



УДК 556.(476)

**А.А. Волчек<sup>1</sup>, Л.В. Образцов<sup>2</sup>, С.И. Парфомук<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>д-р геогр. наук, проф., декан факультета инженерных систем и экологии  
Брестского государственного технического университета

<sup>2</sup>канд. тех. наук, доц., доц. каф. экономики и организации строительства  
Брестского государственного технического университета

<sup>3</sup>канд. тех. наук, доц., зав. каф. информатики и прикладной математики  
Брестского государственного технического университета

## **ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ БЕЛАРУСИ И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ**

*В работе приведена уточненная количественная оценка поверхностных водных ресурсов Республики Беларусь с учетом современных климатических колебаний и антропогенных воздействий и построена карта среднего многолетнего стока годового модуля стока рек. В целом водные ресурсы практически не изменились, но произошло их перераспределение по территории. На основании тенденций в колебаниях основных климатических параметров с использованием метода гидролого-климатических расчетов, получены прогнозные оценки возможных изменений водных ресурсов в будущем.*

### **Введение**

Водным ресурсам присуща динамика, а их комплексное и рациональное использование невозможно без прогноза колебаний и изменений во времени. Характер колебаний водных ресурсов определяется климатическими факторами, но, начиная со второй половины XX в., роль антропогенной составляющей в ряде случаев становится соизмеримой с природными воздействиями. Таким образом, можно констатировать, что конец XX – начало XXI вв. характеризуется направленной климатической изменчивостью и повышением антропогенной нагрузки на сток рек, особенно малых. Это не могло не сказаться на факторах формирования стока малых рек, их гидрологическом режиме и гидроэкологическом состоянии. Кроме того, воздействия антропогенных факторов на водный режим рек имеют как разнонаправленный характер, что взаимно компенсируется их влияние, так и однонаправленный, что, в свою очередь, усиливает трансформацию водного режима.

Общее количество рек, протекающих по территории Беларуси, составляет около 20,8 тыс. Около 45% рек относится к бассейну Балтийского моря; это реки водосборов Зап. Двины, Немана и Зап. Буга. Остальные 55% приходятся на реки бассейна Черного моря, к которому относятся водосборы Днестра, Припяти, Березины и Сожа.

Основные гидрологические характеристики речного стока не являются стабильными величинами. Под влиянием и при участии комплекса разнообразных по генезису и динамике факторов они непрерывно изменяются как по территории, так и во времени. В настоящее время на территории Беларуси гидрологический режим водных объектов определяется не только естественными колебаниями метеорологических элементов, но и антропогенными факторами. При этом роль последних с каждым годом усиливается, несмотря на некоторый экономический спад в стране, недоучет их может привести к значительным ошибкам при определении расчетных параметров.

Целью настоящего исследования является современная количественная оценка поверхностных водных ресурсов Республики Беларусь и прогнозная оценка их изменений в будущем.



### Исходные данные и методика исследований

В качестве исходных данных использованы материалы наблюдений Департамента гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по действующим гидрологическим постам за период инструментальных наблюдений, опубликованные в материалах государственных кадастров. Оценка водных ресурсов Беларуси осуществлялась с использованием данных по 120 гидрологическим постам, равномерно расположенным по территории Беларуси. Для получения сопоставимых результатов выбран единый 50-летний расчетный период: с 1960 по 2009 гг. Отобранные временные ряды проверялись на однородность, пропущенные значения были восстановлены стандартными методами с оценкой их достоверности.

В ходе исследования использовалась климатическая информация, а именно: временные ряды наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками и дефицитами влажности воздуха с 1950 по 2009 гг. по 40 метеостанциям Беларуси, расположенным по исследуемой территории равномерно.

