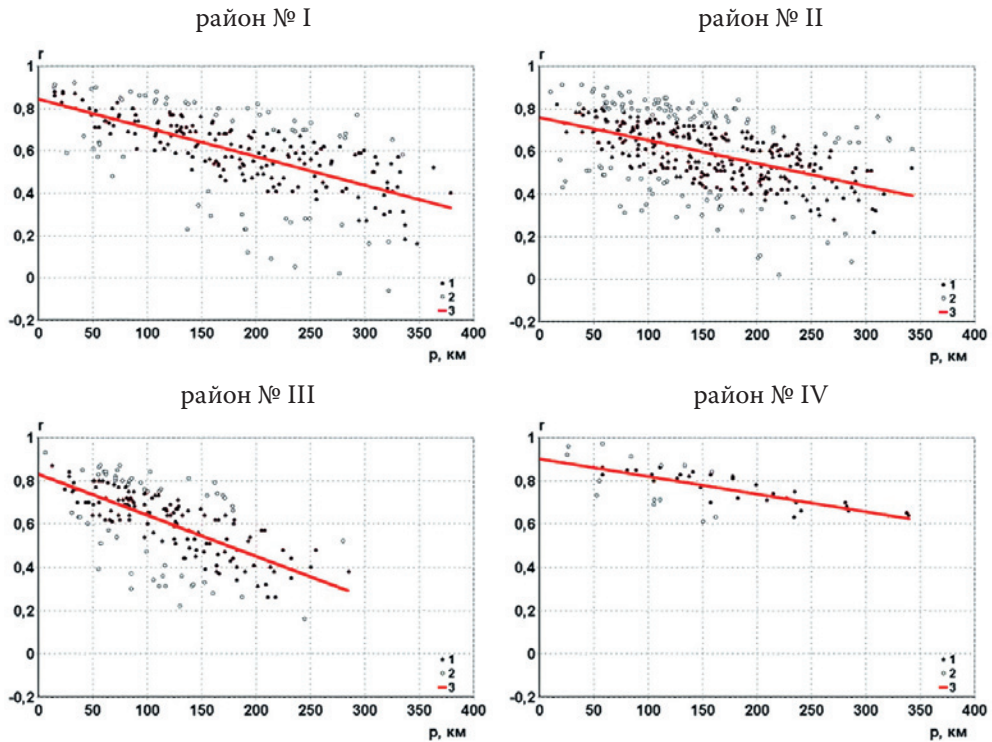


Рис. 13. ПКФ годового стока однородных районов Беларуси: 1 – коэффициенты корреляции в диапазоне $\pm\sigma_z$; 2 – коэффициенты корреляции в диапазоне $\pm 2\sigma_z$; 3 – линия регрессии $r=f(\rho)$.

Fig. 13. PKF of the annual runoff of the Belarus homogenous regions: 1 is correlation indices in the range $\pm\sigma_z$; 2 is correlation indices in the range $\pm 2\sigma_z$; 3 is the regression line $r=f(\rho)$.

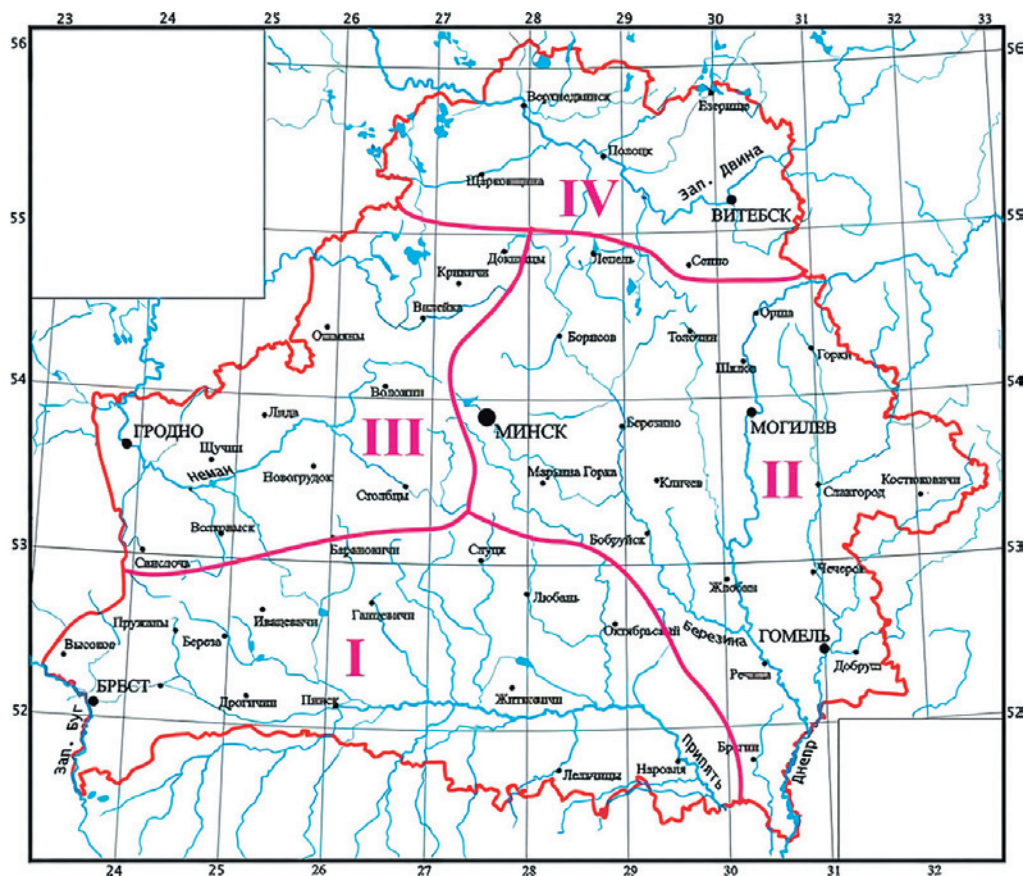
Для выделенных районов получены зависимости $r=f(\rho)$, которые можно представить следующей формулой

