

TRANSFORMATION OF RIVERS STREAMFLOW OF BELARUS

Summary

An estimation of streamflow transformation in rivers of Belarus under present conditions influenced by natural fluctuations of flow and anthropogenic impacts, has been performed. On the whole, no sizeable changes in the annual streamflow have been found. At the time of spring floods, an average decrease in the maximum annual discharge in the territory of Belarus is 43%, while the increase in peak summer-autumn and winter yields are 27% and 36%, respectively.

Key words: rivers, streamflow, estimation of transformation, Belarus

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ

Резюме

В настоящей статье выполнена оценка трансформации водного стока рек Беларуси в современных условиях, вызванных его естественными колебаниями и антропогенным воздействием. Установлено, что значительных изменений годового стока в целом не произошло. Уменьшение максимального стока в период весеннего половодья в среднем по Беларуси составило 43%, а увеличение минимальных летне-осенних и минимальных зимних расходов воды - соответственно 27% и 36%.

Key words: реки, водной сток, оценка трансформации, Беларусь

TRANSFORMACJA SPŁYWU RZEK BIAŁORUSI

Streszczenie

W artykule przeprowadzono ocenę transformacji wodnego spływu rzek Białorusi w warunkach współczesnych, spowodowanych naturalnymi wahaniami i antropogenicznymi czynnikami. Nie stwierdzono w ocenianym okresie znaczących zmian. Zmniejszenie maksymalnego spływu w okresie wiosennych wylewów średnio na Białorusi nie przekroczyło 43%. Zwiększenie minimalnych letnio-jesiennych i minimalnych zimowych poziomów wodnych wyniosło odpowiednio 27% i 36%.

Słowa kluczowe: rzeki, spływ wodny, ocena transformacji wód, Białoruś

1. Введение

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 60-х годов прошлого столетия. При этом южная часть Беларуси (Белорусское Полесье) наиболее сильно подверглась мелиоративным воздействиям, что не могло не сказаться на речном стоке. Кроме того, существенное влияние оказывает наблюдаемое глобальное потепление климата, которое в ближайшее десятилетие в полной мере проявится в совокупности региональных изменений речных экосистем, которые являются чувствительным индикатором изменений как природных, так и антропогенных факторов.

Располагая необходимым объемом информации о стоке за продолжительный период – 1940 - 2004 гг. – по гидрометрическим постам и современными геоинформационными системами и технологиями, сегодня стало

возможным дать количественную оценку изменения стока рек и выявить нарушения во внутренней структуре временных рядов. Сопоставление этих нарушений с конкретными изменениями климатических факторов и хозяйственной деятельностью на водосборах рек дает возможность выявить конкретные реки и территории с измененным водным режимом, и объяснить вследствие чего произошли эти трансформации. Это, в свою очередь, позволит ответить на вопрос о роли мелиорации в изменениях водного режима и о сопоставимости этой роли с природными колебаниями элементов водного баланса. При этом важно рассматривать все виды речного стока воды, чтобы выяснить в комплексе происхождение этих изменений.

2. Материалы и методы исследования

Исходными данными послужили материалы наблюдений Департамента гидрометеорологии Минприроды Республики за годовыми расходами воды, максимальными расходами воды весеннего половодья, минимальными летне-осенними и минимальными зимними расходами воды по 164 речным створам Беларуси за период инструментальных наблюдений.

Для правильной оценки величин стока необходимо выделять антропогенные и естественные составляющие основываясь на выражении [1]:

$$M_{ест.} = M_{изм.} \pm \Delta M_{анеп.} \pm \Delta M_{клим.} \pm \Delta M_{антр.}, \quad (1)$$

где $M_{ест.}$ – величина стока, которая наблюдалась бы в условиях стационарного процесса; $M_{изм.}$ – измеренная (фактическая) величина стока за рассматриваемый период времени; $\Delta M_{анеп.}$ – естественные колебания стока, обусловленные аperiodическими колебаниями климата; $\Delta M_{клим.}$ – изменения стока, вызванные глобальным потеплением; $\Delta M_{антр.}$ – комплексная оценка влияния на сток хозяйственной деятельности в русле и на водосборе реки выше по течению.

Сложность практического использования формулы (1) связана с погрешностями определения и относительной неопределенностью ее составляющих.

Измеренный сток может отражать ошибки в фиксации скоростей и размеров сечения водного потока, то есть ошибки определения мгновенного расхода воды. Кроме того, возможны погрешности в подсчете объема стока за расчетный период, то есть погрешности в оценке колебаний стока в период между измерениями, а также от возможной деформации русла реки и эпюры скоростей.