Для прогнозных оценок изменения водного режима рек Беларуси адаптирован метод гидролого-климатических расчетов (ГКР), предложенный В.С. Мезенцевым, основанный на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов [4]. Положив в основу гидролого-климатическую гипотезу, мы разработали многофакторную модель, включающую стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом разрезе. Разработанная модель использована для оценки возможных изменений водных ресурсов рек Беларуси в зависимости от тех или иных гипотез климатических колебаний и антропогенных воздействий на характеристики водосборов.

Уравнение водного баланса речного водосбора за некоторый промежуток времени имеет вид:

$$Y_k(I) = H(I) - Z(I) \pm \Delta W(I), \quad (1)$$

где  $Y_k(I)$  – суммарный климатический сток;  $H(I)$  – суммарные ресурсы увлажнения;  $Z(I)$  – суммарное испарение;  $\Delta W(I)$  – изменение влагозапасов деятельного слоя почвогрунтов;  $I$  – интервал осреднения.

Суммарное испарение находится по формуле

$$Z(I) = Z_m(I) \left[ 1 + \frac{\left( \frac{Z_m(I)}{W_{HB}} + V(I)^{1-r(I)} \right)^{n(I)}}{\left( \frac{KX(I) + g(I)}{W_{HB}} + V(I) \right)^{n(I)}} \right]^{\frac{1}{n(I)}}, \quad (2)$$

где  $Z_m(I)$  – максимально возможное суммарное испарение;  $W_{HB}$  – наименьшая влагоемкость почвы;  $V(I) = W(I)/W_{HB}$  – относительная влажность почвогрунтов на начало расчетного периода;  $KX(I)$  – сумма измеренных атмосферных осадков;  $g(I)$  – грунтовая составляющая водного баланса;  $r(I)$  – параметр, зависящий от водно-физических свойств и механического состава почвогрунтов;  $n(I)$  – параметр, учитывающий физико-географические условия стока.

Относительная влажность почвы на конец расчетного периода определяется из соотношений



$$V(I+1) = V(I) \cdot \left( \frac{V_{cp}(I)}{V(I)} \right)^{r(I)} ; \quad (3)$$

$$V_{cp}(I) = \left( \frac{\frac{KX(I) + g(I)}{W_{HB}} + V(I)}{\frac{Z_m(I)}{W_{HB}} + V(I)^{1-r(I)}} \right)^{\frac{1}{r(I)}} . \quad (4)$$

Максимально возможное суммарное испарение находится по методике, описанной в работе [1]. Суммарные ресурсы увлажнения определяются как

$$H(I) = KX(I) + W_{HB}(V(I) - V(I+1)) . \quad (5)$$

Решение системы уравнений (1) – (5) осуществляется методом итераций до тех пор, пока значение относительной влажности на начало расчетного интервала не будет равно значению относительной влажности на конец последнего интервала. При расчете начальное значение влажности принимается равным значению наименьшей влагоёмкости, т.е.  $W(1) = W_{HB}$ , откуда  $V(1) = 1$ .

Корректировка климатического стока осуществляется с помощью коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов на формирование руслового стока.

Моделирование водного баланса исследуемой реки реализовано в виде компьютерной программы и осуществляется в два этапа. На первом этапе производится настройка модели по известным составляющим водного и теплового балансов исследуемой реки или реки-аналога с учетом сходства формирования водного режима рек в зависимости от поставленной задачи. При настройке модели преследуется цель достичь наибольшего совпадения рассчитанного климатического и наблюдаемого руслового стоков. Первый этап заканчивается оценкой ошибок моделирования. Полученные параметры модели используются при проведении численного эксперимента.

Второй этап представляет собой непосредственный расчет водного баланса исследуемой реки с использованием параметров, полученных при калибровке модели. Расчет элементов водного баланса исследуемой реки производится с учетом конкретных особенностей рассматриваемого водосбора [2].