$$r = -\alpha \cdot \rho + \beta, \quad (14)$$

где α , β – эмпирические коэффициенты, представленные в табл. 5.

В результате проведенных исследований подтвердилась гипотеза о четырех однородных районах для территории Беларуси в зависимости от характера колебания годового стока рек. Первый выделенный район включает речные створы бассейнов Западного Буга и Припяти, второму району соответствуют водосборы Днестра. Район III объединяет речные створы Немана, четвертый район включает водосборы Западной Двины. Районирование территории Беларуси в зависимости от характера многолетних колебаний годового стока приведено на рис. 14.

В процессе оценки водных ресурсов территории наиболее значима роль карт распределения модуля среднесуточного годового стока. Одна из последних фундаментальных работ по оценке состояния поверхностных вод Беларуси опубликована в 1996 г. [28]. В течение последних десяти лет водные



I – район № I, II – район № II, III – район № III, IV – район № IV

Рис. 14. Однородные районы по многолетним колебаниям годового стока рек Беларуси.

Fig. 14. Homogenous regions in terms of many-year fluctuations of the Belarus rivers annual runoff.

ресурсы страны были подвержены трансформации в силу воздействия естественных и антропогенных факторов на сток. Уточненные поверхностные водные ресурсы Беларуси за период с 1960 по 2009 гг. и данные о трансформации стока на исследуемом 50-летнем интервале по отношению к периоду инструментальных наблюдений до 1996 г. по бассейнам основных рек и административным областям приведены в табл. 6 и 7 соответственно [29].

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 за последние годы наблюдалось уменьшение поверхностных вод остальных речных систем страны. Отмечен рост ресурсов поверхностных вод Брестской и Гомельской областей, а для Гродненской области характерно уменьшение водных ресурсов ввиду снижения водности Немана и Вилии.

Таблица 6. Естественные ресурсы речных вод Беларуси по бассейнам основных рек в 1960–2009 гг. (числитель) и изменение стока по отношению к периоду до 1996 г. (знаменатель)
 Table 6. Natural resources of river waters of Belarus in terms of the main rivers' basins in 1960-2009 (numerator) and the runoff changing in respect of the period prior to 1996 (denominator)

Речной бассейн	Речной сток, км ³ /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
Виляя	<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.:										
Березина	<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

Таблица 7. Естественные ресурсы речных вод Беларуси по административным областям в 1960 – 2009 гг. (числитель) и изменение стока по отношению к периоду до 1996 г. (знаменатель)
 Table 7. Natural resources of river waters of Belarus in terms of administrative regions in 1960–2009 (numerator) and the runoff changing in respect of the period prior to 1996 (denominator)

Административная область	Речной сток, км ³ /год				
	Обеспеченность, %				
	5	25	50	75	95
Брестская	<u>7,5</u>	<u>4,8</u>	<u>4,2</u>	<u>3,3</u>	<u>2,4</u>
	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0
Витебская	<u>12,4</u>	<u>9,0</u>	<u>8,1</u>	<u>6,6</u>	<u>5,2</u>
	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Гомельская	<u>9,3</u>	<u>6,6</u>	<u>5,9</u>	<u>4,9</u>	<u>3,7</u>
	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
Гродненская	<u>5,6</u>	<u>4,7</u>	<u>4,4</u>	<u>3,8</u>	<u>3,6</u>
	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2
Минская	<u>9,9</u>	<u>7,6</u>	<u>6,7</u>	<u>5,4</u>	<u>4,5</u>
	-0,1	0,1	0,0	-0,2	-0,1
Могилевская	<u>7,1</u>	<u>5,2</u>	<u>4,8</u>	<u>4,1</u>	<u>3,3</u>
	0,0	0,1	-0,2	0,0	0,0
В целом по Беларуси	<u>51,8</u>	<u>37,9</u>	<u>34,1</u>	<u>28,1</u>	<u>22,7</u>
	0,3	0,4	0,1	-0,2	-0,1

В табл. 8 приведены данные по естественным водным ресурсам Беларуси с учетом асинхронности стока рек. Величина асинхронности зависит от совпадения либо несовпадения фаз водности на реках. Это определяется генетическими особенностями формирования осадков, выпадающих на водосбор при прохождении циклов из различных зон зарождения и их водности. В связи с этим даже для относительно небольших территорий сток рек Беларуси имеет разное генетическое происхождение, что и определяет асинхронность. При этом сток в целом по стране отличается от суммы по бассейнам основных рек по причине более существенного влияния эффекта асинхронности стока на всей территории, чем в отдельных регионах. Для бассейнов основных рек прослеживается достаточно тесная связь коэффициентов асинхронности от обеспеченности: с увеличением или уменьшением водности года эффект асинхронности увеличивается.