Величина $\Delta M_{анеп.}$ обычно выступает в качестве поправки к средней величине стока за период исходя из его многолетней нормы. Упрощенно $\Delta M_{анеп.}$ можно определять, используя значения среднеквадратических погрешностей оценки нормы и вариации стока, но для этого требуется изучить особенности учета его режимных колебаний (сезонных и годовых).

Величина $\Delta M_{клим.}$ может быть выявлена по данным наблюдений, если достоверно определена вышеуказанная поправка, а элемент $\Delta M_{антр.}$ отсутствует.

Другим способом ее оценки может быть апробированная региональная модель типа «осадки, температура – сток», когда изменения климата считаются известными. Такие модели уже созданы для ряда речных бассейнов Беларуси [2].

Элементы $\Delta M_{анеп.}$ и $\Delta M_{клим.}$ по своему существу аналогичны. Но если естественные колебания климата и вызванные этим колебания стока по территории отчетливо асинхронны, то изменения стока, вызванные изменением климата должны иметь более универсальный однонаправленный характер для большой территории. Это открывает возможность разделения их вклада. В последние десятилетия, когда климатическое влияние стало существенным, требуется найти территориально общую закономерность в климате и стоке, которая дает оценку величины $\Delta M_{клим.}$.

Элемент $\Delta M_{антр.}$ отражает совокупное (в том числе разнонаправленное, компенсационное) влияние на сток хозяйственной деятельности на поверхности водосбора. Ввиду малого распространения инструментальных наблюдений за водопользованием и других объективно существующих причин, определение величины $\Delta M_{антр.}$ связано с большими погрешностями, результирующее значение которых отражает вклад ошибок всех

составляющих водохозяйственного баланса. Упрощенной оценкой изменений стока служит отношение $\Delta M_{антр.} / M_{изм.}$. Если оно меньше 1–3%, эта величина без потери точности является несущественной. В противном случае требуется развернутый анализ достоверности составляющих и исключение элемента $\Delta M_{антр.}$ путем восстановления стока по данному фактору.

Исходя из вышесказанного, нами разработана методика оценки антропогенной составляющей изменения стока, основанная на анализе статистической структуры полей стока. Суть методики заключается в оценке различий пространственных корреляционных функций (ПКФ), построенных по временным рядам стока за периоды до и за время активного антропогенного воздействия [3].

Средняя квадратическая суммарная погрешность исходных величин объективно выявляется с помощью отраженной эмпирической корреляционной функции пространственной $R(\rho)$ или временной $R(\tau)$ по экстраполированному значению $R(0)$, отвечающему нулевому расстоянию $\rho = 0$ или нулевому сдвигу во времени $\tau = 0$.

При измерении гидрологической величины с весьма малым шагом времени или расстояния ($\Delta\tau$, $\Delta\rho$), которые существенно меньше периода мелких колебаний типа «белого шума» ($\Delta\tau^*$, $\Delta\rho^*$), т.е. $\Delta\tau \ll \Delta\tau^*$ и $\Delta\rho \ll \Delta\rho^*$, то в этом случае погрешности из-за дискретности измерения будут близки к нулю.

Исходя из независимости различных видов погрешностей, дисперсия суммарной погрешности равна сумме дисперсий этих погрешностей. Средняя квадратическая погрешность, вызванная антропогенными факторами, определяется как:

$$\sigma_{антр.} = (\sigma_{ест.}^2)^{0,5} - (\sigma_{изм.}^2 + \sigma_{анеп.}^2 + \sigma_{клим.}^2)^{0,5} = \sigma_{\Delta} \dot{M} (R(0) - R(0)^*)^{0,5} \quad (2)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение исходных значений гидрологической величины; $R(0)$, $R(0)^*$ – экстраполированное значение эмпирической ПКФ, построенных по данным о стоке соответственно до и после антропогенных воздействий.

Значимость полученной величины $\sigma_{антр.}$ оценивается на основе известных статистических критериев. Если установлено, что $\sigma_{антр.}$ вызвана не случайными ошибками, зависящими от длины ряда, то величина $\Delta M_{антр.}$ характеризует антропогенную составляющую стока территории.

Выявление конкретных водосборов, подверженных антропогенным колебаниям, проводится посредством анализа изменений парных коэффициентов корреляции, и выявляются водосборы со статистически различными изменениями этих коэффициентов.

Априори необходимость решения задачи (1) обосновывалась анализом однородности исходного ряда гидрометрических наблюдений графическими и статистическими методами. Далее выявлялась дата перелома во временном ходе процесса стока, причины и параметры изменения во времени антропогенных факторов, которые могли его вызвать.

