

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА КОЛЕБАНИЙ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ

Волчек А. А.¹, Грядунова О. И.²

¹ *Брестский государственный технический университет,*

² *Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина г. Брест, Республика Беларусь*

Введение

В последние годы наблюдаются заметные изменения водности рек, которые связывают с глобальным потеплением и увеличением антропогенной нагрузки. Одной из наиболее важных гидрологических величин является минимальный сток и его пространственно-временные колебания. Минимальный сток определяет развитие и функционирование водных и околосводных экосистем, имеет существенное значение при решении водохозяйственных задач (объемы водопотребления, сброса сточных вод). Научное и практическое значение имеет выявление закономерностей пространственно-временных колебаний минимального стока в современных условиях, адаптация существующих и разработка новых методик определения минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, особую значимость приобретают прогнозные оценки изменения минимального стока.

Целью нашего исследования является дать прогнозную оценку изменения минимального стока при различных сценариях развития климата и антропогенной нагрузки.

Методика исследования

В настоящее время для описания многолетних колебаний минимального стока, в основном, используются три общие статистические модели:

последовательность независимых случайных величин;

простая цепь Маркова;

сложная цепь Маркова (допускается наличие ближних и дальних внутрирядных связей) [1].

Стационарные временные ряды летне-осеннего минимального стока должны иметь неизменные параметры распределения вероятностей, а автокорреляционная функция зависит только от временного сдвига. Первое условие подразумевает постоянство климатических и физико-географических условий формирования летне-осеннего минимального стока, как за период гидрологических наблюдений, так и за период прогнозирования и не допускает возможности изменения этих условий в будущем. Второе условие рассматривает сток чисто как случайный процесс, т. е. отрицая преемственность в развитии гидрологического процесса во времени, или допускает существование некоторой зависимости текущих значений стока от предшествующих [1]. Свойство эргодичности заключается в том, что одна реакция временного ряда значений стока достаточной продолжительности может заменить множество реализаций той же продолжительности. Для доказательства этого свойства достаточно показать приближение ординат автокорреляционной функции к нулю при возрастании сдвига между временными интервалами.

Материалы IV МЕЖДУНАРОДНОГО ВОДНОГО ФОРУМА

Когда тренд явно не выражен, необходимо рассматривать выборочные автокорреляционную (АКФ) и частную автокорреляционную (ЧАКФ) функции данного процесса, с помощью которых определяются вид и порядок минимального летне-осеннего стока рек. При этом используются следующие критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [1] приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Критерии нестационарности процесса и выбора модели

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Экспоненциально затухает	выброс лишь при $\tau=1$	(АР (1)) авторегрессия первого порядка
Форма затухания в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает	выброс лишь при $\tau=1$ $\tau=2$	(АР (2)) авторегрессия второго порядка
Выброс при $\tau=1$, остальные значения нулевые	Экспоненциально затухает или осциллируют с изменением знака	(МА (1)) скользящее среднее первого порядка
Выброс при $\tau=1$ и $\tau=2$, остальные значения нулевые	Форма синусоидальной волны или экспоненциально затухает	(МА (2)) скользящее среднее второго порядка
Экспоненциально затухает, начиная с $\tau=1$ (затухание может быть монотонным или осциллирующим)	Экспоненциально затухающие значения ординат либо монотонно осциллируют	(АР МА (1)) авторегрессия и скользящее среднее первого порядка

Обсуждение результатов

Многолетние колебания минимального стока можно рассматривать как простую цепь Маркова, то есть принимается во внимание связь между стоком смежных лет и не учитывается корреляция между стоками несмежных интервалов. Коэффициент автокорреляции временных рядов летне-осеннего минимального стока изменяется в пределах $-0,45$ — $0,88$, а зимнего — $-0,46$ — $0,81$, что свидетельствует о наличии тесной связи минимальных расходов в смежные годы. Положительные коэффициенты автокорреляции характерны для рек верхнего течения рр. Неман, Березина, Друть, а отрицательные — для междуречий рр. Свислочь — Березина, Припять — Днепр.