Ранее для территории Беларуси было построено несколько карт среднего годового стока. На рис. 15 изображена карта 1966 г. [17], на рис. 16 представлена карта 2000 г. [30], а на рис. 17 – последняя карта, датированная 2002 г. [31]. С целью уточнения водных ресурсов Беларуси построена карта среднегодового модуля стока рек, представленная на рис. 18. При построении учитывались данные с 1960 по 2009 гг. по действующим гидрологическим постам. Количество использованных постов является достаточным для корректного отображения информации о годовом стоке на территории Беларуси. Приведенная на рис. 18 карта представляет оптимальное сочетание нескольких способов построения карт, использующих различные методы интерполяции и выполненных в разных компьютерных системах, что позволило получить объективную картину формирования среднегодового стока рек Беларуси в современных условиях.

Таблица 8. Состояние естественных водных ресурсов Беларуси с учетом асинхронности
Table 8. The state of natural water resources of Belarus with taking into account the asynchronism

Речной бассейн	Речной сток, км ³ /год							
	местный				общий			
	обеспеченность, %				обеспеченность, %			
	5	25	75	95	5	25	75	95
Западная Двина	10,2	7,6	5,7	4,8	21,4	16,1	11,9	9,8
Неман	7,6	6,6	5,6	5,2	7,7	6,7	5,7	5,3
Виляя	2,7	2,4	1,9	1,6	2,7	2,4	1,9	1,6
Западный Буг	2,7	1,6	0,9	0,8	2,7	1,6	0,9	0,8
Припять	10,5	7,4	5,2	3,8	22,5	16,5	11,4	9,0
Днепр	15,5	11,6	9,9	8,4	26,8	19,9	16,2	14,1
в т. ч.:								
Березина	6,0	4,9	4,1	3,6	6,0	4,9	4,1	3,6
Сож	4,7	3,3	2,5	1,9	10,1	7,4	5,6	4,8
В целом по Беларуси	47,7	37,1	29,8	25,2	81,1	63,0	49,2	41,6

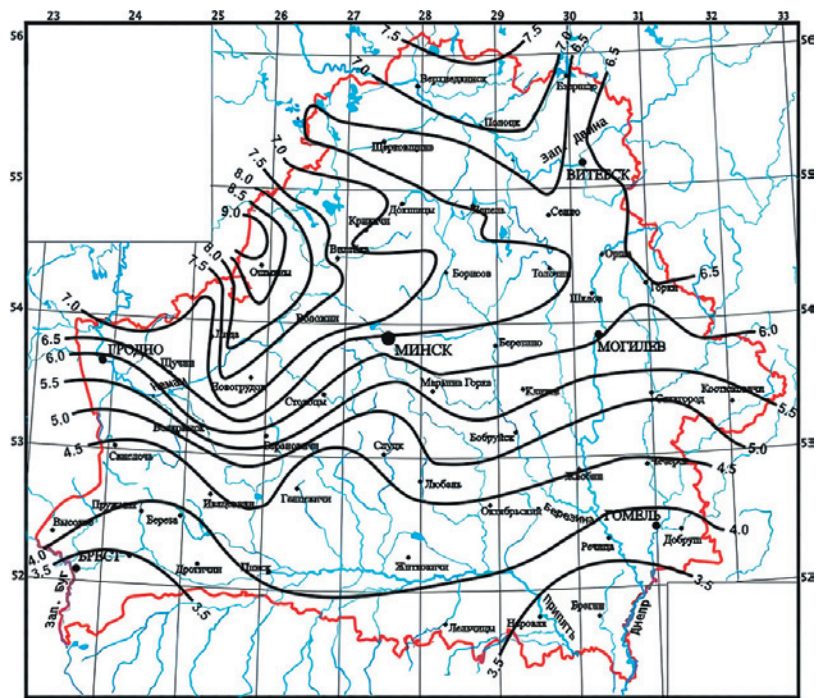


Рис. 15. Карта среднего годового стока рек Беларуси (1966 г.), л/(с·км²).
 Fig. 15. The map of average annual runoff of the rivers of Belarus (1966), l/c (с km²).

