

УДК 556.13(476)

А.А. Волчек

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕКИ ВИЛИИ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ

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

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. Совокупность этих причин можно разделить на природные и антропогенные, которые различаются характером и последствиями своего влияния на водные ресурсы. Природные причины определяют пространственно-временные колебания водных ресурсов в зависимости от различий в ее физико-географических условиях, а также годовой и вековой ход климатических условий влияет на формирование водных ресурсов. Внутригодовые колебания происходят постоянно и последовательно. Вековые колебания происходят сравнительно медленно, распространяются на довольно обширные территории, носят обычно квазипериодический характер и стремятся к некоторой постоянной величине. Исследования показывают, что в историческое время эти отклонения не носили прогрессирующего характера. Периоды похолодания и потепления, засухливые и влажные чередуются во времени, и общее состояние водных ресурсов и их качество существенно не изменяются. Главной особенностью естественных причин является то, что происходящие изменения не имеют односторонней тенденции.

Антропогенные причины являются следствием различных видов человеческой деятельности. Они влияют на водные ресурсы и качество вод сравнительно быстро и односторонне, в чем и состоит их главное отличие от природных причин. Виды хозяйственной деятельности, вызывающие изменения количественных и качественных характеристик водных ресурсов, весьма разнообразны, зависят от физико-географических условий территории, особенностей ее водного режима и характера использования.

Современные антропогенные воздействия на водосборах рек достигли ощутимых масштабов, серьезно влияют на речной сток и зависят напрямую от степени освоения и развития той или иной территории. Беларусь относится к странам, где антропогенные воздействия проявляются в изменениях стока. На процесс колебания стока влияют как антропогенные воздействия, так и природные факторы. Поэтому одной из главных задач является оценка степени влияния этих факторов.

Одной из наиболее нагруженных рек в Беларуси является река Вилия. Здесь налицо прямое изъятие воды для питания Вилейско-Минской водной системы, а также влияние современных климатических колебаний. Кроме того, планируется забор воды из реки для нужд Белорусской атомной электростанции (БелАЭС). Проблема усугубляется тем, что р. Вилия является трансграничной рекой (Беларусь — Литва).

Целью настоящей работы — объективная оценка изменения режима стока р. Вилии в пределах Беларуси в современных условиях и на ближайшую перспективу для двух сценариев развития экономики и климата (сценарии А1В и В1).

Исходные данные и методы исследования. Река Вилия (литовское название Нярис) протекает по территории Беларуси и Литвы, правый приток р. Неман (р. Нямунас), имеет длину 498 км, в пределах Беларуси 264 км. Площадь водосбора 25100 и 11000 км², соответственно, со среднегодовым расходом воды в устье около 186 м³/с, средний уклон водной поверхности 0,3%. Река берет свое начало с небольшого болота в 1 км северо-восточнее д. Великое Поле Докшицкого района пересекает границу с Литвой в 2 км северо-западнее д. Жернели Островецкого района, впадает в р. Неман на территории Литвы около г. Каунаса. Основные правые притоки на территории Беларуси: Сервич, Нарочь, Стреча; левые притоки: Двиноса, Илия, Уша, Ошмянка. На реке создано Вилейское водохранилище, часть воды из которого по Вилейско-Минской водной системе перекачивается в р. Свислочь. Долина р. Вилии извилистая, хорошо развитая, в верхнем течении шириной 1–3 км, ближе к устью сужается до 0,2–0,4 км, почти на всем протяжении террасы. Пойма в верхнем течении в основном заболоченная, шириной 200–400 м, ниже прерывистая, шириной 50–70 м, местами до 600 м, на участке между деревнями Стахи и Роздоры Вилейского района много стариц. Русло реки в верховье сильно извилистое, шириной от 1 м до 2 м, около устья р. Ушы достигает 40–60 м, местами до 100 м. До впадения р. Болошенки 60–70 м. На реке много островов, осередков, встречаются порожистые участки. Берега крутые, в верховье торфянистые. Весеннее половодье начинается в конце марта и продолжается около

Волчек Александр Александрович, д.г.н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии Брестского государственного технического университета.

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

50 суток. Режим отличается интенсивным весенним паводком (около 45% годового стока) и низким стоянием воды в летнюю межень. После ввода в эксплуатацию Вилейского водохранилища уровенный режим и расход воды ниже плотины в пределах Беларуси зарегулирован. Замерзание реки в верхнем течении наступает в начале декабря, в среднем и нижнем течении — в конце декабря в начале января. Ледоход на реке начинается во второй декаде марта от устья до верховья. Средняя температура воды летом 18–20 °С. На р. Вилии расположены города Вилейка, Вильнюс и Каунас. Почти все притоки Вилии канализованы. Всего в бассейне реки более 40 каналов общей протяженностью около 300 км [1].

Вилейское водохранилище было создано в первой половине 70-х годов прошлого столетия и введено в эксплуатацию в 1975–76 гг. Расположено в Вилейском районе на р. Вилии при слиянии ее с реками Сервич, Илия, Косутка в 5 км восточнее г. Вилейки. Это самый крупный искусственный водоем в Беларуси. Площадь водного зеркала составляет 63,8 км², длиной 27 км и наибольшей шириной 3 км при максимальной глубине 13 м. Длина береговой линии 137 км, объем воды 238 млн м³, площадь водосбора составляет 4120 км². Распределение воды осуществляется следующим образом: сброс через плотину в р. Вилию около 75%, в Вилейско-Минскую водную систему 20% и на другие нужды 5% [1].

Одной из задач исследования была оценка стационарности временных рядов стока р. Вилии с различной степенью антропогенной нагрузки. Для этих целей использованы временные ряды стока (годового, максимального, минимального летне-осеннего и минимального зимнего) р. Вилии в створах д. Стешицы (площадь водосбора $A = 1230$ км² и периодом наблюдений с 1951 по 2014 гг.); г. Вилейка ($A = 4190$ км² и периодами наблюдений с 1949 по 1974, с 1976 по 1979 и с 1981 по 2014 гг.); д. Михалишки ($A = 10\,300$ км² и периодом наблюдений с 1946 по 2014 гг.), любезно представленные Брестским областным центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Для удобства расчетов и сопоставимости полученных результатов принят единый расчетный период с 1946 по 2014 гг. продолжительностью 69 лет. Пропущенные и недостающие данные были восстановлены с помощью компьютерного программного комплекса «Гидролог» [2] с привлечением рек-аналогов согласно требованиям [3]. Как правило, для решения задачи восстановления пропущенных данных использовали линейные уравнения регрессии вида:

$$Q(t) = \alpha \cdot Q_a(t) + \beta, \quad (1)$$

где α и β — эмпирические коэффициенты.

Значение коэффициента корреляции при 60 совместных годах наблюдений колебались в пределах $r = 0,65 \dots 0,95$, что значительно больше критического значения, равного $r_{кр.} = 0,25$.

Систематическое преуменьшение дисперсий исключалось путем дополнительного расчета погодичных (Q'_i) значений по формуле [3]:

$$Q'_i = \frac{Q_i - \bar{Q}_{n'}}{R} + \bar{Q}_{n'}, \quad (2)$$

где Q_i — погодичные значения гидрологической ха-

рактеристики, рассчитанные по уравнению регрессии; Q_n — среднее значение гидрологической характеристики за совместный период наблюдений.

В настоящее время все практические методы гидрологических и водохозяйственных расчетов базируются на принятии гипотезы стационарности естественного процесса многолетних колебаний годового стока, т.е. возможности переноса режимных характеристик, определенных в прошлом, в будущее в их неизменном виде. Это подтверждает и опыт проектирования и эксплуатации многочисленных гидротехнических и водохозяйственных объектов.

Для оценки влияния антропогенных воздействий и природных факторов на сток исходные временные ряды расходов воды анализировались за различные интервалы осреднения: с 1946 по 2014 гг. (весь период наблюдения, 69 лет); с 1946 по 1976 гг. (период до введения в строй Вилейского водохранилища, 31 год); с 1977 по 2014 гг. (период функционирования Вилейского водохранилища, 38 лет); с 1977 по 1987 гг. (период функционирования Вилейского водохранилища до начала современного потепления климата, 11 лет); с 1988 по 2014 гг. (период функционирования Вилейского водохранилища при современном потеплении климата, 27 лет).