Изменение стока за счет хозяйственной

деятельности $\Delta M_{хоз.}$ определяется по разности:

$$\Delta M_{хоз.} = M_{ест.} - M_{изм.} \quad (3)$$

Результаты оценки антропогенных изменений можно считать достоверными, если их абсолютная величина значительно больше погрешности расчета:

$$|\Delta M_{хоз.}| \geq \alpha_p \cdot \Delta M_{хоз.}, \quad (4)$$

где α_p – доверительный интервал погрешности расчета в долях его среднеквадратического значения, зависящий от доверительной вероятности p .

При оценке достоверности расчета обычно принимается $p=0,95$, для которого $\alpha_{p0,95} \approx 2,0$.

Статистическим расчетам предшествовал специальный анализ исходной гидрологической информации с точки зрения ее однородности. Когда же было установлено, что имеет место нарушение в пределах критических статистик, в процедуру расчетов дополнительно включались стандартные статистические методы, а именно:

– для выявления тенденций изменений использовались хронологические графики колебаний и разностные интегральные кривые;

– динамика изменения временных рядов оценивалась с помощью линейных и квадратических трендов.

Для оценки различий в статистических параметрах использовались критерии Стьюдента и Фишера.

После всестороннего анализа временные ряды наблюдений были разбиты на два периода: с начала наблюдений по 1965 год включительно (начало крупномасштабных мелиораций) и с 1966 по 2004 гг. При этом выбраковывались ряды с периодом наблюдений менее 15 лет хотя бы за один из периодов. После выбраковки определены величины изменения стока по соотношению [4]

$$k_i = (Q_{cp2} - Q_{cp1}) / \bar{Q}, \quad (5)$$

где Q_{cp1} , Q_{cp2} и \bar{Q} – средние значения стока за период до 1965 г., с 1966 по 2004 гг. и средняя величина стока за весь период наблюдений, соответственно.

3. Полученные результаты и их обсуждение

Основными факторами хозяйственной деятельности на речных водосборах Беларуси являются осушение болот и заболоченных земель, русловое регулирование, промышленно-коммунальное и сельскохозяйственное водоснабжение, агролесомелиоративные мероприятия. Анализ однородности временных рядов изменения стока позволил выявить реки (таб.), где антропогенные воздействия были наиболее существенными

(изменение площади водосбора, перераспределение стока, зарегулированность и др.) и которые не были включены в процесс картирования из-за нарушенного водного режима. Характер этих изменений представлен на рис. 1.

Здесь можно отметить р. Вить – с. Борисовщина, ряды расходов которой для всех видов стока оказались наиболее существенно трансформированными, что связано, прежде всего, с изменением водосборной площади. Нарушенная структура ряда максимальных расходов весеннего половодья р. Виляя – с. Вилейка объясняется аккумуляцией части стока в водохранилищах и его переброской в Вилейско-Минскую водную систему. Остальные реки, приведенные в таблице, также относятся к малым рекам, а как известно эти реки наиболее чувствительны к антропогенным воздействиям.

Значения k_i , рассчитанные по формуле (5) были картированы (рис. 2-5) с использованием координат центров водосборов исследуемых рек-створов.

Анализ пространственной структуры изменения годового стока (рис. 2) показывает, что в северной и центральной частях Беларуси, менее подверженных мелиоративным воздействиям, изменений годового стока практически не произошло. В северо-западной части расходы воды незначительно уменьшились за период 1966–2004 гг. В то время как для южной и юго-западной частей Беларуси произошло увеличение годового стока за период 1966–2004 гг. по сравнению с периодом до 1965 г. В целом, изменения годового стока являются незначительными – среднее значение коэффициента изменения составило 2,7%, что находится в пределах ошибки измерения расходов. В то же время, для рек Белорусского Полесья эти изменения оказались более значимыми – среднее значение коэффициента изменения составило 0,201, что позволяет говорить о 20% увеличении значений годового стока. Таким образом, крупномасштабные мелиорации внесли вклад в увеличение годового стока малых рек Белорусского Полесья путем частичной сработки вековых запасов воды верхних горизонтов земной поверхности и перераспределения соотношений между составляющими водного баланса.

Для максимальных расходов воды весеннего половодья среднее значение коэффициента изменения стока составило -0,425, для минимальных расходов летне-осенней межени 0,271, для минимальных зимних расходов 0,356, т.е. в среднем по Беларуси, наблюдается уменьшение максимальных расходов весеннего половодья на 43%, увеличение минимальных расходов летне-осенней межени на 27% и минимальных зимних на 36%.