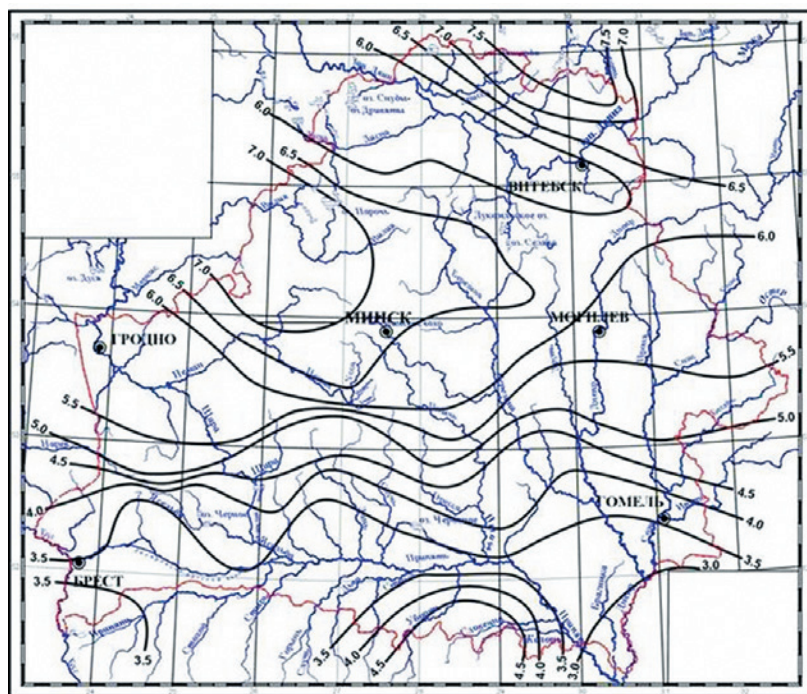


Рис. 16. Карта среднего годового стока рек Беларуси (2000 г.), л/(с·км²).
 Fig. 16. The map of average annual runoff of the rivers of Belarus (2000), l/c (с km²).

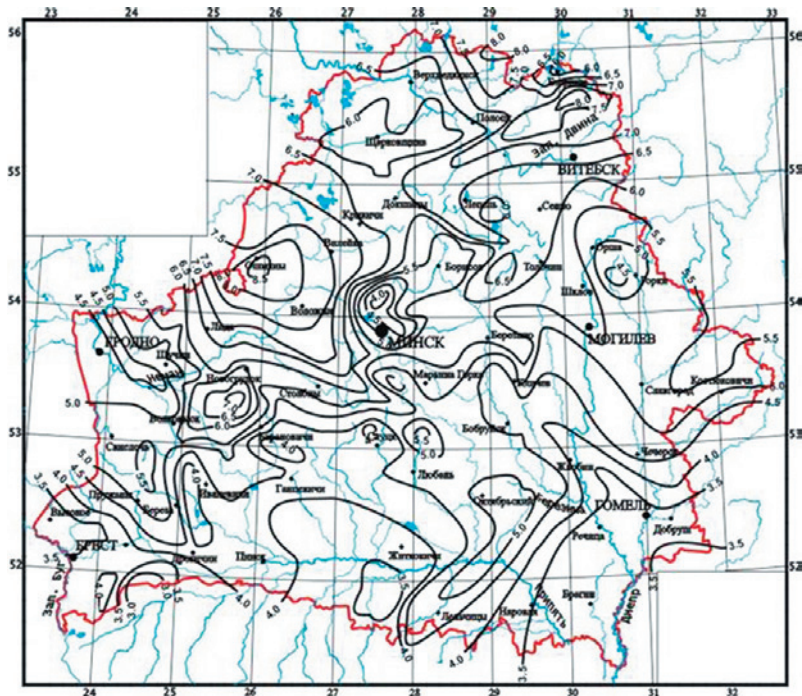


Рис. 17. Карта среднего годового стока рек Беларуси (2002 г.), л/(с·км²).
 Fig. 17. The map of average annual runoff of the rivers of Belarus (2002), l/c (c km²).

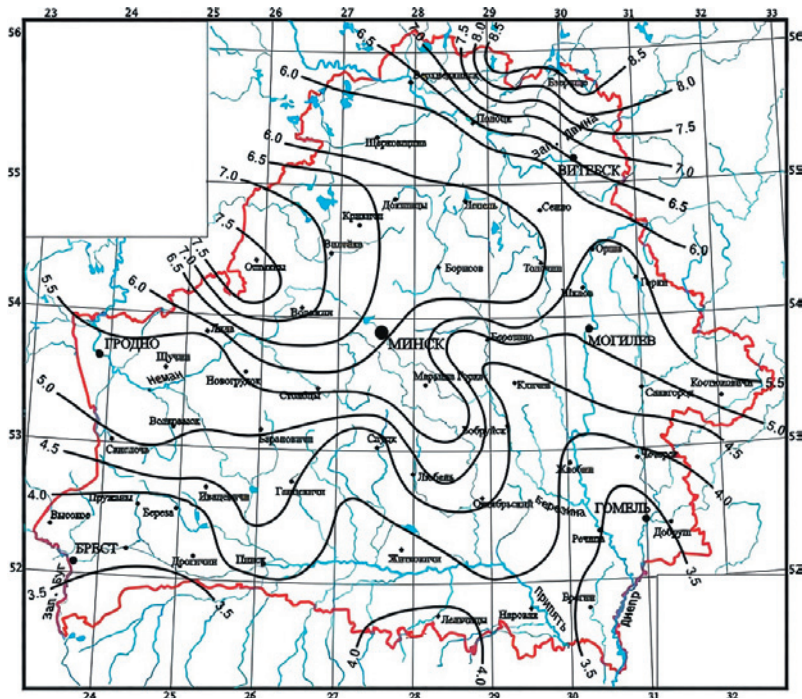


Рис. 18. Карта среднего годового стока рек Беларуси за период 1960–2009 гг., л/(с·км²).
 Fig. 18. The map of average annual runoff of the rivers of Belarus over the period of 1960–2009 l/c (c km²).