Для описания многолетних колебаний минимального стока основных рек Беларуси использовалась сложная цепь Маркова (допускается наличие ближних и дальних внутрирядных связей) со сдвижкой до 30 лет. В этом случае ключевым моментом для описания колебаний является автокорреляционная функция (АКФ). Как показал анализ значимости коэффициента автокорреляции минимального стока рек, гипотеза независимости минимального стока не может быть принята ни для одной из исследуемых рек, так как минимальные расходы не являются совокупностью независимых случайных величин. Частный вид моделей приведен в таблице 2. Для рассматриваемых моделей коэффициент корреляции принимает значения от 0,30 (Сож — г. Гомель) до 0,71 (Щара — г. Слоним). Коэффициент детерминации численно изменяется от 0,23 (Днепр — Речица) до 0,50 (Щара — Слоним). Коэффициент детерминации указывает на 50 % вероятность объяснения переменных, включенных в модель. Анализ автокорреляционных функций показал, что для моделей характерно наличие дальних внутрирядных связей. Так для летне-осеннего минимального стока характерно наличие значимой связи на 12, 20, 28 году, а для зимнего встречаются как ближние (3, 4, 6 году), так и дальние связи (17, 26, 28 лет).

Анализ выборочных АКФ и ЧАКФ показал, что для большинства временных рядов минимальных расходов воды рек Беларуси закономерности формирования летне-осеннего и зимнего

Секция 1. Охрана водных ресурсов и оценка их состояния. Регулирование воздействий на водные ресурсы.

стока в многолетнем разрезе может быть идентифицировано моделями AP (1) и AP (2). Так как для первой модели характерна экспоненциально затухающая автокорреляционная функция, а частная автокорреляционная функция имеет выброс при $\tau = 1$. Вторая модель характеризуется затуханием автокорреляционной функции в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает, а частная автокорреляционная функция имеет выброс при $\tau = 1$ $\tau = 2$.

В настоящее время, по данным Департамента гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, с 1988 г. на территории республики наблюдается рост среднегодовых температур воздуха, за исключением 1996 г., когда средняя годовая температура воздуха выше нормы. Выявлен положительный тренд годовых температур воздуха, а анализ среднемесячных температур за период с 1985 по 2005 гг. показал, что наибольшие изменения произошли в зимние месяцы и в июле. Линейный тренд температуры воздуха за год в целом составляет $+0,72$ °C за 10 лет, а в июле $+1,40$ °C за 10 лет [2, 3]. Кроме того, наблюдается смещение самых холодных месяцев на ноябрь и декабрь.

По модельным оценкам увеличение количества атмосферных осадков при потеплении климата должно наблюдаться в высоких широтах, а уменьшение — в низких. Граница раздела проходит по 50 — 55 °C. ш., что позволяет прогнозировать небольшие изменения атмосферных осадков на территории Беларуси при потеплении климата. В изменениях атмосферных осадков на территории Беларуси наблюдаются следующие тенденции: в январе, июне, сентябре, ноябре и декабре идет уменьшение количества осадков, а в феврале, мае, августе и октябре — увеличение [2]. Исходя из вышесказанного, можно полагать, что для Беларуси ожидается увеличение температуры воздуха на $0,3$ — 3 °C, а изменение атмосферных осадков (увеличение или уменьшение) на 0 — 15 % от современного уровня [3, 4, 5, 6, 7].

Используя гидролого-климатическую гипотезу В. С. Мезенцева [8], разработана многофакторная модель, в основе которой лежит стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом аспекте. Разработанная модель позволила оценить возможные изменения минимальных расходов рек Беларуси в теплый период в зависимости от тех или иных гипотез развития климата.

На рис. 1 представлена пространственная структура слоя минимального стока рек Беларуси на 2015 г. Сравнение прогнозных данных с современными показал:

в большей части территории Беларуси летне-осенний и зимний минимальный сток рек Беларуси уменьшится; летне-осенний на 24 %, зимний — 21 %;

на юге и юго-востоке изменения будут иметь обратную тенденцию, т. е. летне-осенний и зимний минимальный сток увеличится; летне-осенний на 23 %, а зимний — 16 %.

Представленная прогнозная оценка изменения минимального стока на территории Беларуси на 2015 г. достаточно схематична и актуальна при условии сохранения современных тенденций изменения метеозаэментов.

Для проведения численного эксперимента возможного изменения минимального стока рек Беларуси были отобраны 47 малых рек. Основываясь на существующих в настоящее время сценариях изменения климата и антропогенного воздействия на водосборы рек, эксперимент проведен по следующим вариантам:

Вариант 1 — средняя годовая температура воздуха увеличится на 2 °C по сравнению с современными условиями при неизменном количестве атмосферных осадков;

Вариант 2 — уменьшение годовых атмосферных осадков на 10 % с неизменной температурой воздуха;

Вариант 3 — годовые атмосферные осадки уменьшаются на 10 %, а средняя годовая температура воздуха увеличивается на 2 °C;

Вариант 4 — заболоченность и лесистость водосбора уменьшаются, а густота речной сети и распаханность увеличиваются на 5 , 10 , 20 и 30 % от существующих в настоящее время при неизменных климатических условиях.