При статистическом анализе временных рядов стока использованы следующие методики:

— для выявления тенденций изменений стока использовались хронологические графики колебаний, разностные интегральные кривые и линейные тренды;

— для оценки различий в статистических параметрах использовался критерий Стьюдента и критерий Фишера:

$$t = \frac{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2}{\sqrt{n_1 \cdot \hat{\sigma}_1^2 + n_2 \cdot \hat{\sigma}_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (3)$$

$$F = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2}, \quad (4)$$

где \bar{Q}_1, \bar{Q}_2 — выборочные средние; $\hat{\sigma}_1^2$ и $\hat{\sigma}_2^2$ — выборочные дисперсии; n_1 и n_2 — объемы выборок.

Полученное значение t критерия Стьюдента и F -критерия Фишера сравнивалось с их критическими значениями при заданном уровне значимости $\alpha = 5\%$. Если $t > t_\alpha$, принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних, а при $F > F_\alpha$ принимается гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов.

При использовании водных ресурсов необходимо обеспечить экологическую устойчивость речных водосборов. Основными элементами, характеризующими возможности эффективного использования речного стока, являются лимитирующие расходы и соответствующие им минимальные уровни воды в периоды летне-осенней и зимней межени. Эти расходы и уровни воды являются одними из определяющих параметров в течение года, как по условиям функционирования водных экосистем, так и по условиям водопотребления и водоотведения. При изъятии части речного стока в реке должен оставаться необходимый его объем, обеспечи-

вающий нормальное функционирование водной экосистемы и поддерживающий способность речной системы к самовосстановлению.

В настоящее время нет единого подхода для оценки характеристик стока, необходимого для поддержания требуемого экологического статуса водных объектов.

В водохозяйственной практике принято, что экологическая безопасность реки обеспечивается сохранением в ней расхода воды в размере 75% минимального среднемесячного расхода воды в год 95% вероятности превышения [4]. В Европейском Союзе, начиная с 2000-х годов, дополнительными условиями для экологического функционирования речных экосистем признаются требования по обеспечению условий проточности, что связано с определенными требованиями к скоростному режиму потока и связанными с ними русловыми процессами, включая заиление и транспорт наносов.

Оценка экологического стока должна включать не только минимальные значения, но и учитывать внутригодовое распределение стока и изменчивость по годам. Рассматривая более простую реализацию способа переноса обеспеченностей [5], при котором принимаются следующие переходы: $Q_{зк}^{50} \geq Q_{мес}^{75}$, $Q_{зк}^{75} \geq Q_{мес}^{95}$, $Q_{зк}^{95} \geq Q_{мес}^{99}$; получены значения экологического стока для трех основных расчетных обеспеченностей. Возможно два близких варианта выбора перехода обеспеченностей:

- 25% → 5%, 50% → 25%, 99% → 95%;
- 25% → 5%, 75% → 50%, 99% → 95%.

Первый вариант ближе к методу перехода, предложенному в [6], только с добавлением точки 25% → 5%. Второй вариант составлен в большей степени интуитивно, но при этом базируется на подходах, описанных выше.

Как и в случае с минимальным месячным стоком, наиболее эффективно описывает исходные данные функция плотности распределения случайной величины Крицкого–Менкеля. Для оценки параметров данной функции решается система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} 1-0,95 = \int_0^{Q_{95}} \left(\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{Q} \cdot b \cdot \Gamma(\gamma)} \left(\frac{q}{\bar{Q}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} e^{-\left(\frac{\Gamma(\gamma+b) q}{\Gamma(\gamma) \bar{Q}} \right)^{\frac{1}{b}}} dq \\ 1-0,25 = \int_0^{Q_{25}} \left(\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{Q} \cdot b \cdot \Gamma(\gamma)} \left(\frac{q}{\bar{Q}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} e^{-\left(\frac{\Gamma(\gamma+b) q}{\Gamma(\gamma) \bar{Q}} \right)^{\frac{1}{b}}} dq \\ 1-0,05 = \int_0^{Q_{05}} \left(\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{Q} \cdot b \cdot \Gamma(\gamma)} \left(\frac{q}{\bar{Q}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} e^{-\left(\frac{\Gamma(\gamma+b) q}{\Gamma(\gamma) \bar{Q}} \right)^{\frac{1}{b}}} dq \end{cases} \quad (5)$$

где b, γ, \bar{Q} — искомые параметры распределения случайной величины расхода воды; $\Gamma(\gamma)$ — гамма-функция; $Q_{p\%}$ — расход воды в водотоке $p\%$ -й обеспеченности, м³/с.

Аналогичное уравнение составляется и для второго варианта переноса обеспеченностей. Решая уравнения, получаем две функции плотности распределения экологического стока. Как видно из рис. 1, для экологического стока кривая несколько сместилась влево и приобрела вид, близкий к нормальному закону распределения. Кроме этого, используемые два варианта переноса обеспеченностей дали сходные результаты.

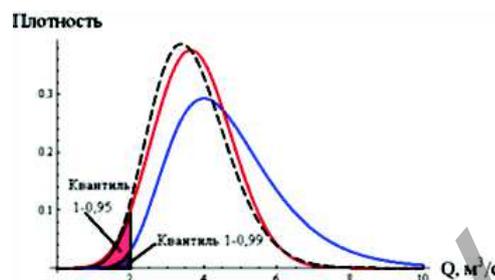


Рисунок 1. Кривые плотности распределения среднегодового стока (сплошная синяя) и экологического стока (штриховая черная и сплошная красная)

Для прогнозных оценок изменения водности р. Вилии адаптирован метод гидролого-климатических расчетов (ГКР), предложенный В.С. Мезенцевым, основанный на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов [7]. Положив в основу гидролого-климатическую гипотезу В.С. Мезенцева [7], нами разработана многофакторная модель, включающая 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 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:

$$Y_K(I) = H(I) - E(I) \pm \Delta W(I), \quad (6)$$

где $Y_K(I)$ — суммарный климатический сток, мм; $H(I)$ — суммарные ресурсы увлажнения, мм; $E(I)$ — суммарное испарение, мм; $\Delta W(I)$ — изменение влагозапасов деятельного слоя почвогрунтов, мм; I — интервал осреднения.

Суммарное испарение находится по формуле:

$$E(I) = E_m(I) \left[1 + \frac{\left(\frac{E_m(I)}{W_H} + V(I)^{1-r(I)} \right)^{n(I)}}{\frac{K(I) + g(I)}{W_H} + V(I)} \right]^{\frac{1}{n(I)}}, \quad (7)$$

где $E_m(I)$ — максимально возможное суммарное испарение, мм; W_{HB} — наименьшая влагоемкость почвы, мм; $V(I) = W(I)/W_{HB}$ — относительная влажность почвогрунтов на начало расчетного периода; $KX(I)$ — сумма измеренных атмосферных осадков, мм; $g(I)$ — грунтовая составляющая водного баланса, мм; $r(I)$ — 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:

$$V(I+1) = V(I) \cdot \left(\frac{V_\varphi(I)}{V(I)} \right)^{r(I)} \quad (8)$$

$$V_\varphi(I) = \left(\frac{K(I) + g(I)}{W_H} + V(I) \right)^{\frac{1}{r(I)}} \left(\frac{E_m(I)}{W_H} + V(I)^{1-r(I)} \right) \quad (9)$$

Полученные значения $V_{cp}(I)$ сравнивают с относительной величиной полной влагоёмкости $V_{пв}$. Если $V_{cp}(I) \leq V_{пв}$, то принимается расчетное значение относительной средней влажности, в противном случае, когда $V_{cp}(I) \geq V_{пв}$ к расчету принимается $V_{cp}(I) = V_{пв}$, разница $(V_{cp}(I) - V_{пв}) \cdot W_{пв}$ относится к поверхностному стоку.

Величина атмосферных осадков в месяцы холодного периода за вычетом величины суммарного испарения переносится на период половодья, т. е. на март месяц.

Максимально возможное суммарное испарение находится по методике, описанной в работе [8].

Суммарные ресурсы увлажнения определяются следующим образом:

$$H(I) = KX(I) + W_{пв}(V(I) - V(I + 1)). \quad (10)$$

Решение системы уравнений (6) – (10) осуществляется методом итераций до тех пор, пока значение относительной влажности почвогрунтов 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. $W(I) = W_{пв}$, откуда $V(I) = 1$. Сходимость решения метода ГКР достигается уже на четвертом шаге расчета.