Результаты моделирования свидетельствуют о высокой точности расчета водного баланса как для практического применения, так и для теоретических исследований, что проверено на большом количестве рек Беларуси с площадью водосбора не более 1 000 км<sup>2</sup>, на которых ведутся гидрометрические наблюдения. Таким образом, программа «Баланс» при наличии данных об атмосферных осадках, температуре воздуха, дефицитах влажности воздуха на расчетный период и современных значениях стока воды реки, а также гидрографических характеристиках водосбора позволяет получить прогнозные оценки водного баланса малых рек Беларуси на расчетную перспективу.

В качестве характеристики изменений компонентов климата на перспективу до 2020 г. использованы линейные и нелинейные тренды. Использовались временные ряды наблюдений за период с 1986 (начало роста средних годовых температур воздуха) по 2009 гг. с месячной дискретностью. Для этого периода строились линейные тренды для месячных и годовых величин атмосферных осадков, температуры воздуха и дефицитов влажности воздуха, а полученные параметры использовались для получения средних месячных и годовых величин на период до 2020 г. При этом статистическая значимость средней скорости изменений основных климатических характеристик оце-



нивалась по доле дисперсии и коэффициенту детерминации. В дальнейшем в расчетах использовались только статистически значимые тренды. Смоделированные средние значения месячных величин на период до 2020 г. увязывались с годовыми величинами. При распределении невязки суммарных месячных и годовых величин предпочтение отдавалось годовым величинам, а невязка распространялась пропорционально абсолютным значениям месячных величин.

### Современное состояние водных ресурсов Беларуси

Естественные ресурсы речных вод Беларуси по бассейнам основных рек и административным районам, вычисленные за период 1960–2009 гг., и их изменения по отношению к данным, приведенным в [5], представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

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 Зап. Двины отмечено уменьшение поверхностных вод остальных речных систем страны за последние годы. Отмечен рост ресурсов поверхностных вод Брестской и Гомельской областей, а для Гродненской области характерно уменьшение водных ресурсов ввиду снижения водности Немана и Ви́лии. Изменения объемов стока рек и гидрологического режима в современных условиях вызваны в основном усилением интенсивности общей циркуляции атмосферы, что наглядно показано в работе.

Таблица 1. – Водные ресурсы Беларуси по бассейнам основных рек в 1960–2009 гг. (числитель) и их изменения по отношению к данным, приведенным в [5], (знаменатель) км<sup>3</sup>

Речной бассейн	Речной сток, км <sup>3</sup> /год									
	Местный					Общий				
	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
Ви́лия	<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 2. – Водные ресурсы Беларуси по областям в 1960–2009 гг. (числитель) и их изменения по отношению к данным, приведенным в [5] (знаменатель), км<sup>3</sup>

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

В таблице 3 приведены естественные водные ресурсы Беларуси с учетом асинхронности стока рек, которая определяется генетическими особенностями формирования осадков, выпадающих на водосбор. Даже для относительно небольших территорий Беларуси сток в целом по стране отличается от суммы стока по бассейнам основных рек по причине более существенной асинхронности стока на всей территории страны, 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.

Таблица 3. – Естественные водные ресурсы Беларуси с учетом асинхронности

Речной бассейн	Речной сток, км <sup>3</sup> /год							
	Местный				Общий			
	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

Ранее для территории Беларуси было построено несколько карт среднего годового стока воды рек: в 1966, 2000 и 2002 гг.

С целью уточнения водных ресурсов Беларуси построена карта среднегодового модуля стока рек Беларуси, представленная на рисунке 1.

При построении карты 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,





что обосновано в работе [4]. Использование современных компьютерных технологий при построении карты среднего годового стока позволило исключить субъективизм авторов. Приведенная на рисунке 1 карта представляет собой оптимальное сочетание нескольких способов построения карт, использующих различные методы интерполяции и выполненных в разных программных системах. Наличие необходимого количества постов наблюдения за стоком, единого периода наблюдений и применение компьютерных технологий позволило получить объективную картину формирования среднего годового стока рек Беларуси в современных условиях.

Для рек бассейна Зап. Двины характерно несущественное увеличение значений стока. Для бассейнов Немана и Вилии, наоборот, выявлено 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 выявлены как уменьшение, так и увеличение значений изолиний модуля среднего годового стока.