Материалы IV МЕЖДУНАРОДНОГО ВОДНОГО ФОРУМА

Изменения минимального стока в результате антропогенных воздействий выражаются в относительных величинах — в процентах по отношению к современным условиям, т. е. рассчитывается относительное увеличение или уменьшение минимального стока.

Исходя из расчетов, на основе указанных выше уравнений с принятыми гипотезами, сделаны следующие выводы:

— по первому варианту (увеличение температуры на 2 °С летне-осенний минимальный сток практически не изменится (2,2—2,5 %). Анализ полученных данных дает представление о небольшом уменьшении минимального стока при увеличении температуры. Произошло небольшое увеличение суммарного испарения на севере республики и почти не изменилось на юге, особенно заметна эта тенденция в летние месяцы (июнь, июль, август). Небольшие изменения минимального стока можно объяснить тем, что температура воздуха не является решающим стокоформирующим фактором.

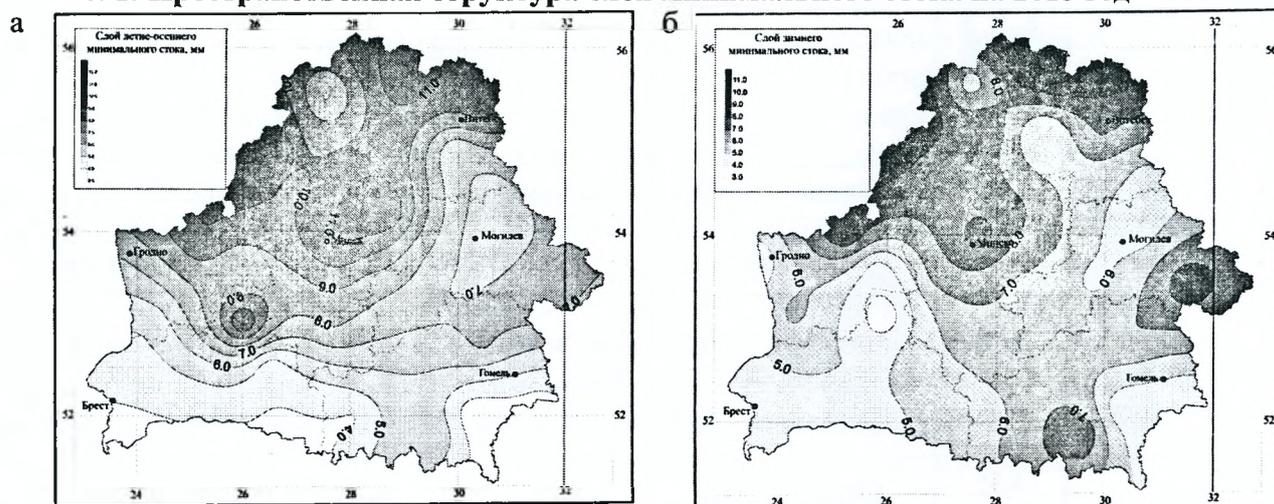
Таблица 2. Параметры прогнозных моделей

Река — пост	коэффициент множественной корреляции	Модель
Летне-осенний минимальный сток		
Западная Двина — г. Полоцк	0,59	$Q(t) = -0,244 \cdot Q(t-12) - 0,257 \cdot Q(t-28) + 225,534 + \xi(t)$
Припять — г. Мозырь	0,60	$Q(t) = 0,446 \cdot Q(t-12) + 136,071 + \xi(t)$
Неман — г. Гродно	0,64	$Q(t) = -0,260 \cdot Q(t-12) + 0,286 \cdot Q(t-28) + 48,782 + \xi(t)$
Днепр — г. Речица	0,55	$Q(t) = -0,312 \cdot Q(t-11) - 0,293 \cdot Q(t-18) + 272,583 + \xi(t)$
Птичь — с. Лучицы	0,58	$Q(t) = -0,228 \cdot Q(t-2) - 0,240 \cdot Q(t-16) + 0,267 \cdot Q(t-20) + 9,668 + \xi(t)$
Мухавец — г. Брест	0,64	$Q(t) = 0,266 \cdot Q(t-20) + 2,634 + \xi(t)$
Щара — г. Слоним	0,71	$Q(t) = 0,264 \cdot Q(t-28) + 6,518 + \xi(t)$
Виляя — с. Михалишки	0,54	$Q(t) = 0,245 \cdot Q(t-28) + 16,954 + \xi(t)$
Дисна — пгт. Шарковщина	0,69	$Q(t) = 0,364 \cdot Q(t-5) - 0,317 \cdot Q(t-12) - 0,259 \cdot Q(t-21) + 12,087 + \xi(t)$
Сож — г. Гомель	0,30	$Q(t) = 0,228 \cdot Q(t-29) + 79,127 + \xi(t)$
Зимний минимальный сток		
Западная Двина — г. Полоцк	0,53	$Q(t) = -0,267 \cdot Q(t-9) + 136,045 + \xi(t)$
Припять — г. Мозырь	0,61	$Q(t) = 0,126 \cdot Q(t-6) + 0,151 \cdot Q(t-17) - 0,270 \cdot Q(t-28) + 109,26 + \xi(t)$