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

$$Y_p(I) = k(I) \cdot Y_k(I), \quad (11)$$

где $Y_p(I)$ — суммарный русловой сток, мм; $k(I)$ — коэффициент, учитывающий гидрографические характеристики водосбора.

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. При настройке модели преследуется цель достичь наибольшего соответствия рассчитанного климатического и руслового стоков. Первый этап заканчивается построением графиков климатического и руслового стока и выводом ошибки моделирования.

Хорошее совпадение измеренного и рассчитанного стока свидетельствует о корректности модели. Полученные параметры модели использованы при проведении численного эксперимента.

Второй этап представляет собой непосредственный расчет водного баланса исследуемой реки, используя параметры, полученные при калибровке модели. Расчет элементов водного баланса исследуемой реки производится с учетом конкретных особенностей рассматриваемого водосбора [9].

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 около 1000 км², на которых ведутся гидрометрические наблюдения. Таким образом, программа «Баланс» при наличии данных об атмосферных осадках, температуре воздуха, дефицитах влажности воздуха на расчетный период и современные значения стока воды реки, а также гидрографических характеристиках водосбора позволяет получить про-

гнозные оценки водного баланса малых рек Беларуси на расчетную перспективу.

Решение уравнения водного баланса для водосбора связано с определением среднего значения тех элементов, наблюдения за которыми ведутся в отдельных точках водосбора. Поэтому одной из главных составляющих моделирования водного режима является корректная оценка климатических характеристик и их осреднение по водосбору. Это, в свою очередь, вызывает необходимость интерполяции и осреднения используемых величин. Применяемые в настоящее время методы оценки среднего значения того или иного балансового элемента на водосборе, по существу, являются вариантами способа нахождения среднего взвешенного. Методы осреднения, как правило, отличаются лишь в части приемов оценки весовых коэффициентов; степени учета основных факторов формирования балансовых элементов уделяется недостаточное внимание.

Так, пространственно-временное распределение атмосферных осадков зависит от направления движения циклонов, положения фронтов раздела, происхождения и мощности влажных воздушных масс, от рельефа местности, экспозиции склонов и ряда других факторов.

Каждый бассейн имеет различную конфигурацию, специфическое строение поверхности с присущей ей гаммой индивидуальных свойств. Поэтому распределение величин осадков и стока по реальным периодам на реальных территориях, как правило, пестрое, а их так называемые поля уже в силу этого — неоднородные и анизотропные.

В качестве исходной функции распределения гидрометеорологической характеристики в речном бассейне принимается функция $x(\varphi, \lambda, H)$, заданная в табличном виде, в которой λ, φ — принимаемые прямоугольные координаты (географическая широта, долгота) расчетного пункта, H — абсолютная отметка поверхности земли в данном пункте. На основе теоремы Вейерштрасса возможно аналитическое выражение исходной функции распределения гидрометеорологической характеристики, ранее заданной в табличном виде. Это приводит к замене точечных данных наблюдений аппроксимирующей функцией трехмерной нелинейной (полиномиальной) интерполяции.

Нами, на материалах Беларуси, выполнено, с использованием аналогичного подхода, исследование связей климатических характеристик с определяющими их факторами. При этом, использован дифференцированный подход к учету в структуре регрессионной модели трех групп формирующих факторов. Во-первых, фоновых факторов, определяемых глобальными влагопереносами в атмосфере и, естественно, участвующих в формировании климатических характеристик над всей рассматриваемой территорией. Во-вторых, региональных факторов, влияющих на ограниченной территории, охваченной инструментальными наблюдениями. В-третьих, местных факторов, оказывающих свое влияние на режим климатических характеристик в пределах ограниченной и не охваченной инструментальными наблюдениями территории [10].

В зависимости от точности описания структуры месячных норм климатических характеристик, могут использоваться различные регрессионные уравнения.

Так, нормы климатических характеристик за различные интервалы осреднения (месяц, сезон, год) в первом приближении могут быть оценены по линейным регрессионным зависимостям типа [11]:

$$X_j = a_{1j} \cdot \varphi + a_{2j} \cdot \lambda + a_{3j} \cdot H + a_{0j}, \quad (12)$$

где X_j — месячная (сезонная, годовая) норма ЭВВ в расчетном пункте, мм; φ , λ — условные прямоугольные координаты (широта, долгота) расчетного пункта, принимаемые относительно некоторого пункта, км; H — абсолютная отметка поверхности земли (в Балтийской системе) в расчетном пункте, м; a_{1j} , a_{2j} , a_{3j} , a_{0j} — коэффициенты частных уравнений регрессии для оценки норм климатических характеристик за различные интервалы осреднения.

Зная значения климатических характеристик, можно определить средний их слой для водосборного бассейна (\bar{X}_A) по выражению:

$$\bar{X}_A = \frac{1}{A \cdot \Delta H} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{H_1}^{H_2} X(\varphi, \lambda, H) d\varphi d\lambda dH \quad (13)$$

где A — площадь водосбора, км²; φ_1 , φ_2 , λ_1 , λ_2 — координаты крайних точек водосбора, м; $\Delta H = H_{max} - H_{min}$ — разность, соответственно, максимальной и минимальной абсолютных отметок поверхности водосбора, м.

Методика имитационного моделирования апробирована нами практически на всех основных климатических характеристиках, что дало возможность привлечь дополнительно большой объем гидрометеорологической информации о возможных вариантах значений и изменений, входящих в балансовые уравнения случайных величин.

При настройке моделей по предлагаемой методике возникли проблемы с определением параметров для зимних месяцев. Дело в том, что модель недостаточно точно учитывала участвовавшие в последнее время оттепели. Поэтому нами проведена корректировка модели, учитывающая оттепели. Полученная при настройке модели разница между русловым и климатическим стоком относилась к стоку, сформировавшемуся во время оттепелей, которая фиксировалась в настройках модели. При прогнозировании стока будущего эта составляющая добавлялась непосредственно к стоку, а ее величина отнималась от атмосферных осадков соответствующего месяца, и на период половодья переносились осадки за вычетом суммарного испарения и стока в период оттепелей. Причем величина стока в период оттепелей корректировалась с учетом прогнозируемой температуры соответствующего месяца. В первом приближении величину этого стока можно принять из соотношения месячных температур воздуха и величины стока, в период оттепелей полученной при настройке модели.

Прогнозные оценки изменения стока р. Вилии в створе с. Михалишки осуществлялись по следующей схеме. Настраивалась модель по средним многолетним данным по речному стоку, атмосферных осадкам, температуре воздуха и дефицитам влажности воздуха, полученные параметры сохранялись в памяти машины. Затем вводились прогнозные величины для соответствующей перспективы по тем метеостанциям, которые были использованы при настройке модели. Считыва-

лись параметры настройки модели и осуществлялась прогнозная оценка. Полученные значения климатического стока сравнивались между собой по соотношению $\Delta_{кл} = Y_{кл}^{пр} / Y_{кл}^{сов} \cdot 100\%$. Непосредственная прогнозная оценка руслового стока находилась из соотношения $Q^{пр} = Q^{сов} \cdot \Delta_{кл} / 100$, м³/с.

Полученные результаты и их анализ. На рис. 2 представлен хронологический ход годовых, максимальных, минимальных летне-осенних и минимальных зимних расходов воды р. Вилии на трех гидрологических постах: у д. Стешицы, г. Вилейка и с. Михалишки. Как видно из графиков, имеет место уменьшение годового стока в створе с. Михалишки, г. Вилейка и неизменный сток в створе д. Стешицы. В первых двух случаях это обусловлено изъятием стока в ВМВС, а в створе находящемся выше водохранилища, заметных изменений не произошло. Для максимального стока по всей реке наблюдается существенное снижение максимальных расходов воды, и это обусловлено природными факторами (повсеместно на территории Беларуси наблюдается снижение максимальных расходов воды весеннего половодья [12, 13]. Общая тенденция изменения минимального стока на территории Беларуси — это повсеместное увеличение зимнего стока, вызванное современным климатическим потеплением в холодный период, вызывающее частые оттепели и повышение стока, летний сток не изменился, за исключением Подесья, где произошло некоторое повышение стока, вызванное крупномасштабными мелиорациями и сработкой вековых запасов грунтовых вод верхних горизонтов [14]. Колебания минимального стока, в створах г. Вилейка и с. Михалишки, как в летне-осенний, так и в зимний период, определены режимом работы водохранилища и носят предсказуемый характер.