Сравнительный анализ карт среднего годового стока, построенных для различных периодов осреднения, подтвердил данные, представленные в табл. 6. Для рек бассейна Западной Двины характерно несущественное увеличение значений стока. Для бассейнов Немана и Вилии, наоборот, установлено его уменьшение. По Белорусскому Полесью проходит изолиния стока со значением 4, а не 3,5 как это было прежде, что свидетельствует об увеличении водности рек бассейна Припяти. Для Днепра и его основных притоков Березины и Сожа, а также для Западного Буга наблюдается как уменьшение, так и увеличение значений изолиний модуля среднегодового стока. Построенная уточненная карта модуля стока рек Беларуси может быть использована при определении характеристик стока в случае отсутствия данных наблюдений. Изменения объемов стока рек и гидрологического режима в современных условиях вызваны усилением интенсивности общей циркуляции атмосферы.

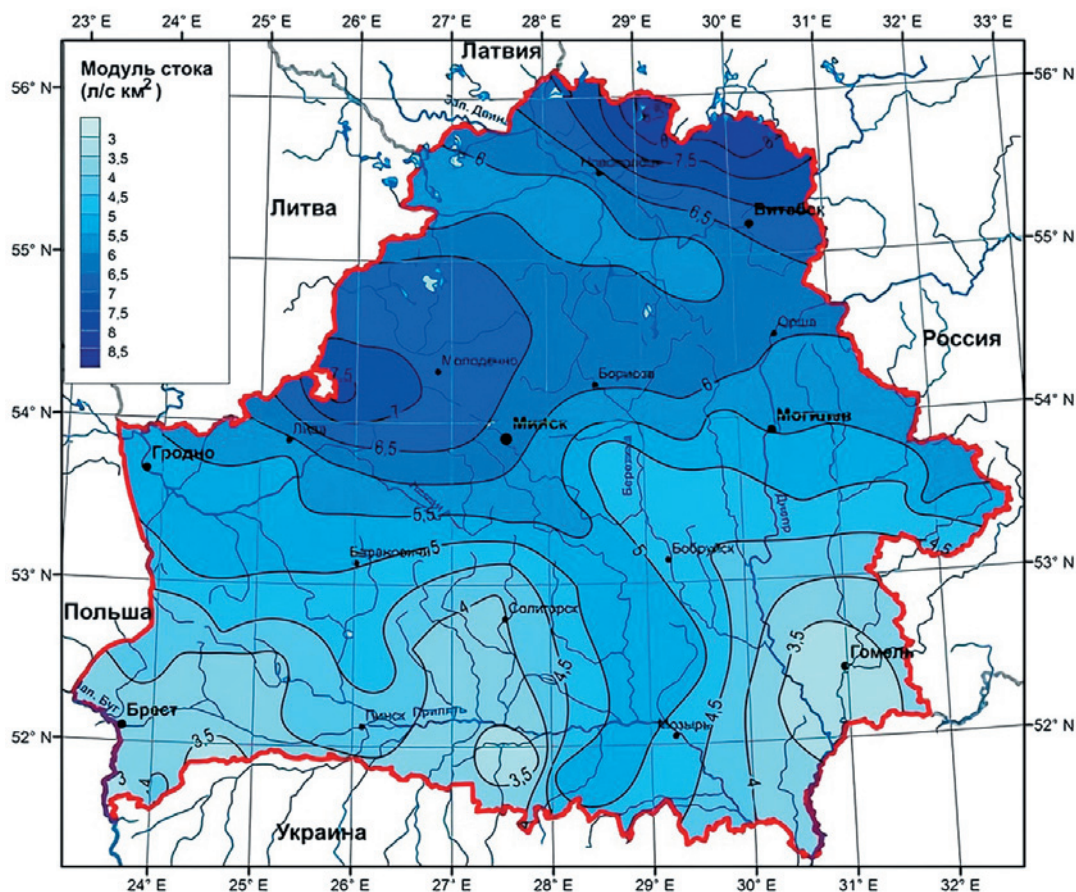


Рис. 19. Карта модулей среднемноголетнего годового стока рек Беларуси, л/с с км².
Fig. 19. The map of moduli of average many-year annual runoff of the rivers of Belarus, l/c (c km²).

Наглядное представление о современной пространственной структуре стока рек Беларуси можно получить из карты модулей среднемноголетнего годового стока рек за период с 1953 по 2018 гг., т. е. за последние 65 лет (рис. 19) [32]. Это позволило учесть усилившиеся в последние десятилетия процессы глобального потепления климата и антропогенных воздействий, которые, несомненно, наложили свой отпечаток на формирование стока. В распределении годового стока рек Беларуси наблюдается его общее зональное понижение в направлении с севера 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 (рис. 20) [32].