Таблица. Реки-створы с существенно нарушенной внутренней структурой ряда
Table. Rivers-Sections with Essentially Disturbed Inner Structure of Historical Series

Вид стока	Реки-створы	Изменение стока (формула 5)
Годовой	Копаявка – с. Черск	-0,61
	Вить – с. Борисовщина	-0,57
Максимальный весеннего половодья	Виляя – с. Вилейка	-1,03
	Бобрик – ст. Парохонск	0,14
	Вить – с. Борисовщина	0,20
Минимальный летне-осенней межени	Жабинка – с. М.Жабинка	1,42
	Вить – с. Борисовщина	1,20
Минимальный зимний	Ржавка – с.Черная Вирня	1,60
	Вить – с. Борисовщина	1,34

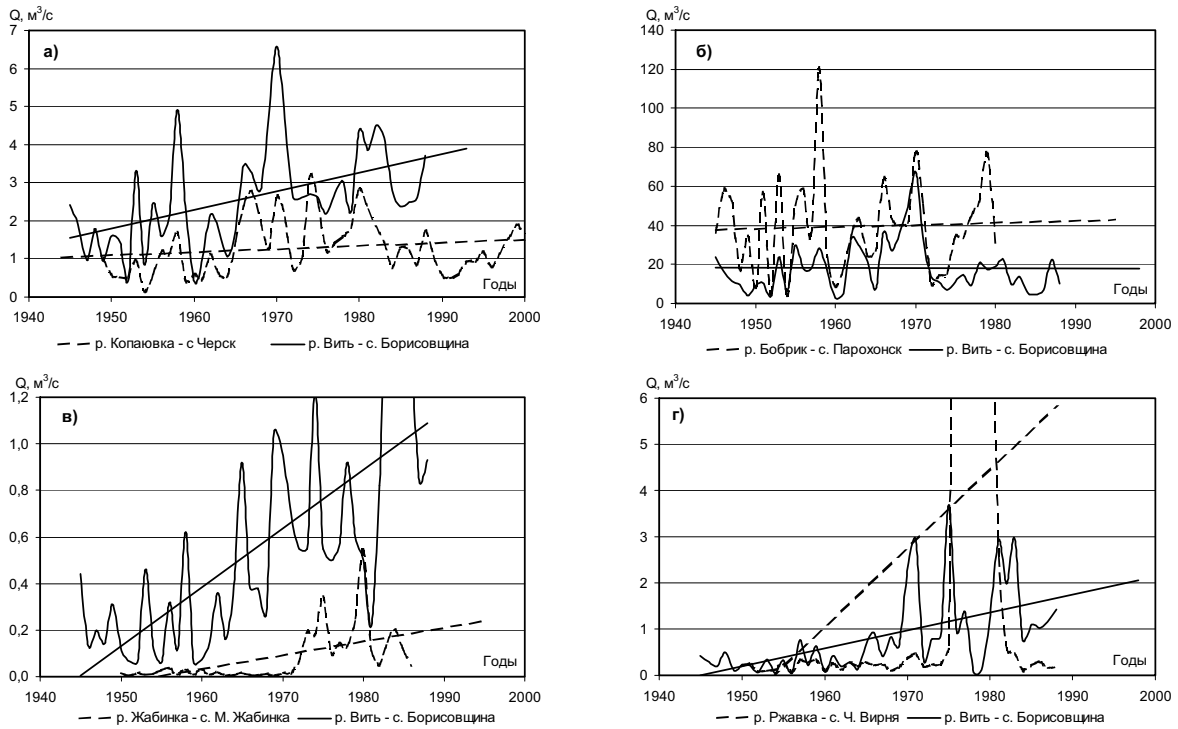


Рис. 1. Хронологические графики и тренды расходов воды рек с наиболее нарушенной внутренней структурой рядов: а – годовых; б – максимальных весеннего половодья; в – минимальных летне-осенней межени; г – минимальных зимней межени

Fig. 1. Chronological charts of, and trends in, discharges for rivers with the most disturbed inner structure of time-series: a – annuals; b – spring-flood maxima; c – summer-autumn low-water minima; d – winter low-water minima