В табл. 1 представлены выборочные оценки основных статистических параметров рассматриваемых временных рядов стока за различные периоды осреднения. Эмпирические кривые обеспеченности для всех периодов осреднения соответствуют трёхпараметрическому гамма-распределению, а соотношение коэффициента асимметрии (C_s) к коэффициенту вариации (C_v), как правило, не превышает $C_s = 1 \dots 2C_v$. Поскольку функция распределения вероятностей стока при таких оценках параметров незначительно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым. Гистограммы, построенные для рассматриваемых расходов воды, свидетельствует, что распределение близко к нормальному.

Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации) для периодов осреднения 1946 – 1976 гг. и 1977 – 2014 гг. (оценка влияния ВМВС) и 1977 – 1987 гг. и 1988 – 2014 гг. (до и в период современного потепления климата) применительно к анализируемым видам стока и створам р. Вилии. В табл. 2 приведены матрицы статистических критериев Стьюдента и Фишера.

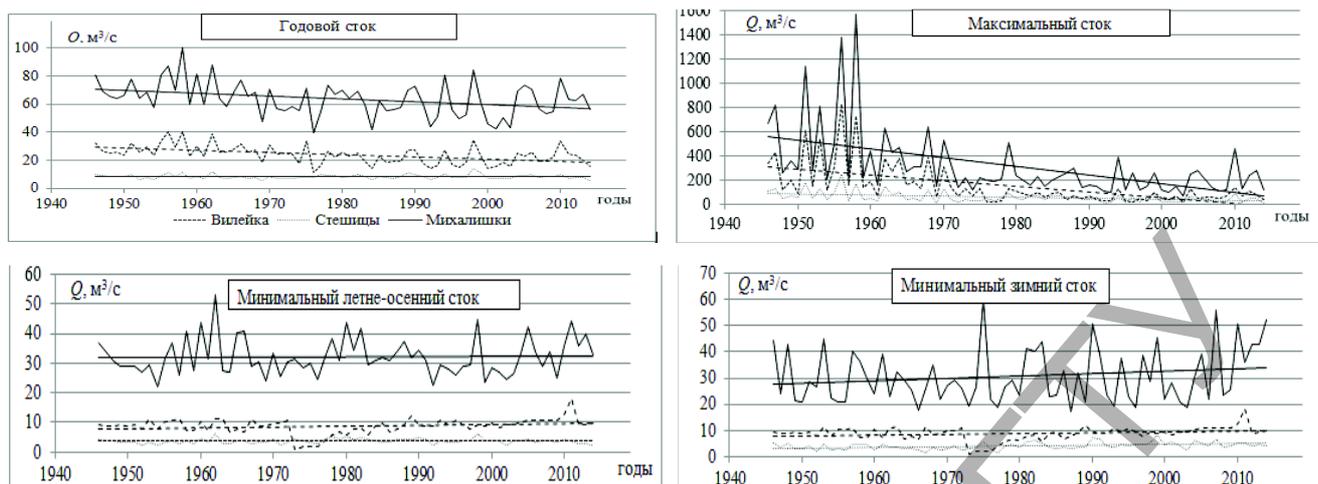


Рисунок 2. Хронологический ход стока р. Вилии в различные сезоны года

Таблица 1. Статистические параметры расходов воды р. Вилии за различные периоды осреднения

Вид стока	средний годовой			максимальный			минимальный летне-осенний			минимальный зимний		
	Стешицы	Вилия	Михалишки	Стешицы	Вилия	Михалишки	Стешицы	Вилия	Михалишки	Стешицы	Вилия	Михалишки
<i>Период осреднения 1946–2014 гг.</i>												
$Q_{cp}, m^3/c$	8,27	24,0	63,7	61,6	152	319	3,73	8,81	32,1	4,16	8,80	30,7
C_v	0,19	0,27	0,19	0,72	1,09	0,88	0,22	0,30	0,19	0,31	0,30	0,34
C_s	1,11	0,47	0,35	1,90	2,32	2,67	0,95	-0,52	0,95	0,67	-0,52	0,88
$Q_{p=5\%}, m^3/c$	11,4	32,8	72,1	147	507	872	5,17	12,2	38,2	6,48	12,2	48,3
$Q_{p=10\%}, m^3/c$	10,5	30,4	68,9	117	360	659	4,75	11,2	36,9	5,84	11,2	43,0
$Q_{p=90\%}, m^3/c$	6,58	18,2	55,8	23,3	24,9	94,5	2,91	6,80	28,3	2,71	6,79	20,5
$Q_{p=95\%}, m^3/c$	6,32	16,9	53,4	18,5	16,3	72,2	2,76	6,43	27,3	2,42	6,43	18,5
<i>Период осреднения 1946–1976 гг.</i>												
$Q_{cp}, m^3/c$	8,09	27,5	67,6	79,2	255	463	3,51	8,25	31,6	3,59	8,25	29,3
C_v	0,19	0,23	0,18	0,72	0,79	0,77	0,22	0,36	0,20	0,29	0,36	0,33
C_s	1,05	0,08	0,38	1,27	1,37	1,77	1,86	-1,40	1,43	0,36	-1,40	1,44
$Q_{p=5\%}, m^3/c$	9,78	37,5	80,5	207	689	1234	4,89	13,1	43,6	5,10	13,1	46,6
$Q_{p=10\%}, m^3/c$	9,39	35,0	77,1	161	534	953	4,49	11,6	40,1	4,69	11,6	41,2
$Q_{p=90\%}, m^3/c$	7,07	21,0	59,7	25,9	86,0	166	2,74	5,88	24,8	2,67	5,88	21,0
$Q_{p=95\%}, m^3/c$	6,82	19,4	57,7	19,9	66,0	131	2,59	5,45	23,5	2,46	5,45	19,5
<i>Период осреднения 1977–2014 гг.</i>												
$Q_{cp}, m^3/c$	8,43	21,2	60,5	47,3	67,5	202	3,91	9,27	32,5	4,62	9,26	31,7
C_v	0,19	0,24	0,18	0,49	0,51	0,48	0,20	0,25	0,18	0,29	0,25	0,35
C_s	1,16	0,71	0,16	0,33	0,59	1,43	0,46	1,08	0,51	0,56	1,09	0,55
$Q_{p=5\%}, m^3/c$	10,2	29,1	71,4	93,2	134	402	5,42	13,0	38,4	6,55	13,0	49,9
$Q_{p=10\%}, m^3/c$	9,80	26,9	68,9	80,3	114	334	4,98	11,9	37,1	6,02	11,9	45,0
$Q_{p=90\%}, m^3/c$	7,38	16,4	53,2	21,0	31,5	109	3,03	7,28	28,7	3,47	7,27	21,0
$Q_{p=95\%}, m^3/c$	7,11	15,5	51,3	16,4	25,6	94,9	2,85	6,90	27,4	3,22	6,89	18,8
<i>Период осреднения 1977–1987 гг.</i>												
$Q_{cp}, m^3/c$	8,26	21,1	61,2	60,1	78,3	237	4,34	7,02	34,4	4,00	7,02	29,0
C_v	0,15	0,18	0,15	0,33	0,45	0,40	0,15	0,24	0,14	0,33	0,24	0,32
C_s	-0,21	-0,39	-0,77	0,02	-0,24	2,59	0,33	-0,29	1,15	0,26	-0,29	0,49
<i>Период осреднения 1988–2014 гг.</i>												
$Q_{cp}, m^3/c$	8,50	21,2	60,2	42,1	63,2	188	3,74	10,2	31,8	4,87	10,2	32,8
C_v	0,21	0,26	0,20	0,54	0,53	0,51	0,21	0,19	0,19	0,26	0,19	0,36
C_s	1,24	0,83	0,34	0,65	0,99	1,31	0,81	2,92	0,60	0,91	2,90	0,47

Таблица 2. Статистические критерии для различных интервалов осреднения и видов стока р. Вилии в исследуемых створах

Створ	д. Стейшицы		г. Вилейка		с. Михалишки	
	<i>t</i>	<i>F</i>	<i>t</i>	<i>F</i>	<i>t</i>	<i>F</i>
Критерий						
Вид стока	Годовой					
1946–1976 — 1977–2014	0,90	1,19	4,56	1,50	2,50	1,29
1977–1987 — 1988–2014	0,47	2,06	0,04	2,06	0,28	1,25
	Максимальный					
1946–1976 — 1977–2014	2,93	6,00	5,13	34,4	3,93	13,7
1977–1987 — 1988–2014	1,21	1,33	1,21	1,12	1,45	0,53
	Минимальный летне-осенний					
1946–1976 — 1977–2014	2,13	1,55	1,57	1,55	0,62	1,27
1977–1987 — 1988–2014	2,43	1,43	5,04	1,38	1,61	1,61
	Минимальный зимний					
1946–1976 — 1977–2014	3,67	1,79	1,55	1,55	0,96	1,34
1977–1987 — 1988–2014	1,85	1,10	5,02	1,39	1,06	1,61

Примечание. Выделенные значения статистически значимы.