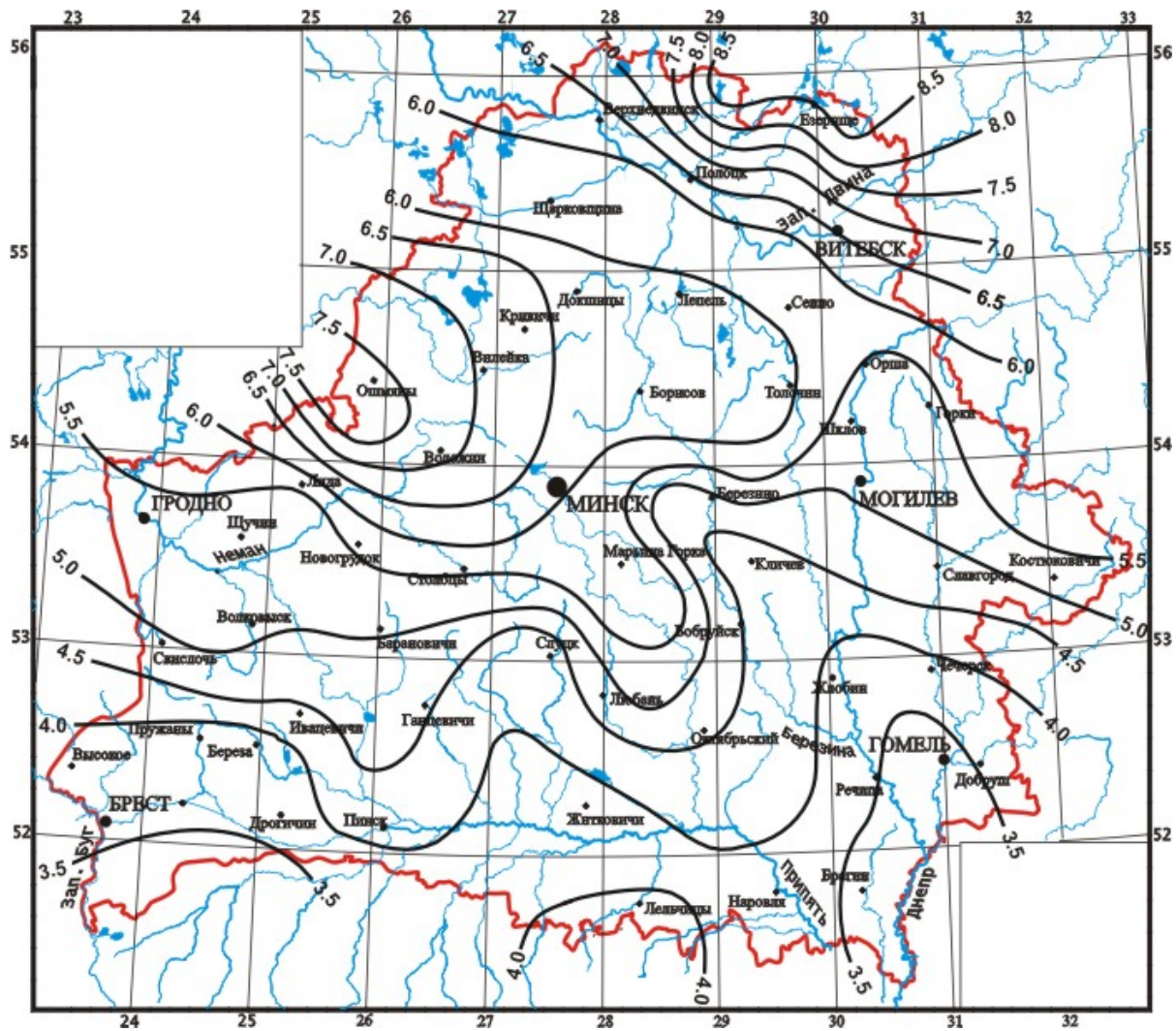


Рисунок 1. – Карта среднего годового стока рек Беларуси за период 1960–2009 гг., л/(с·км<sup>2</sup>)