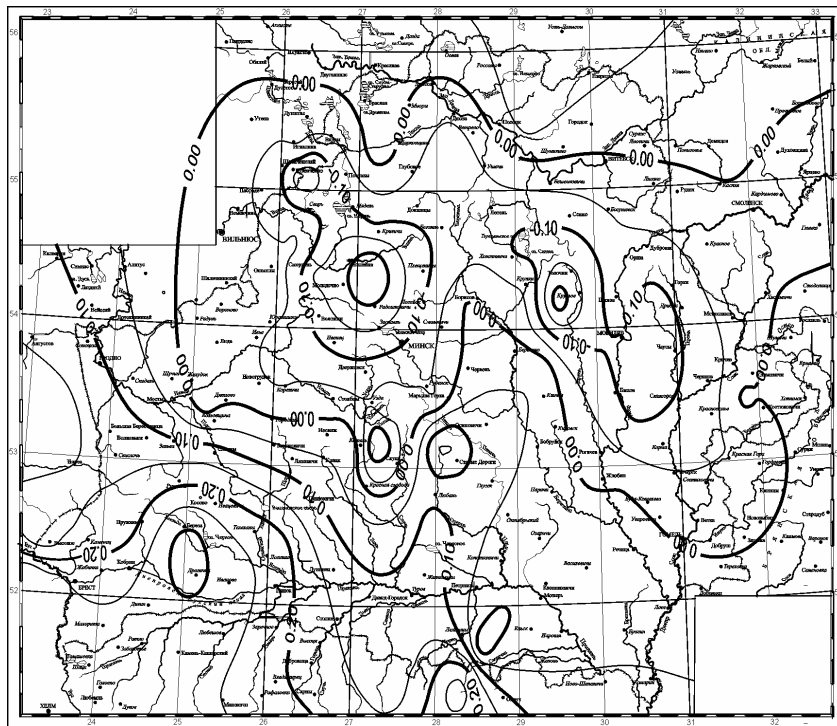


Рис. 2. Пространственная структура изменения среднегодовых расходов воды рек Беларуси

Fig. 2. Spatial structure of fluctuations in annual mean discharges for rivers in Belarus

Исследования максимального весеннего половодья, минимального летне-осеннего и минимального зимнего стока рек Беларуси позволили выявить следующие нарушения внутренней структуры временных рядов: – уменьшение максимальных расходов после 1965 г. (до 25–40%) по всей территории Беларуси (рис. 3);

– существенное (до 50–80%) увеличение минимального стока летне-осенней межени для южной и юго-западной частей Беларуси за период 1966–2004 гг. по сравнению с периодом до 1965 г., в то время как для северной и центральной частей Беларуси эти изменения не столь значительны (10 – 30%) (рис. 4);

– минимальные зимние расходы в целом увеличились на 20–40% по сравнению с периодом до 1965 г., при этом эти максимум этих изменений характерен для Белорусского Полесья (60–80%) (рис. 5).

Увеличение стока зимней межени вызвано участвовавшими в последнее время длительными оттепелями, в течение которых происходит интенсивное таяние снега и пополнение запасов грунтовых вод. В результате сток весеннего половодья уменьшается, а расходы летне-осенней межени увеличиваются.

Для оценки влияния крупномасштабных мелиораций на водный режим рек Белорусского Полесья выполнен анализ изменения ПКФ, построенных за периоды: с момента наблюдений до 1966 г., как начала крупномасштабного мелиоративного строительства, и с 1966 г. – по настоящее время, построенных по 26 гидрометрическим створам на реках с площадями водосборов от 67 до 2560 км². Расчеты выполнены для трех характерных расходов: максимальных расходов воды весеннего половодья (В), минимальных летне-осенних расходов воды (Л) и годовых расходов воды (Г) (рис. 6).

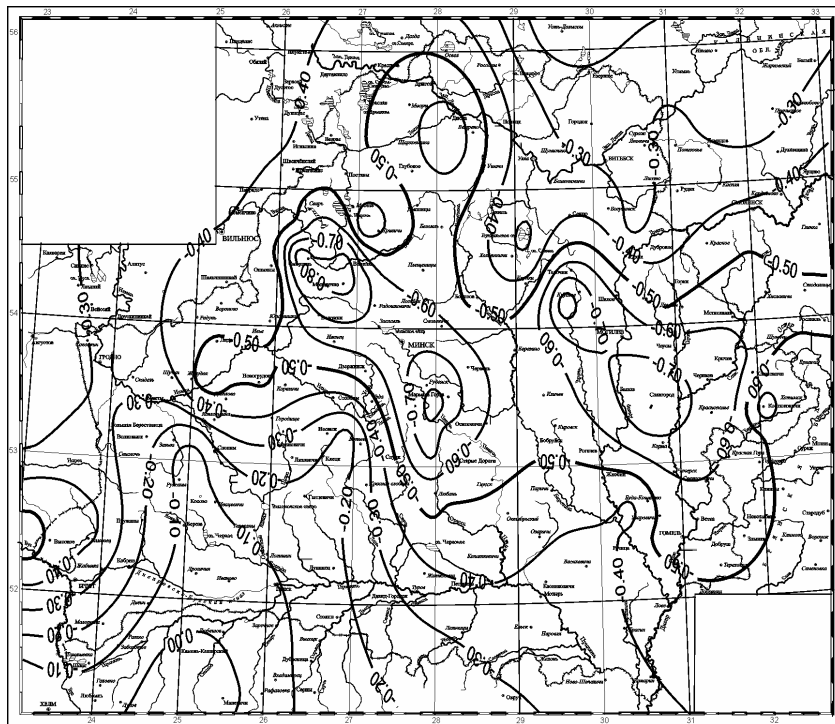


Рис. 3. Пространственная структура изменения максимальных расходов воды весеннего половодья рек Беларуси
 Fig. 3. Spatial structure of fluctuations in discharge maxima during spring floods for rivers in Belarus