Рассмотрим изменение стока р. Вилии, вызванное строительством ВМВС, т. е. сравним изменения, происшедшие со стоком за периоды 1946–1976 гг. и 1977–2014 гг.

Как показал совместный анализ табл. 2 и 3, средний годовой сток на р. Вилии в створах г. Вилейка и с. Михалишки, за рассматриваемые периоды, уменьшился 6,3 и 7,2 м³/с соответственно, причем различия являются статистически значимыми. Это обусловлено изъятием воды в ВМВС. В створе д. Стейшицы имеет место тенденция увеличения среднего годового стока. Увеличение составляет 0,34 м³/с. Хотя эта величина статистически не значима, тенденция вызвана мелиоративными воздействиями как и на территории Полесья [13]. Как показал анализ дисперсий, изменений в структуре колебания среднегодового стока р. Вилии не отмечается, значения *F*-критериев не превышали критических. Максимальные расходы воды существенно уменьшились и составили 31,9, 187,5, 261 м³/с соответственно, при этом изменился и характер колебаний, существенно уменьшилась амплитуда колебаний. Это вызвано наполнением водохранилища в этот период и частыми зимними оттепелями. Минимальный летне-осенний сток реки увеличился во всех рассматриваемых створах и составил в створах г. Вилейка и с. Михалишки 1,02 и 0,9 м³/с (статистически не значимо), соответственно и определено планом управления водохранилищем, то статистически значимое увеличение стока в створе д. Стейшицы равно 0,4 м³/с, вызвано мелиоративными воздействиями [13]. Характер колебаний минимального летне-осеннего стока, судя по *F*-критериям, существенных изменений не претерпел по всем рассматриваемым створам. Аналогичная картина произошла и с минимальным зимним стоком. Увеличение стока составило 1,03, 1,01 и 2,4 м³/с соответственно. В створе д. Стейшицы увеличение произошло, причем статистически значимо, вследствие зимних оттепелей, выше водохранилища, помимо климатического фактора, решающую роль сыграл антропогенный фактор — попуски воды из водохранилища. Характер колебаний минимального зимнего стока существенных трансформаций не претерпел.

Определенный интерес представляет оценка изменения стока при современном потеплении климата. С этой целью сравнивались два периода: 1977–1987 гг. (ввод в эксплуатацию водохранилища до начала современного потепления) и 1988–2014 гг. (начало современного потепления). Как показал анализ, статистически значимых изменений в стоке не произошло. Исключение составил минимальный летне-осенний сток в створах д. Стейшицы и г. Вилейка. В первом случае произошло уменьшение стока на 0,6 м³/с, а во втором — рост на 3 м³/с.

Таким образом, проверка гипотезы об однородности рассматриваемых параметров годового, максимального, минимальных летне-осеннего и зимнего стока для периодов с разными интервалами осреднения основана на использовании критериев Стьюдента и Фишера, как показал анализ, для некоторых отрезков расхождения в параметрах существенны и могут быть признаны статистически достоверными.

Скорость изменения временных рядов расходов воды р. Вилии в рассматриваемых створах оценивалась с помощью линейных градиентов (α), численно равных произведению коэффициента регрессии линейных трендов (a) на 10 лет. Градиент характеризует изменение расхода воды в м³/с за 10 лет. Значения градиентов стока и их значимость с помощью коэффициентов корреляции приведены в табл. 3.

Для всего рассматриваемого периода (1946–2014 гг.) статистически значимые линейные отрицательные градиенты имеют место для среднегодовых расходов воды в створах г. Вилейка и с. Михалишки –1,53 и –2,10 м³/с в 10 лет, соответственно. Это вызвано изъятием воды для ВМВС. Во всех створах градиенты максимальных расходов воды отрицательны и статистически значимы и составляют –10,2, –47,9, –71,9 м³/с за 10 лет, соответственно. Здесь налицо действие двух факторов антропогенного — наполнение водохранилища и природного — современного потепления климата. Для минимального стока статистически значимый положительный градиент наблюдался в зимний период в створе д. Стейшицы и составил 0,24 м³/с за 10 лет, что характерно для всей территории Беларуси [15].

Таблица 3. Статистические параметры линейных трендов изменения расходов воды р. Вилии за различные периоды осреднения

Вид стока	средний годовой			максимальный			минимальный летне-осенний			минимальный зимний		
	Стешицы	Вилия	Михалишки	Стешицы	Вилия	Михалишки	Стешицы	Вилия	Михалишки	Стешицы	Вилия	Михалишки
Период осреднения 1946 – 2014 гг.												
$\alpha \cdot 10, \text{ м}^3/\text{с}$	-0,02	-1,53	-2,10	-10,2	-47,9	-71,9	0,03	0,31	0,12	0,24	0,31	0,95
r	-0,02	-0,48	-0,35	-0,46	-0,58	-0,51	0,07	0,23	0,04	0,37	0,23	0,18
Период осреднения 1946 – 1976 гг.												
$\alpha \cdot 10, \text{ м}^3/\text{с}$	-0,63	-2,11	-5,62	-23,7	-83,5	-151	-0,02	-1,59	-0,64	-0,24	-1,56	-0,63
r	-0,38	-0,31	-0,41	-0,38	-0,38	-0,38	-0,02	-0,49	-0,09	-0,21	-0,49	-0,06
Период осреднения 1977 – 2014 гг.												
$\alpha \cdot 10, \text{ м}^3/\text{с}$	-0,20	0,16	-0,33	-7,06	-0,24	-12,8	-0,34	1,40	-0,13	0,24	1,39	2,94
r	-0,13	0,04	-0,03	-0,34	-0,01	-0,15	-0,47	0,66	-0,02	0,20	0,66	0,30
Период осреднения 1977 – 1987 гг.												
$\alpha \cdot 10, \text{ м}^3/\text{с}$	-2,36	-3,86	-12,7	17,1	16,6	-52,3	-1,22	3,38	-4,39	-0,11	3,38	0,17
r	-0,64	-0,33	-0,47	0,29	0,16	-0,18	-0,61	0,67	-0,30	-0,03	0,67	0,01
Период осреднения 1988 – 2014 гг.												
$\alpha \cdot 10, \text{ м}^3/\text{с}$	-0,61	0,66	0,83	-4,51	11,9	12,5	-0,31	0,82	2,27	-0,11	0,80	4,75
r	-0,27	0,09	0,06	-0,16	0,28	0,10	-0,32	0,33	0,29	-0,07	0,32	0,32

Примечание. Выделенные значения статистически значимы.

Для периода (1946–1976 гг.) наблюдается повсеместное снижение стока. Статистически значимо уменьшился среднегодовой сток в створах д. Стейшицы и с. Михалишки, градиент $-0,63$ и $-5,62 \text{ м}^3/\text{с}$ в 10 лет соответственно; максимальный сток во всех створах: $-23,7$, $-83,5$, $-151 \text{ м}^3/\text{с}$ в 10 лет; минимальный сток как летне-осенний, так и зимний статистически значимо уменьшился в створе г. Вилейка и составил $-1,59$ и $-1,56 \text{ м}^3/\text{с}$ в 10 лет соответственно.