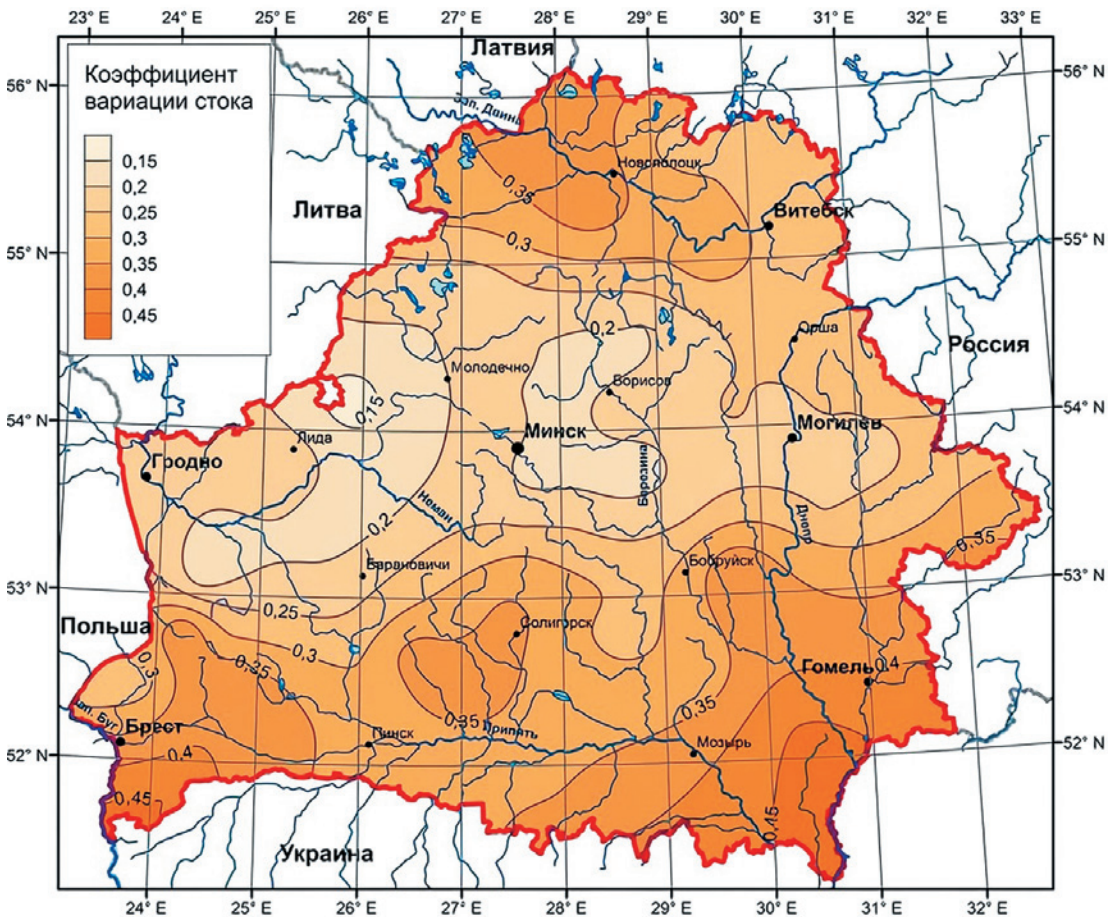


Рис. 20. Карта коэффициентов вариации среднемноголетнего годового стока рек Беларуси.

Fig. 20. The map of variation indices of average many-year annual runoff of the rivers of Belarus.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основу гидрологического районирования Беларуси положен комплексный ландшафтный подход, который учитывает не только бассейны крупных рек, а еще и физико-географические и климатические характеристики местности, условия формирования стока. Комплексный анализ формирования стока рек Беларуси с выделением однородных районов по синхронности и цикличности колебаний позволил уточнить гидрологическое районирование территории. Выделены следующие гидрологические районы: Западнобугский, Неманский, Вилейский, Западновинский, Центрально-Березинский, Припятский и Верхнеднепровский. Это позволило дать объективную оценку водным ресурсам страны с учетом современных климатических колебаний и антропогенных воздействий, создать современную карту среднегодового стока и его изменчивости.

Гидрологическое районирование послужило основой для создания современной карты годового стока рек Беларуси и его колебаний, что позволило учесть усилившиеся в последнее время процессы глобального потепления климата и антропогенных воздействий. Это необходимо при определении характеристик стока в случае отсутствия данных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блакітная кніга Беларусі: Энцыкл. / Беларус. Энцыкл.; Рэдкал.: Н.А. Дзісько і інш. Мн.: БелЭн, 1994. 415 с.
2. Карасев И.Ф. О принципах размещения и перспективах развития гидрологической сети // 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.: Изд. РГМУ, 2000. 43 с.
4. Сакович В.М. Районирование территории Северо-Запада Карелии по синхронности многолетних колебаний минимального летне-осеннего стока // Водные ресурсы Северо-Западного региона России. СПб., 1999. С. 29–31.
5. Рутковский В.И. Опыт географо-гидрологического районирования Европейской части СССР по физико-географическим материалам // Труды Первого Всесоюзного географического съезда (11-18 апреля 1933 г.). Вып. 3, 1934. С. 208–227.
6. Кочерин Д.И. Вопросы инженерной гидрологии. М.–Л.: НКТП СССР Энергетическое издательство. 1932. 208 с.
7. Соколовский, Д.А. Нормы максимального стока весенних паводков рек СССР и методы их расчета. М.; Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1937. 120 с.
8. Львович М.И. Опыт классификации рек СССР // Труды Государственного Гидрологического института. Вып. 6. М., 1938.
9. Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР. Ленинград; Москва: Гидрометеоздат, 1946. 148 с.
10. Марков К.К. Основные проблемы геоморфологии. М.: Изд-во геогр. лит., 1947. 344 с.
11. Троицкий В.А. Гидрологическое районирование СССР / отв. ред. Б.В. Поляков. М.; Ленинград: 2-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР, 1948. 112 с.
12. Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР / Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гос. ордена Трудового Красного Знамени гидрол. ин-т. Ленинград: Гидрометеоздат, 1960. 455 с.
13. Корытный Л.М. Реки Красноярского края. Красноярск: Кн. изд-во, 1991. 155 с.
14. Дружинин В.С., Сикан А.В. Районирование территории Северо-Запада РФ по условиям формирования годового стока // Водные ресурсы Северо-Западного региона России. СПб., 1999. С. 24–29.