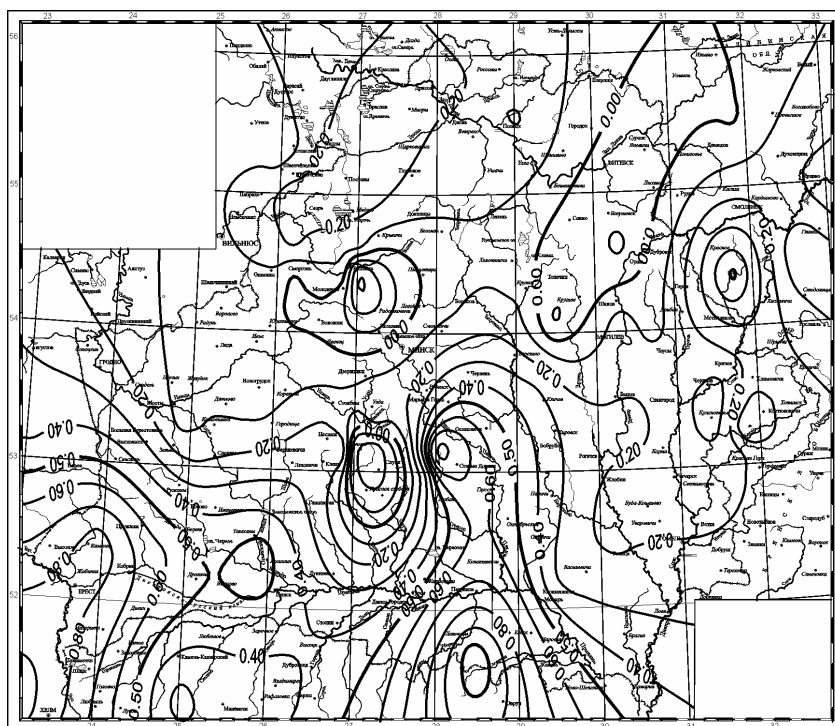


Рис. 4. Пространственная структура изменения минимальных летне-осенних расходов воды рек Беларуси
 Fig. 4. Spatial structure of variations in summer-autumn discharge minima for rivers in Belarus

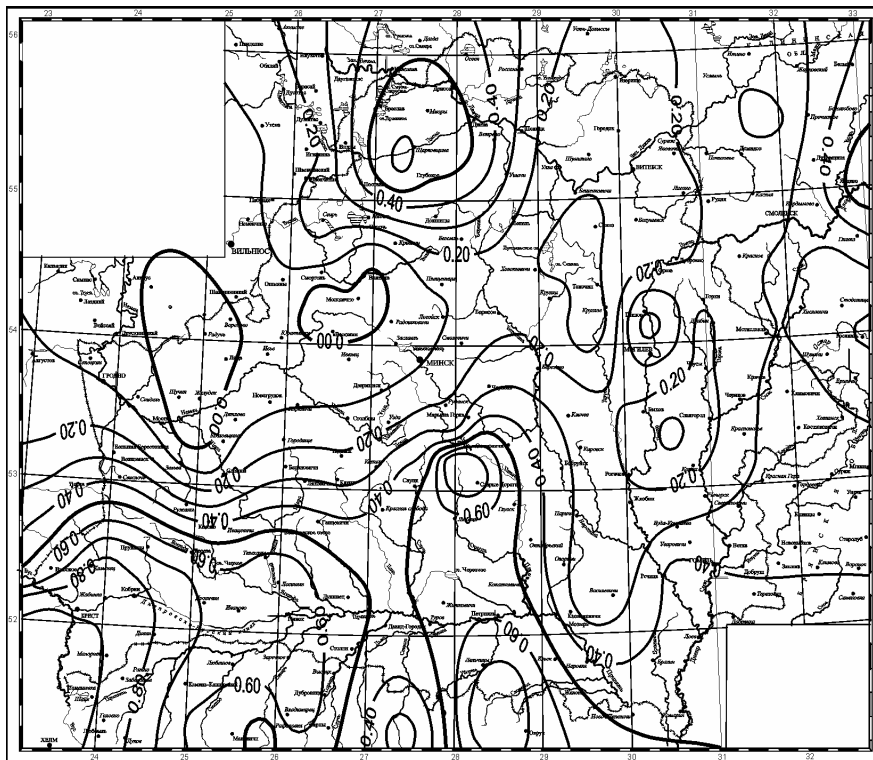


Рис. 5. Пространственная структура изменения минимальных зимних расходов воды рек Беларуси
 Fig. 5. Spatial structure of variations in winter discharge minima for rivers in Belarus