В период с 1977 по 2014 гг. (время функционирования ВМВС) преобладает тенденция уменьшения стока. Статистически значимо уменьшался максимальный и минимальный летне-осенний сток в створе д. Стейшицы $-7,06$ и $-0,34 \text{ м}^3/\text{с}$ в 10 лет, соответственно. Статистически значимое увеличение градиента минимального стока в створе г. Вилейка вызвано особенностями управления водным режимом водохранилища.

В период с 1977 по 1987 гг. (период работы водохранилища до начала современного потепления) наблюдалось преобладание уменьшения градиента стока повторяя, как правило, предыдущий период.

В период современного потепления климата статистически значимых градиентов не наблюдалось. Это обусловлено влиянием водным режимом водохранилища.

Таким образом, в результате выполненного анализа во временных рядах стока р. Вилии установлена статистическая неоднородность, т. е. в бассейне реки имеет место интенсивная хозяйственная деятельность, существенно нарушающая естественный гидрологический режим.

Современные статистические оценки стока р. Вилии в створе с. Михалишки. Для рек, в бассейнах которых имеет место интенсивная хозяйственная деятельность, существенно нарушающая естественный

гидрологический режим рек, определение расчетных гидрологических характеристик производят по двум расчетным схемам [3]:

- приведение гидрологических рядов наблюдений к естественным однородным стационарным условиям;
- гидрологические ряды наблюдений приводят к бытовому стоку за весь период наблюдений в предположении, что сложившийся комплекс хозяйственной деятельности с учетом реальных планов развития народного хозяйства действовал с начала наблюдений.

В нашем случае целесообразно воспользоваться второй схемой. Для оценки водных ресурсов р. Вилии на территории Беларуси необходимо получить параметры временных стоковых рядов в створе с. Михалишки. Как видно из табл. 2, нарушение в однородности временных рядов стока р. Вилии в створе с. Михалишки имеет место для среднегодовых и максимальных расходов воды. Восстановление стока за весь период наблюдений произведен методами регрессии в период с 1946 по 1976 гг., а в качестве реки-аналога использован створ д. Стейшицы на р. Вилли. Восстановленные ряды проверялись на однородность с использованием статистических методов. Определение основных расчетных гидрологических характеристик производились по данным за весь период наблюдений (1946–2014 гг.) без введения поправок на хозяйственную деятельность табл. 4. При этом, для среднегодовых расходов воды использовалось распределение Пирсона III типа, а для максимальных расходов воды — трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого-Менкеля, которые рекомендуются нормативными документами [3]. Минимальные расходы воды не требуют восстановления, так как попуски воды из водохранилища в маловодья регулировались в рамках естественного стока.

Таблица 4. Статистические параметры характерных расходов воды р. Вилии в створе с. Михалишки за расчетный период 1946–2014 гг.

Параметры	Вид стока			
	средний годовой	максимальный	минимальный летне-осенний	минимальный зимний
Q_{cp} , м ³ /с	59,7	262	32,1	30,7
$Q_{p=1\%}$, м ³ /с	89,1	973	41,9	59,8
$Q_{p=5\%}$, м ³ /с	78,9	621	38,2	48,3
$Q_{p=10\%}$, м ³ /с	73,9	490	36,9	43,0
$Q_{p=25\%}$, м ³ /с	71,4	413	34,5	35,9
$Q_{p=50\%}$, м ³ /с	58,7	222	31,9	29,5
$Q_{p=75\%}$, м ³ /с	55,0	149	29,9	24,3
$Q_{p=90\%}$, м ³ /с	46,9	104	28,3	20,5
$Q_{p=95\%}$, м ³ /с	44,2	84,5	27,3	18,5
$Q_{p=99\%}$, м ³ /с	35,5	58,0	25,7	15,4
C_v	0,18	0,71	0,19	0,34
C_s/C_v	2,89	2,81	4,95	2,58

Таким образом, полученные обеспеченные величины стока р. Вилия в створе с. Михалишки могут послужить основой для принятия тех или иных управленческих решений.

Экологический сток. Река Вилия и ее притоки имеют важное природоохранное значение для обеспечения благоприятных условий для проходных, полупроходных и других видов рыб, а также для сохранения биологического и ландшафтного разнообразия прилегающих территорий. Литовская часть р. Вилии (Нерис) является зоной «Натура-2000», которая создана для охраны лосося, выдры, речной миноги, горчака и других видов рыб.

Специалистами ЦНИИКИВР с использованием математического моделирования водного режима, учетом

условий проточности по скоростному режиму и анализа расчетных глубин потока р. Вилии в створе с. Михалишки получены значения экологического стока, равного 20,8 м³/с и соответствующий ему уровень воды — 118,5 м БС при средней скорости течения воды — 0,4 м/с.

Используя вышеприведенную методику, нами определен экологический и свободный сток р. Вилии в створе р. Михалишки. Так как при приведении рядов стока к однородным условиям использовалась вторая схема, которая учитывает влияние существующих потребителей на водосборе, то экологический и свободный сток определен с учетом этих потребителей (табл. 5).

Таблица 5. Внутригодовое распределение стока р. Вилии в створе д. Михалишки

Месяцы	Водность года								
	средний			маловодный			Очень маловодный		
Вид стока	естественный	экологический	свободный	естественный	экологический	свободный	естественный	экологический	свободный
Март	90,9	67,9	22,9	86,5	67,9	18,5	84,9	67,9	16,9
Апрель	128	90,9	37,3	152	90,9	60,9	114	90,9	22,7
Май	67,5	48,0	19,5	54,3	48,0	6,3	59,9	48,0	12,0
Июнь	56,1	28,9	27,2	38,0	28,9	9,1	36,1	28,9	7,21
Июль	44,4	24,3	20,1	49,5	24,3	25,2	30,3	24,3	6,06
Август	35,9	21,1	14,9	30,6	21,1	9,6	26,3	21,1	5,25
Сентябрь	36,2	21,1	15,1	33,3	21,1	12,3	26,3	21,1	5,25
Октябрь	43,6	23,3	20,3	39,5	23,3	16,2	29,1	23,3	5,81
Ноябрь	54,9	25,5	29,4	48,6	25,5	23,1	31,9	25,5	6,36
Декабрь	46,3	28,8	17,6	52,8	28,8	24,0	36,0	28,8	7,18
Январь	40,9	23,4	17,5	41,8	23,4	18,5	29,2	23,4	5,83
Февраль	59,5	21,6	37,9	33,5	21,6	11,9	26,9	21,6	5,38
Год	58,7	35,4	23,3	55,0	35,4	19,6	44,2	35,4	8,82

Внутригодовое распределение экологического стока осуществлялось по процентному распределению естественного стока очень маловодного года р. Вилии в створе с. Михалишки. Полученные результаты тесно коррелируют с результатами другими авторами с использованием других методик, поэтому значения экологического стока вполне соответствуют реальным значениям. Как видно из таблицы, резерв свободного стока в самые маловодные месяцы составляет 5,25 м³/с.

Расчетный экологический сток является величиной условной и зависит от принятой модели расчета.

Поэтому реальные данные больших обеспеченностей наблюдаемые на реке, могут служить определенным ориентиром при оценке экологического стока. Анализ минимальных расходов воды р. Вилия в створе с. Михалишки за весь период инструментальных наблюдений дал следующие результаты: наименьший расход периода открытого русла составил 22,0 м³/с и наблюдался два раз с 02.07 по 03.07.1954 г.; наименьший расход зимнего периода составил 17,3 м³/с и наблюдался 26.12.1986 г. В табл. 6 представлены результаты анализа особо маловодных периодов за весь период наблюдений р. Вилия в створе с. Михалишки.

Таблица 6. Оценка особо маловодных периодов р. Вилия в створе с. Михалишки

Год	Количество дней маловодного периода	Дата	Среднесуточный расход воды, м³/с		
1950	7	4.01	23,4		
		5.01	22,5		
		6.01	22,9		
		7.01	23,5		
		8.01	23,4		
		9.01	23,1		
		10.01	23,1		
	4	14.01	22,30		
		15.01	20,70		
		16.01	21,80		
		17.01	22,80		
		1954	1	27.11	22,10
		1955	1	1.12	21,40
		1961	1	31.12	23,10
1976	2	27.12	23,00		
		28.12	22,80		
1988	1	2.12	23,20		
1992	14	15-28.08	23,10		
	3	1.09	22,50		
		2.09	22,50		
		3.09	23,10		
2002	2	3.12	21,70		
		4.12	22,50		

Прогнозные оценки изменения стока р. Вилии на территории Беларуси. В настоящее время на территории бассейна р. Вилии 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 экономический спад, недоучет их может привести к ошибкам при определении расчетных параметров.