15. Теоретические проблемы и результаты комплексного географического районирования территории Беларуси / Г.И. Марцинкевич, Н.К. Клицунова, И.И. Счастливая, О.Ф. Якушко // Выбранные научные работы. Минск: БДУ, 2001. Т. 7. С. 332–356.
16. Изменения климата Беларуси и их последствия / В.Ф. Логинов [и др.]; Ин-т пробл. использования природ. ресурсов и экологии НАН Беларуси; под общ. ред. В.Ф. Логинова. Минск: ОДО «Тонпик», 2003. 330 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Л.: Гидрометеиздат, 1966. Т. 5. Ч. 1. 718 с.
18. Исследование и расчеты речного стока / Под ред. В.Д. Быкова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 228 с.
19. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
20. Кайсл Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных / пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 138 с.
21. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
22. Волчек А.А. Оптимизация режимной гидрологической сети Беларуси // Мелиорация. № 4 (94). 2020. С 24–29.
23. Гайдукова Е.В., Хаустов В.А. Оптимизация режимной гидрологической сети в условиях изменения климата // Исследовано в России [Электронный ресурс]. 2004. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/138.html>.
24. Волчек А.А. Закономерности формирования водного баланса речных водосборов Беларуси: Формирование водного баланса Беларуси // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 387 с.
25. Логинов В.Ф., Волчек А.А., Волчек А.А. Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз. Минск: Беларуская навука, 2014. 244 с.
26. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250) / Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. 55 с.
27. Волчек А.А., Фолитар Г.В. Пространственные корреляционные функции стока рек Белоруссии // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1988. Вып. 17. С. 12–16.
28. Плужников В.Н., Фадеева М.В., Бучурин В.И. Водные ресурсы Беларуси, их использование и охрана // Природные ресурсы. № 1. 1996. С. 24–29.
29. Волчек А.А., Парфомук С.И. Водные ресурсы Республики Беларусь на современном этапе // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. №2(68). 2011. С. 2–5.
30. Пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83 «Определение расчетных гидрологических характеристик». Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2000. 174 с.
31. Беларуская энцыклапедыя: у 18 т. / рэдкал.: Г.П. Пашкоў (гал. рэд.) [і інш.]. Мінск: БелЭн, 2002. Т. 15. 552 с.
32. Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И. Пространственно-временная структура средне-многолетнего годового стока рек Беларуси // Вестник Брестского государственного технического университета. № 2 (125). 2021. С. 75–80.

REFERENCES

1. Red Book of Belarus: Encyclopedia. *Belaruss. Entsikl [Byelorussian Encyclopedia]*. Edited by N. A. Dzisko et al. BelEn, 1994. 415 pc.
2. Karasev I.F. About principles of locating and prospects of development of the hydrological network. *Trudy GGI [Proceedings of Grodno State University]* 1968. Вып. 164. P. 3–36.
3. Kovalenko V.V., Pivovarova I.I. Optimization of the regime hydrological network based of stochastic model of the river runoff formation. SPb.: Izd RGGMU, 2000. 43 p.
4. Sakovich V.M. Zoning of the territory of the northwest of Karelia according the synchronism of many-year fluctuations of minimal summer-fall runoff. *Vodniye resursy Severo-Zapadnogo regiona Rossiya [Water resources of the northwestern region of Russia]*. SPb., 1999. P. 29–31.