Неман — г. Гродно	0,50	$Q(t) = 0,228 \cdot Q(t-27) + 33,634 + \xi(t)$
Днепр — г. Речица	0,48	$Q(t) = 0,224 \cdot Q(t-17) + 0,261 \cdot Q(t-28) + 54,821 + \xi(t)$

Секция 1. Охрана водных ресурсов и оценка их состояния.
Регулирование воздействий на водные ресурсы.

Птичь — с. Лучицы	0,62	$Q(t) = 0,183 \cdot Q(t-17) + 0,230 \cdot Q(t-26) - 0,343 \cdot Q(t-27) + 17,189 + \xi(t)$
Мухавец — г. Брест	0,70	$Q(t) = -0,207 \cdot Q(t-4) - 0,194 \cdot Q(t-9) + 0,369 \cdot Q(t-16) + 0,261 \cdot Q(t-17) + 12,784 + \xi(t)$
Щара — г. Слоним	0,63	$Q(t) = 0,351 \cdot Q(t-26) + 12,759 + \xi(t)$
Вилия — с. Михалишки	0,63	$Q(t) = 0,252 \cdot Q(t-1) + 16,535 + \xi(t)$
Дисна — пгт. Шарковщина	0,57	$Q(t) = -0,246 \cdot Q(t-14) + 12,996 + \xi(t)$
Березина — г. Бобруйск	0,70	$Q(t) = 0,321 \cdot Q(t-3) + 34,42 + \xi(t)$
Сож — г. Гомель	0,52	$Q(t) = 0,265 \cdot Q(t-28) + 48,033 + \xi(t)$

Рис. 1. Пространственная структура слоя минимального стока на 2015 год



а — летне-осенний период; б — зимний период

— *по второму варианту* (уменьшение осадков на 10%) летне-осенний минимальный сток может уменьшиться на 15%, а суммарное испарение — в среднем на 5—10%. При этом максимальное уменьшение стока наблюдается в июне–июле на 20%. Необходимо отметить синхронное уменьшение минимального речного стока и суммарного испарения при уменьшении количества атмосферных осадков. Количество поступающей влаги уменьшилось, соответственно уменьшилась и возможность ее испарения, что можно объяснить меньшей влажностью почвы и увеличением ее водопоглощающей способности.

— *по третьему варианту* (уменьшение осадков на 10% и увеличение температуры на 2 °С) сток уменьшился в среднем на 20% (июнь — 40%). Речной сток оказался очень чувствительным к одновременному уменьшению количества атмосферных осадков и увеличению температуры воздуха. Значения минимального стока существенно уменьшились для июня на 38%, июля на 18%, августа на 16%. Такое положение можно объяснить небольшими расходами во время летней межени и большим (по отношению к остальным месяцам года) абсолютным уменьшением количества осадков (в летние месяцы выпадает наибольшее количество осадков).