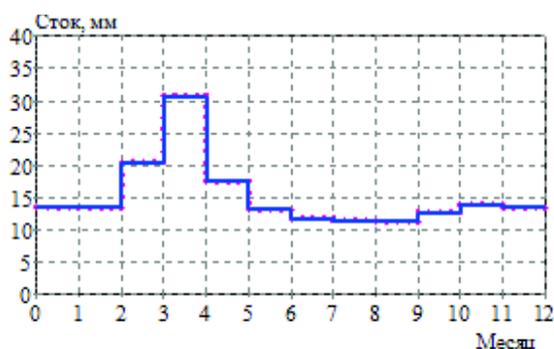
В ходе исследования использовалась климатическая информация, а именно временные ряды наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками с 1961 по 2010 гг. по метеостанциям, равномерно расположенным по бассейну р. Вилии.

Тенденции изменения метеорологических характеристик в бассейне р. Вилии представлены в работе [16]. Результаты оценок тенденций метеорологических характеристик по метеостанции г. Вилейка представлены в табл. 7.

Таблица 7. Обобщение результатов расчетов для оценки тенденций изменения метеорологических характеристик в бассейне р. Вилия за период с 1986 по 2010 гг. в сравнении с периодом с 1961-1986 гг.)

Интервал осреднения																
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI	Год
<i>Изменение температуры воздуха, °С</i>																
2,8	2,3	1,5	1,1	0,1	0,4	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,5	1,9	0,9	0,8	0,0	0,9
<i>Изменение количества осадков, %</i>																
16	22	5	-19	9	14	0	1	-1	4	-18	-12	6	-2	5	-5	1

По рассмотренной методике нами выполнены прогнозные оценки по р. Виля в створе с. Михалишки для двух сценариев развития климата А1В и В1 в двух вариантах. Первый вариант без учета оттепелей и второй вариант с учетом оттепелей. Детальный анализ изменения стока бассейна р. Неман, в т. ч. и р. Вилии в створе с. Михалишки выполнен в работе [16]. Исходя из анализа полученных прогнозных оценок изменения речного стока рек бассейна Немана, предпочтение следует отдавать варианту 2. На рис. 3 представлены графические материалы настройки модели прогнозирования стока по 2 варианту.



— измеренный сток, --- рассчитанный сток

Рисунок 3. Измеренный и рассчитанный сток р. Вилии в створе с. Михалишки (результаты настройки модели)

На рис. 4 представлены современные и прогнозные значения речного стока для различных прогнозных климатических сценариев по варианту 2.

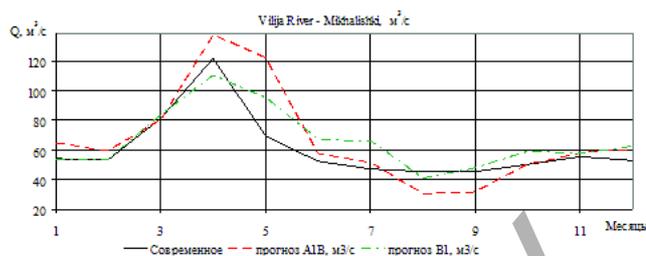


Рисунок 4. Современный и прогнозные гидрографы стока р. Вилии в створе с. Михалишки

В табл. 8 приведены результаты расчетов прогнозных оценок для различных сценариев климата и двух вариантов модели.

Полученные значения стока характеризуют средние многолетние значения. Как видно из табл. 8, существенных изменений стока не произойдет, так как прогнозные климатические параметры значимо не изменились. По варианту прогноза А1В прогнозируется некоторое увеличение зимнего и уменьшение летнего стока, при этом произойдет некоторое изменение гидрографа весеннего половодья в сторону увеличения максимальных расходов и продолжительности самого половодья. По сценарию В1 отмечается некоторое уменьшение максимальных расходов весеннего половодья, но при этом произойдет некоторое увеличение времени спада нисходящей ветви гидрографа. В летние месяцы сток существенно не изменится.

Таблица 8. Прогнозные оценки изменения стока р. Вилии в створе с. Михалишки

Параметр	Интервал осреднения												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Современные, м³/с	54.2	53.3	81.4	122	69.5	52.4	47.4	45.5	45.4	50.2	55.3	53.1	60.8
<i>Вариант 1</i>													
Прогноз А1В, %	135	119	182	181	167	121	160	119	114	122	129	162	135
Прогноз В1, %	145	121	160	158	161	120	132	91	106	145	140	189	145
<i>Вариант 2</i>													
Прогноз А1В, %	119	112	99	113	176	110	109	67	70	100	105	115	119
Прогноз В1, %	99	100	103	91	138	129	140	90	106	118	104	118	99

Перспективы новых водопользователей в водосборе. Полученные уточненные гидрологические характеристики стока воды р. Вилии в створе с. Михалишки в той или иной степени учитывают существующую структуру водопотребителей и водопользователей необходимы для принятия обоснованных проектных решений. Одним из важных потребителей в бассейне р. Вилии в ближайшее время станет производственное водоснабжение Белорусской АЭС. Территория Островецкой площадки АЭС располагается в северо-западной части Беларуси в пределах Островецкого района Гродненской области примерно в 2,6–3,0 км юго-восточнее н.п. Го́за. Река Ви́лия рассматривается в качестве основного источника технического водоснабжения Белорусской АЭС. Атомная электростанция с реакторами ВВЭР-1000 представляет собой сложный комплекс производственных зданий и сооружений, технологически связанных между собой. Для обеспечения надежного бесперебойного питания водой необходима

постоянная подпитка свежей воды для двух энергоблоков –2,54 м³/с, для четырех энергоблоков –5,08 м³/с.

При проведении гидрологических изысканий на Островецкой площадке размещения АЭС и оценке воздействия на окружающую среду Белорусской АЭС на стадии обоснования инвестиций РУП «ЦНИИКИВР» в 2008–2009 годах обоснована общая достаточность водных ресурсов р. Вилии как источника производственного водоснабжения АЭС.

Минимальный расчетный среднемесячный расход 95% обеспеченности в р. Вилии в створе с. Михалишки размещения водозабора производственного водоснабжения составляет 26,3 м³/с. Следовательно, минимальный допустимый расход воды в р. Вилии после забора воды для производственного водоснабжения Белорусской АЭС при любых гидрологических условиях должен составлять не менее 21,1 м³/с.

При возникновении возможных дефицитных периодов в качестве компенсационных мер могут быть ис-

пользованы водные ресурсы Вилейского водохранилища, которое, исходя из своего большого полезного объема, может рассматриваться как наиболее надежный резервный источник производственного водоснабжения Белорусской АЭС.

Анализ планируемого на перспективу изъятия воды из Вилейского водохранилища для целей перекачки по ВМВС и для других водопользователей позволил специалистам ЦНИИКИВР сделать вывод о целесообразности и принципиальной возможности использования Вилейского водохранилища в качестве основного резервного источника производственного водоснабжения Белорусской АЭС. Существенный фактор, который нужно учитывать при организации попусков из Вилейского водохранилища, — относительная удаленность данного водохранилища (более 100 км) от участка размещения поверхностного водозабора Белорусской АЭС, что обуславливает время добегания от водохранилища до требуемого участка в 3–4 суток. Поэтому при возникновении дефицитов воды в контексте выполнения экологических ограничений на указанный краткосрочный период до подхода дополнительных объемов из Вилейского водохранилища в случае необходимости могут быть в щадящем режиме (не на полный диапазон сработки) произведены попуски из Ольховского водохранилища (водохранилища Ольховской ГЭС) и (или) Снягянского водохранилища (водохранилища Рачунской ГЭС).

Таким образом, дополнительное безвозвратное водопотребление АЭС и планируемый на перспективу рост безвозвратных изъятий для нужд водопользования в бассейне реки, которое по данным ЦНИИКИВР не превысит 10% стока 95% обеспеченности, не окажет существенного воздействия на гидрологический режим р. Вилия.