### Прогнозные оценки изменения стока рек Беларуси

С помощью математических моделей ряды наблюдений за месячными значениями температуры воздуха, атмосферными осадками и дефицитами влажности воздуха были продлены на период до 2020 г., по которым получены значения математического ожидания на 2020 г. Установлено, что тренд средней годовой температуры воздуха составляет  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет, среднегодовых значений атмосферных осадков  $20\text{ мм}/10$  лет, среднегодовых значений дефицитов влажности воздуха  $0,21\text{ мб}/10$  лет (1985–2009 гг.). Существенно изменилась за это время внутригодовая структура рассмотренных климатических параметров, что особенно характерно для января, июля и сентября.

Анализ возможного изменения речного стока в зависимости от прогнозируемого изменения климата на период до 2020 г. показал, что прослеживается достаточно четкая тенденция к возможному изменению речного стока в направлении с северо-запада на юго-восток страны (рисунок 2).

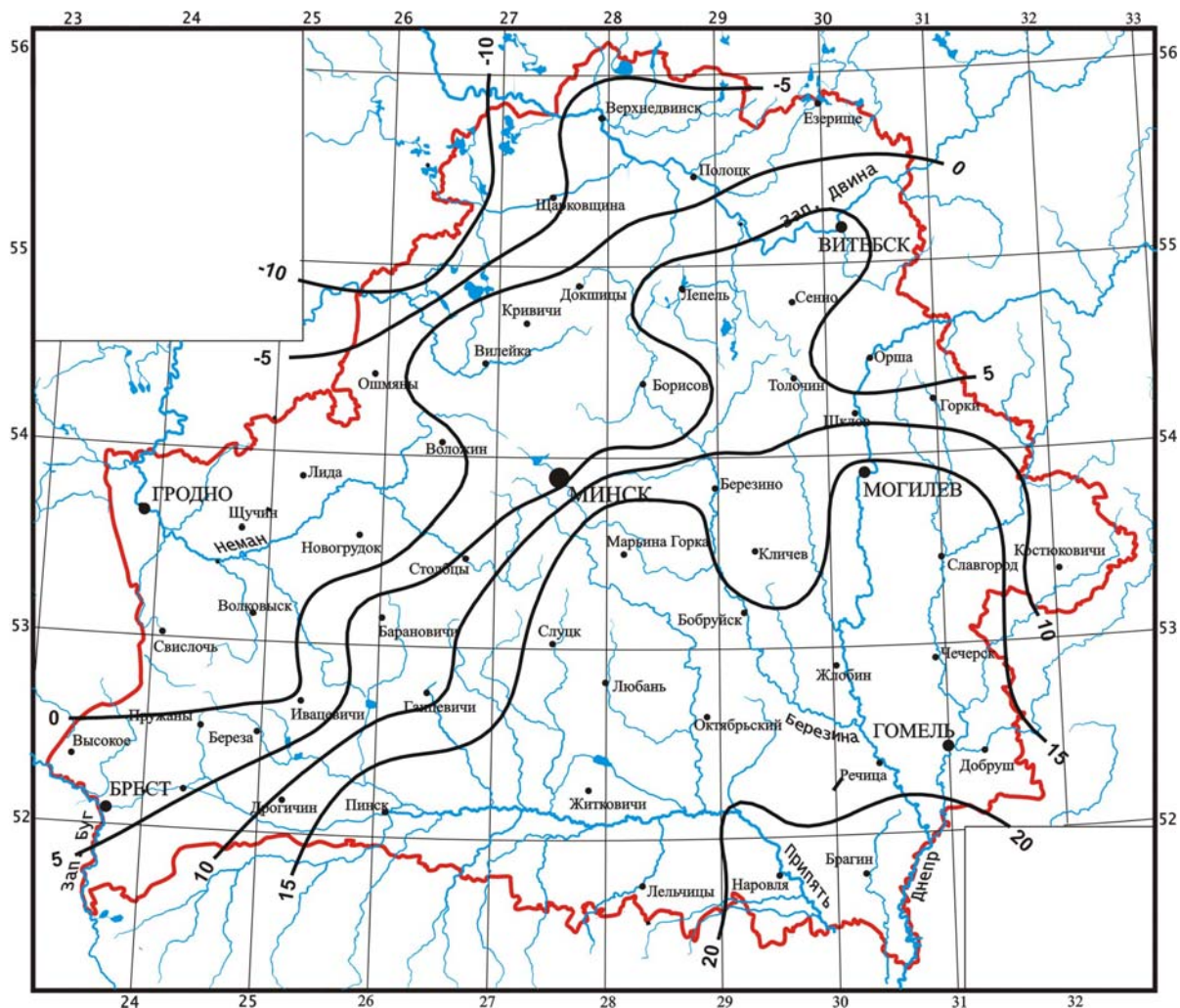


Рисунок 2. – Возможные изменения речного стока в зависимости от прогнозируемого изменения климата на период до 2020 г., % к 2009 г.

Установлено, что при прогнозируемом тренде климатических параметров на период до 2020 г. сток рек бассейнов Зап. Двины и Вилии сократится в среднем на 5–10%



по сравнению с настоящим уровнем. Годовой сток рек в бассейнах Немана и Зап. Буга существенных изменений на период до 2020 г. не претерпит. Наибольшее увеличение среднегодового стока воды рек может произойти в бассейнах Днепра и Припяти и может достигать для отдельных водосборов 20% по отношению к 2009 г. При исследовании возможной внутригодовой трансформации речного стока на период до 2020 г. отмечено наиболее существенное изменение месячных значений расходов воды в марте–июне.