5. Rutkovskiy V.I. Experience in geographical/hydrological zoning of the European part of the USSR according to physical/geographical materials. *Trudy Pervogo Vsesouznogo geographicheskogo syezda [Proceedings of the First All-Union Geographic congress (April 11-18, 1933)]*. Vyp. 3, 1934. P. 208–227.
6. Kocherin D.I. Issues of engineering hydrology. M. – L. NKTP SSSR *Energeticheskoye izdatelstvo [Energy publishing house]*. 1932. 208 p.
7. Sokolovskiy D.L. Norms of maximal runoff of the spring floods of the rivers of the USSR and methods of their calculations. M.; Leningrad: *Gidrometeorologicheskoye izdatelstvo [Hydro/meteorological Publishing House]*, 1937. 120 p.
8. Lyvovich M.I. Experience in classification of the rivers of the USSR. *Trudy gosudarstvennogo Gidrologicheskogo institute [Proceedings of the State Hydrological University]* Vyp. 6. M., 1938.
9. Zaykov B.D. Average runoff and its distribution within the year on the territory of the USSR. Leningrad; Moscow: *Gidrometeoizdat*, 1946. 148 p.
10. Markov K.K. The main problems of geo/morphology M. *Isd-vo geogr. Lit. [Publishing house of geographical literature]* 1947. 344 p.
11. Troitskiy V.A. Hydrological zoning of the USSR. Edited by B.N. Polyakov. M. Leningrad. *2-aya tip. Izd-va Akad. Nauk SSSR [2nd print office of the Academy of Sciences of the USSR]* 1948. 112 p.
12. Kuzin P.S. Classification of rivers and hydrological zoning of the USSR. *Gidrometeoizdat*, 1960. 455 p.
13. Korytniy L.M. Rivers of Krasnoyarsk Kray. Krasnoyarsk, 1991. 155 p.
14. Druzhinin V.S., Sikan A.V. Zoning of the territory of the northwest of the Russian Federation in terms of the conditions of the annual runoff formation. *Vodniye resursy Severo-Zapadnogo regiona Rossii [Water resources of the northwestern region of Russia]*. SPB., 1999. P. 24–29.
15. Theoretical problems and results of the integrated geographical zoning of the territory of Belarus. G.I. Martsinkevich, N.K. Klitsunova, I.I. Schastnaya, O.F. Yakushko. *Vybrannyya navukovyya pratsy BDU [Selected scientific works of BDU]*: in 7 volumes. Minsk. BDU, 2001. V. 7. P. 332–356.
16. Changes of the Belarus climate and their consequences. V.F. Loginov (et al); In-t probl. ispolzovaniya prirod. resursov i ekologiyi NAN Belarusi [Institute of problems of the natural resources use and ecology of the national Academy of Sciences of Belarus] edited by V.F. Loginov. Minsk: ODO “Tonpik”, 2003. 330 p.
17. Resources of surface waters of the USSR Byelorussia and Upper Dnieper region. L.: *Gidrometeoizdat*, 1966. T. 5, ч. 1. 718 c.
18. Studying and calculations of the river runoff. Edited by V.D. Bykov. M., 1981. 228 c.
19. Marple-Jr., S.L. Digital spectral analysis and its applications. Trans. from English. M.: Mir, 1990. 584 p.
20. Caisl C. Analysis of hydrological data time series. Trans. from English. L.: *Gidrometeoizdat*, 1972. 138 p.
21. Rozhdestvenskiy A.V., Chebotaryov A.I. Statistical methods in hydrology. L.: *Gidrometeoizdat*, 1974. 424 p.
22. Volchek A.A. Optimization of the regime hydrological network of Belarus. *Melioration*. No. 4(94). 2020. P24–29.
23. Gaydukova E.V., Khaustov V.A. Optimization of the regime hydrological network in the conditions of the climate change. *Issledovano v Rossii [Studies in Russia]* [Electronic resource]. 2004. Access regime: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/138.html>. – Date of access: 19.11.2005.
24. Volchek A.A. Regularities of the Belarus river catchments water balance formation: Formation of the water balance of Belarus. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 387 p.
25. Loginov V.F., Volchek A.A., Volchek An.A. Spring floods in the rivers of Belarus: Spatial/temporal fluctuations and forecast. Minsk: *Belaruskaya navuka [Byelorussian science]* 2014. 244 p.
26. Calculated hydrological characteristics. The order of procedure of determination. Technical code of the sustained practice TKP 45-3.04-168-2009(02250). Minsk: RUP “Stroytekhnorm”, 2010. 55 p.
27. Volchek A.A., Folitar G.V. Spatial correlation functions of the river runoff of Belarus. *Vodnoye khozyaystvo i gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Water sector and hydraulic facilities construction]*. Minsk, 1988. Vyp. 17. P. 12–16.

28. Pluzhnikov V.N., Fadeyeva M.V., Buchurin V.I. Water resources of Belarus, their use and protection. *Prirodniye resursy* [Natural resources]. No. 1. 1996. P. 24–29.
29. Volchek A.A., Parfomuk S.I. Water resources of the Republic of Belarus at the current stage. *Vestnik BGTU* [Newsletter of Brest State Technical University]. Hydraulic facilities construction, thermal power industry and geo/ecology. No. 2(68). 2011. P. 2–5.
30. Manual P1-98 to Sanitary regulations 2.01.14-83 “Determination of designed hydrological characteristics”. Minsk: *Ministerstvo arkhitektury i stroitelstva Respubliki Belarus* [Ministry of Architecture and Building of the Republic of Belarus], 2000. 174 p.
31. Byelorussian Encyclopedia: in 18 volumes. Edited by G. P. Paskov (Chief Editor) [et al]. Minsk: BelEn, 2002. V. 15. 552 p.
32. Volchek A.A., Sidak S.V., Parfomuk S.I. Spatial-temporal structure of average many-year annual runoff of the rivers of Belarus. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Newsletter of Brest State Technical university] No. 2 (125). 2021. P. 75–80.

Сведения об авторах:

Волчек Александр Александрович, д-р геогр. наук, профессор, кафедра природообустройства, Брестский государственный технический университет, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267, Республика Беларусь; ORCID: 0000-0002-8838-797X; e-mail: Volchak@tut.by

Лопух Петр Степанович, д-р геогр. наук, профессор, кафедра общего землеведения и гидрометеорологии, Белорусский государственный университета, г. Минск, 220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 16, Республика Беларусь; ORCID: 0000-0002-4063-7722; e-mail: lopuch49@mail.ru

About the authors:

Aleksandr A. Volchek, Professor, Doctor of Geographical Sciences, Chair of Nature Development, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 267, Brest, 220030, Republic of Belarus; ORCID: 0000-0002-4063-7722; e-mail: lopuch49@mail.ru

Petr S. Lopukh, Professor, Doctor of Geographical Sciences, Chair of General Earth Sciences and Hydro/meteorology, Belarus State University, ul. Leningradskaya, 16, Minsk, 220030, Republic of Belarus; ORCID: 0000-0002-4063-7722; e-mail: lopuch49@mail.ru