Заключение. На основе комплексного анализа гидрометрической информации по р. Вилии в створах д. Стешицы, г. Вилейка и с. Михалишки за период инструментальных наблюдений с 1946 по 2014 гг. за среднегодовыми, максимальными, минимальными летне-осенними и зимними расходами воды продолжительностью 69 лет установлена неоднородность во временных рядах среднегодовых расходов воды по створам г. Вилейка и с. Михалишки; максимальных расходов воды по всем рассматриваемым створам; минимальных летне-осенних и зимних расходов воды в створах г. Вилейка и д. Стешицы.

По створу с. Михалишки гидрологические ряды наблюдений приводят к бытовому стоку за весь период наблюдений в предположении, что сложившийся комплекс хозяйственной деятельности с учетом реальных планов развития народного хозяйства действовал с начала наблюдений. Для створа с. Михалишки средний многолетний расход составляет $-59,7 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальный $-1570 \text{ м}^3/\text{с}$, наименьший летне-осенней межени $-22,0 \text{ м}^3/\text{с}$, зимней межени $-17,3 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для створа с. Михалишки определен экологический сток, который равен $21,1 \text{ м}^3/\text{с}$, построены гидрографы экологического стока и определен свободный сток в годовом разрезе для различных по водности лет.

На основе гидролого-климатической гипотезы и многофакторной модели, включающей стандартное уравнение водного и теплоэнергетического балансов речных водосборов с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и

климатический сток) в годовом разрезе получены прогнозные характеристики изменения стока по двум сценариям развития климата А1В и В1. По варианту прогноза А1В прогнозируется некоторое увеличение зимнего и уменьшение летнего стока, при этом произойдет некоторое изменение гидрографа весеннего половодья в сторону увеличения максимальных расходов и продолжительности самого половодья. По сценарию В1 отмечается некоторое уменьшение максимальных расходов весеннего половодья, но при этом произойдет некоторое увеличение времени спада нисходящей ветви гидрографа. В летние месяцы сток существенно не изменится.

Наибольшее влияние на объем и режим стока р. Вилия оказывает функционирование Вилейско-Минской водной системы. Для переброски поверхностных вод в бассейн р. Днепр ежегодно изымается более 110 млн м^3 воды, что составляет около 91% забираемых из поверхностных водных объектов бассейна вод. Объем изъятия воды составляет менее 10% от годового стока 95% обеспеченности в створе н.п. Михалишки, следовательно, заметного влияния на изменение стокового режима реки оказать не может.

Для обеспечения надежного бесперебойного питания водой Белорусской АЭС необходима постоянная подпитка свежей воды для двух энергоблоков $-2,54 \text{ м}^3/\text{с}$, для четырех энергоблоков $-5,08 \text{ м}^3/\text{с}$. Минимальный расчетный среднемесячный расход 95% обеспеченности в р. Вилия в створе с. Михалишки размещения водозабора производственного водоснабжения составляет $26,3 \text{ м}^3/\text{с}$. Дополнительное безвозвратное водопотребление АЭС и планируемый на перспективу рост безвозвратных изъятий для нужд водопользования в бассейне реки не превысит 10% стока 95% обеспеченности.

При возникновении возможных дефицитных периодов в качестве компенсационных мер могут быть использованы водные ресурсы Вилейского водохранилища с привлечением Ольховского и Снягянского водохранилищ, что может рассматриваться как наиболее надежный резервный источник производственного водоснабжения Белорусской АЭС.

Таким образом, дополнительное безвозвратное водопотребление АЭС и планируемый на перспективу рост безвозвратных изъятий для нужд водопользования в бассейне реки не окажет существенного воздействия на гидрологический режим р. Вилия.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёры, вадасховішчы, турыскі патэнцыял водных аб'ектаў / Маст.: Ю.А. Тарэеў, У.І. Цярэнцьеў – Мінск: БелЭн, 2007. – 480 с.
2. Волчек, А.А. Автоматизация гидрологических расчетов / А.А. Волчек // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды: труды Международной научно-практической конференции по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений. / Брест. политехн. институт.- Биберах - Брест – Ноттингем, 1998. – С. 55 – 59.
3. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики: ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.

4. Рекомендации по расчету минимально допустимых расходов воды, не подлежащих изъятию из рек в условиях Республики Беларусь: Приказ Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды – №3 от 8.01.2003 г.
5. Фащевский, Б.В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока / Б.В. Фащевский. – Минск, 1989. – 22 с.
6. Маркин, В.Н. Внутригодовое распределение экологического стока малых рек / В.Н. Маркин // Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России – М.: МГУП, 2005.
7. Мезенцев, В.С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования / В.С. Мезенцев // Водные ресурсы, 1995. – Том 22, №3. – С. 299 – 301.
8. Волчек, А.А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) / А.А. Волчек // Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР), 1986. – №12. – С. 17–21.
9. 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.
10. Валуев, В.Е. К вопросу интерполяции, осреднения и инженерных расчетов воднобалансовых характеристик / В.Е. Валуев, А.А. Волчек, Н.Т. Юрченко // Воспроизводство плодородия мелиорируемых земель Сибири: Тр. / СибНИИГиМ. – Красноярск, 1991. – С. 21 – 39.
11. Инженерные расчеты воднобалансовых характеристик / В.Е. Валуев, А.А. Волчек, О.П. Мешик, В.Ю. Цилиндь: сб. тез. докл. XXI научно-технической конференции в рамках проблемы «Наука и мир» // Брест. политехн. институт. – Брест, 1994. – Ч. II. – С. 89 – 90.
12. Логинов, В.Ф. Колебания годового стока воды р. Неман у г. Гродно / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек // Водные ресурсы, 2006. – Т. 33, №6. С. 635–663.
13. Логинов, В.Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек. – Минск: Тоншик, 2006 – 160 с.
14. Волчек, А.А. Половодья на реках Беларуси: закономерности формирования и прогноз / А.А. Волчек, Ан. А. Волчек // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 216 с.
15. Волчек, А.А. Минимальный сток рек Беларуси / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина. – Брест: БрГУ, 2010. – 169 с.
16. The Strategic Framework for Adaptation to Climate Change in the Neman River Basin / United Nations Development Programme in Belarus and United Nations Economic Commission for Europe // V.N. Korneev, A.A. Volchak, L.N. Hertman et al. - Brest, 2015. – p. 64.

Материал поступил в редакцию 04.05.17

VOLCHAK A.A. Water resources of the Viliya River on Belarussian territory: curent status and prognosis

Generalized research results of the Viliya river runoff fluctuation (at vilage Steshicy, Vilejka town and vilage Mihalishki) for the whole period of instrumental observation (1946-2014) for annual, minimum summer and winter flow rates are presented. Forcast estimation of the changes of the runoff according to climate change scenario A1B are given. Compensation measures for possible water deficiancy are shown.

УДК 556.048(574)

А.А. Волчек

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ВОДЫ КРУПНЫХ ОЗЁР НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА БАЛХАШ

Введение. Озёра являются уникальными водными объектами и имеют важное экономическое и экологическое значение. Они служат накопителями чистой пресной воды, а также выполняют функцию регулирования поверхностных и подземных вод. В связи с тем, что водообмен в озёрах замедлен, они являются более уязвимыми по сравнению с реками, могут служить чувствительным индикатором изменений большинства климатических факторов. В последнее время природно-климатические факторы и антропогенные воздействия вызвали трансформацию гидрологического режима озёр и в ряде случаев существенную. Поэтому появилась необходимость экологического прогноза в условиях изменяющегося климата и антропогенных воздействий на водные объекты, которая ставит перед исследователями ряд конкретных задач по изучению эволюции озёрных экосистем, разработке количественных, качественных диагностических, имитационных и прогностических моделей.

Существенной трудностью при моделировании гидрологического режима озёр во времени является недостаток данных для ретроспективного анализа их эволюции. Кроме того, проблема усугубляется возрастающим антропогенным влиянием на водные экосистемы, сложностью выделения природных и антропогенных составляющих в наблюдаемых процессах. Индивидуальность в формировании водного режима озёр требует в каждом конкретном случае отдельного рассмотрения. Однако создание математических моделей, отражающих объективные закономерности развития гидрологических процессов во времени, и построение прогнозов представляет значительный научный и практический интерес и разрабатывается в самых различных направлениях. Одной из главных количественных гидрологических характеристик озера является его уровень, с помощью которого можно выявить и отследить результаты тех или иных воздействий. Кроме того, данные об уровне