### Заклучение

Дана количественная оценка водных ресурсов Республики Беларусь. Установлено перераспределение поверхностных водных ресурсов по бассейнам основных рек и административным областям, в то время как суммарные естественные ресурсы речных вод страны практически не изменились. Изменения объемов стока рек и гидрологического режима в современных условиях вызваны усилением интенсивности общей циркуляции атмосферы. Построена уточненная карта модуля стока рек Беларуси. На основании тенденций в изменении температуры воздуха, атмосферных осадков и дефицитов влажности воздуха получены прогнозные оценки этих параметров на период до 2020 г.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волчек, А. А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) / А. А. Волчек // Науч.-тех. информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР), 1986. – № 12. – С. 17–21.
2. Волчек, А. А. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – Екатеринбург, 2007. – № 1. – С. 50–62.
3. Логинов, В. Ф. Оптимизация режимной гидрологической сети Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // Природопользование : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии ; под ред. И. И. Лиштвана, В. Ф. Логинова. – Минск, 2006. – Вып. 12. – С. 51–57.
4. Мезенцев, В. С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования / В. С. Мезенцев // Водные ресурсы, 1995. – Т. 22, № 3. – С. 299–301.
5. Плужников, В. Н. Водные ресурсы Беларуси, их использование и охрана / В. Н. Плужников, М. В. Фадеева, В. И. Бучурин // Природные ресурсы. – № 1. – 1996. – С. 24–29.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 04.09.2015

**Volhek A.A., Obratsov L.V., Parfomuk S.I. Water Resources of Belarus and Their Possible Changes**

*The paper provides a revised quantitative assessment of the surface water resources of the Republic of Belarus with current climate variability and human impacts and the map of the long-term average runoff of the annual runoff of rivers. Water resources have not changed in general, but there was a redistribution of resources on the territory. On the basis of trends in the fluctuations of the major climatic parameters, using the method of hydrological and climatic calculations, forecasts of possible changes in water resources in the future was obtained.*