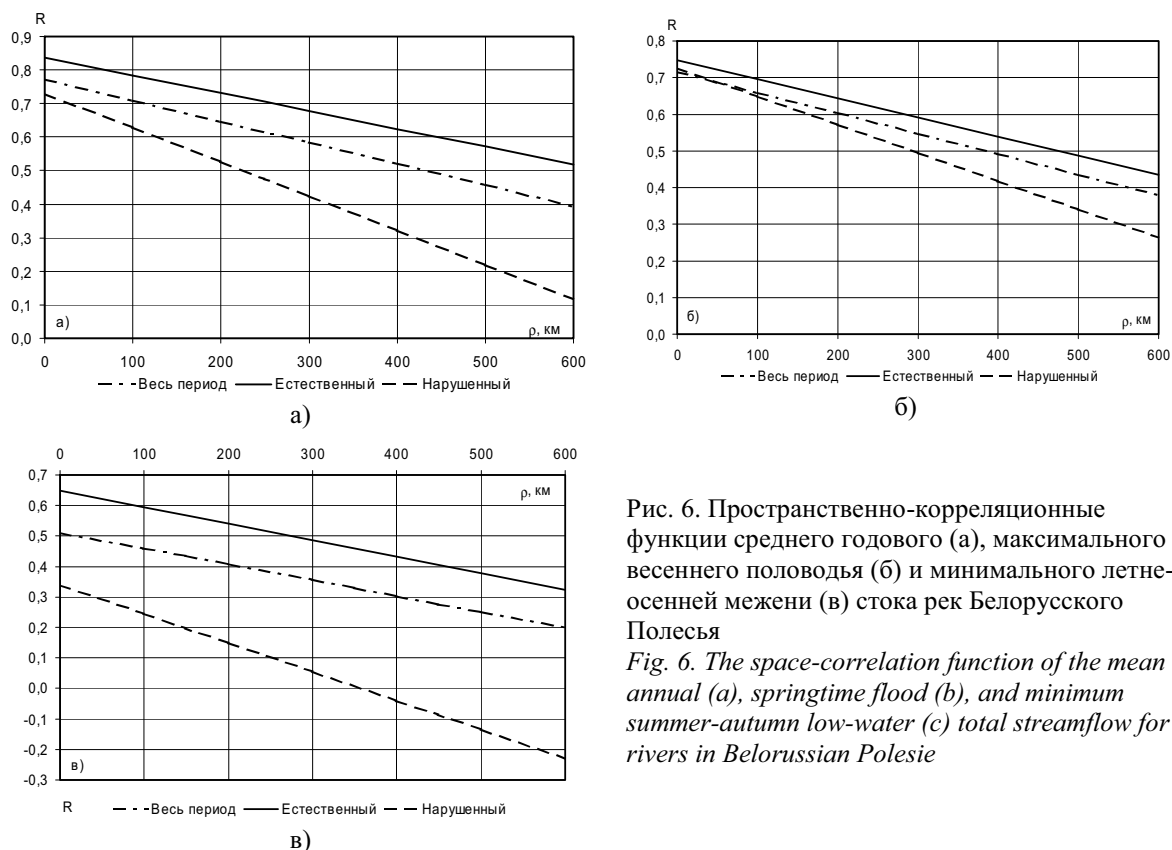


Рис. 6. Пространственно-корреляционные функции среднего годового (а), максимального весеннего половодья (б) и минимального летне-осенней межени (в) стока рек Белорусского Полесья

Fig. 6. The space-correlation function of the mean annual (a), springtime flood (b), and minimum summer-autumn low-water (c) total streamflow for rivers in Belorussian Polesie

Случаи обнаружения статистически различных изменений коэффициентов корреляции свидетельствуют о наличии антропогенных воздействий. Так, сравнение ПКФ для периода, не подвергнутого мелиоративным воздействиям ($R(0)_в = 0,774$; $R(0)_л = 0,687$; $R(0)_г = 0,853$), с ПКФ для периода крупномасштабного мелиоративного строительства

($R(0)_в^* = 0,734$; $R(0)_л^* = 0,351$; $R(0)_г^* = 0,742$) указывает на статистически значимые различия между ними ($\Delta R(0)_в = 0,040$; $\Delta R(0)_л = 0,326$; $\Delta R(0)_г = 0,111$).