— *по четвертому варианту* (заболоченность и лесистость водосбора уменьшаются, а густота речной сети и распаханность увеличиваются на 5, 10, 20 и 30% соответственно) средние значения изменений речного стока для исследуемых рек-водосборов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Средние величины изменения минимального стока по варианту 4, в % к существующему

Степень антропогенного воздействия	VI	VII	VIII	IX	X
5%	-1,08	-0,4	1,9	2,24	1,29
10%	-2,16	-0,8	3,81	4,93	2,59
20%	-4,32	-2,41	7,14	9,87	5,18
30%	-7,19	-4,82	10,48	15,25	7,44

Анализ таблицы 3 позволяет выявить тенденцию постепенного перехода от уменьшения стока в июне — июле к его увеличению в августе — октябре, при этом переход через критические значения изменений приходится на вторую половину июля. Необходимо отметить, что одновременное осушение болот, вырубка лесов, создание новых мелиоративных систем и увеличение процента пахотных земель уменьшает и растягивает во времени речной сток весеннего половодья и тем самым увеличивает его в летне-осенние месяцы. Прослеживается тенденция увеличения летне-осеннего минимального стока в зависимости от степени антропогенных воздействий, но 20—30 % изменений на водосборе практически невозможно, поэтому хозяйственная деятельность в бассейнах рек не может повлиять существенным образом на изменение минимального стока рек Беларуси в ближайшем будущем.

Выводы

Получены прогнозные оценки изменений минимального стока рек Беларуси для различных сценариев развития климата, которые необходимы для рационального использования речных вод:

— при увеличении средней годовой температуры на 2 °С и неизменном количестве атмосферных осадков (**вариант 1**) существенного изменения летне-осеннего минимального стока не произойдет и составит $\pm 2,5\%$.

— при уменьшении количества осадков на 10% и неизменной температуре воздуха (**вариант 2**) произойдет уменьшение летне-осеннего минимального стока на 15%. При этом максимальное уменьшение стока наблюдается в июне–июле на 20%.

— при уменьшении количества осадков на 10% и увеличении средней годовой температуры на 2 °С (**вариант 3**) летне-осенний минимальный сток уменьшится на 20%.

— при уменьшении заболоченности и лесистости и увеличении густоты речной сети и распаханности (**вариант 4**) выявлена тенденция постепенного перехода от уменьшения стока в июне–июле к его увеличению в августе–октябре, при этом переход через критические значения изменений приходится на вторую половину июля.

Таким образом, наиболее неблагоприятным прогнозом развития климата для рек Беларуси является **третий вариант** (уменьшение количества осадков на 10% и увеличение средней годовой температуры на 2 °С), так как приведет к уменьшению летне-осеннего минимального стока до 38%, а при наложении на этот вариант 10% антропогенного воздействия на водосбор реки уменьшение минимального стока может достигнуть 50%.

Литература

- Исмаилов, Г. Х., Федоров, В. М. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги. — Москва, Водные ресурсы, 2001. том 28, № 5. — С. 517—525.
- Волчек, А. А. Районирование территории Беларуси по изменению градиента атмосферных осадков/А. А. Волчек, Ан. А. Волчек, О. И. Грядунова//География в XXI веке: проблемы и перспективы развития: материалы междунар. науч.-практ. конф., Брест, 17—18 марта 2008 г. /М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; редкол.: К. К. Красовский [и др.]. — Брест, 2008. — С. 8—10.

**Секция 1. Охрана водных ресурсов и оценка их состояния.
Регулирование воздействий на водные ресурсы.**

3. Волчек, А. А. Трансформации температуры воздуха на территории Беларуси в современных условиях/А. А. Волчек, О. И. Грядунова//Наука, образование и культура: состояние и перспективы инновационного развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Мозырь, 27—28 марта 2008 г. /Мозыр. гос. пед. ун-т; редкол.: В. В. Валетов [и др.].— Мозырь, 2008. — С. 23—25.

4. Возможные изменения водных ресурсов и водного режима в бассейне Днепра при различных сценариях потепления климата/В. Ю. Гергиевский [и др.]//Материалы научно-практической конф.: «Водные ресурсы и устойчивое развитие экономики Беларуси». — Минск: ЦНИИКИВР, 1996. — С. 21-48.

5. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси/В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. — Минск: Тонпик, 2006. — 160 с.

6. Логинов, В. Ф. Причины и следствия климатических изменений/В. Ф. Логинов. — Минск: Навука і тэхніка, 1992. — 319 с.

7. Логинов, В. Ф. Изменения климата Беларуси и их последствия/В. Ф. Логинов, Г. И. Сачок, В. С. Микуцкий. — Минск: Тонпик, 2003. — 330 с.

8. Мезенцев, В. С. Метод гидролого-климатических расчетов и опыт его применения для Западно-Сибирской равнины по признакам увлажненности и теплообеспеченности/В. С. Мезенцев//Тр. Омского с. х. ин-та. — Омск, 1957. — Т. 27. — С. 59—66.