Различия наиболее существенны для минимального стока (47,5%), что может быть связано с изменением общей водности рек, величины водосборной площади, размера площади осушенных болот и заболоченных

земель, густоты осушительной сети и степени канализации. В Полесье преобладают мелкозалежные торфяники на хорошо проницаемых песках, глубокая дренажная осушительная сеть и канализованные русла рек врезаются в подстилающий грунт, поэтому здесь отмечается существенное увеличение минимального стока (приблизительно на 50%) за период 1966 – 2004 гг. по сравнению с периодом с начала наблюдений до 1966 г.

На начальном этапе мелиоративных воздействий изменение максимального стока происходило неоднозначно. На тех водосборах, где произошло нарушение однородности рядов максимальных расходов воды и слоев стока, наблюдалось как увеличение значений, так и снижение. Это вызвано тем, что в результате проведения мелиоративных работ на водосборе создается сложное сочетание различных условий, оказывающих разнонаправленное воздействие на формирование максимального стока рек в период весеннего половодья. Значительное увеличение аккумулирующей емкости осушенных площадей на водосборе вызывает потерю талых вод и уменьшение максимальных расходов, а искусственное увеличение густоты гидрографической сети одновременно с регулированием рек способствует формированию повышенных максимальных расходов. В связи с тем, что оба фактора действуют одновременно, то характер и величина изменения максимального стока зависит от того фактора, влияние которого более существенно.

После установления равновесного состояния отмечается стабильное уменьшение максимального стока (приблизительно на 25%), при этом оно происходит более «организованно» как во времени, так и в пространстве, в отличие от процессов увеличения минимального стока. Поэтому отмечается незначительное уменьшение значения коэффициента корреляции $R(0)_в - 5,2\%$.

Максимальное изменение годового стока происходит на водосборах, расположенных в пределах плоских низменностей, а также с широкими заболоченными поймами. Чем больше была заболоченность водосбора, тем больше величина изменения годового стока после мелиорации. Она увеличивается и с увеличением доли осушенных болот и заболоченных земель. Согласно результатам наших исследований для территории Белорусского Полесья произошло увеличение годового стока за период 1966–2004 гг. по сравнению с периодом до 1965 г. приблизительно на 20%. При этом изменение параметра $R(0)_г$ составило 13%.

4. Выводы

Таким образом, основными причинами трансформации стока воды рек Беларуси являются последствия глобального изменения климата, происходящие на фоне антропогенных воздействий в виде крупномасштабных осушительных мелиораций Белорусского Полесья. Влияние антропогенной составляющей (например, мелиорации) на различные виды стока должно рассматриваться в каждом конкретном случае индивидуально.

Изменения стока имеют разнообразный характер, при этом наблюдается определенная внутригодовая трансформация водного режима рек Беларуси. Произошедшее снижение максимальных расходов воды весеннего половодья компенсируется существенным увеличением минимальных расходов, как зимних, так и летне-осенней межени. То есть, глобальные климатические изменения привели к изменению стока внутри гидрологического года, в то время как средний годовой сток количественно практически не изменился, за исключением территории Белорусского Полесья, имеющей отличные от других районов Беларуси условия формирования стока и уровень антропогенной нагрузки.

Исходя из этого, не стоит преувеличивать роль осушительных мелиораций в изменении водного режима рек, более того не столько само осушение, сколько некорректная эксплуатация мелиоративных систем и водохозяйственная деятельность в водосборах рек нарушила внутреннюю структуру формирования стока и привела к тем количественным изменениям расходов воды, которые выявлены в процессе данного исследования.

5. Литература / References

- [1] Pluzhnikov V. N., Makarevich A. A., Petlicky E. E.: Ocenka i prognoz resursov poverhnostnyh vod i ih izmenenij pod vliyaniem hozyajstvennoj deyatel'nosti (metodicheskoe rukovodstvo). Minsk, 1994. 56 pp.
- [2] Volchek A. A.: Issledovanie srednennogoletnego stoka malyh rek Belarusi metodom vodnogo balansa. Brestskij geografičeskij vestnik, tom IV, vypusk 1. Brest, 2004. p. 19-25.
- [3] Volchek A. A.: Issledovanie prostranstvenno-vremennyh kolebanij elementov vodnogo balansa (na primere Byelorussii). Avtoref. ... kand. geogr. nauk. M., 1988, 24 pp.
- [4] Volchek A. A., Luksha V. V.: Prostranstvennaya struktura izmeneniya godovogo stoka rek Belarusi. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Ekologičeskie problemy Poles'ya i sopredel'nyh territorij». Gomel': Izdvo GGU im. F. Skoriny, 2003, p. 32–34.