УДК 556; 552 (476) *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-31-56*

Оригинальная статья/Original paper

Водохозяйственный баланс водохранилища «Светлогорское»

А. А. Волчек, С. И. Парфомук, С. В. Сидак, Н. Н. Шешко, Н. Н. Шпендик

harchik-sveta@mail.ru

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование водохозяйственного баланса водохранилища «Светлогорское» является актуальным как с практической, так и с научной точек зрения, поскольку результаты работы будут способствовать рациональному использованию водных ресурсов и устойчивому развитию региона. **Методы.** В работе использованы методы расчета водного баланса, определения экологического стока, а также методы определения основных характеристик временных рядов гидрологических данных. **Результаты.** Дана современная оценка водных ресурсов рек Березины и Сведи. Выполнен водохозяйственный баланс водохранилища «Светлогорское». Определены объемы изъятия воды из рек Березины и Сведи на нужды водохранилища. В качестве оценки допустимых объемов изъятия принята разница стока расчетной обеспеченности (75 %) и величины стока данной обеспеченности, вычисленной методом переноса обеспеченностей. Это позволяет наиболее объективно оценить объем забора воды, оказывающий минимальное воздействие на естественный гидрологический режим реки. Общий объем забора из р. Березины составил 37 720 тыс. м^3, из р. Сведи – 3673,71 тыс. м^3. Рассмотрены экологические риски, связанные с климатическими изменениями. Представлены перспективные направления развития исследований и водохозяйственного мониторинга Светлогорского водохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохранилище, водохозяйственный баланс, водопользование, сток, экологический сток, климатические изменения, прогноз, риски

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Х25КИ-036).

Для цитирования: Волчек А. А., Парфомук С. И., Сидак С. В., Шешко Н. Н., Шпендик Н. Н. Водохозяйственный баланс водохранилища «Светлогорское» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 31–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-1-31-56; EDN: SZEVQK

© Волчек А. А., Парфомук С. И., Сидак С. В., Шешко Н. Н., Шпендик Н. Н., 2026

Water management balance of the Svetlogorskoye reservoir

Aleksandr A. Volchek, Sergey I. Parfomuk, Svetlana V. Sidak, Nikolay N. Sheshko, Natalia N. Shpendik

harchik-sveta@mail.ru

Brest State Technical University, Brest, Belarus

ABSTRACT

Relevance. The study of the water balance of the Svetlogorsk reservoir is relevant from both a practical and scientific point of view, since the results of the work will contribute to the rational use of water resources and the sustainable development of the region. **Methods.** The work used methods for calculating water balance, methods for determining environmental flow, as well as methods for determining the main characteristics of time series of hydrological data. **Results.** A modern assessment of the water resources of the Berezina and Sveda rivers is given. A water management balance of the Svetlogorsk reservoir is completed. The volumes of water withdrawal from the Berezina and Svedi rivers for the needs of the reservoir have been determined. The difference between the calculated security runoff (75 %) and the value of the current security runoff calculated by the security transfer method was used as an estimate of the allowable withdrawal volumes. This allows the most objective assessment of the volume of water intake, which has minimal impact on the natural hydrological regime of the river. The total volume of intake from the Berezina river was 37,720 thousand m^3, from the Sved river – 3,673.71 thousand m^3. The environmental risks associated with climate change are considered. Promising directions for the development of research and water management monitoring of the Svetlogorsk reservoir are presented.

KEYWORDS: reservoir, water management balance, water use, runoff, ecological runoff, evaporation from the water surface, forecast, risks

Financing: The study was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant No. X25KI-036).

For citation: Volchek A. A., Parfomuk S. I., Sidak S. V., Sheshko N. N., Shpendik N. N. Water management balance of the Svetlogorskoye reservoir. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 1. P. 31–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-1-31-56; EDN: SZEVQK

ВВЕДЕНИЕ

Современное климатическое потепление вызвало учащение и увеличение продолжительности засушливых периодов[1] [1], приводящих к изменениям уровенного режима водоемов [2–5]. В этой ситуации для получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур необходимо дополни-

1 Глобальное потепление // Всероссийский Экологический портал. URL: https://ecoportal.su/public/klimat/view/2110.html (дата обращения: 10.06.2025).

тельное увлажнение, требуется накопить воду в многоводный период, чтобы в засушливый направить ее на полив сельскохозяйственных культур [6] при сохранении объемов экологического стока – важнейшего фактора естественных гео- и экосистем.

Методы оценки экологического стока начали развиваться довольно давно. Первые оценки минимального стока появились в 1940-х годах в США. Их целью было определение минимального стока, обеспечивающего условия для ихтиофауны. Поскольку влияние строительства плотин, выпрямления русел и регулирования стока на биоценозы значительно возросло, к настоящему времени разработано более 200 методов его оценки. Все они могут быть классифицированы по четырем группам: чисто гидрологические методы, методы гидравлической оценки, гидробиологические методы и комплексные методы [7–9].

Следует отметить передовые исследования [10] по оценке экологического стока для 128 крупнейших рек мира, в которых используется модель WaterGAP2. Эта модель позволяет рассчитать весь запас возобновляемых водных ресурсов с использованием уравнения водно-энергетического баланса. Экологический сток здесь определяется как 20–50 % от общего запаса возобновляемых водных ресурсов территории [10]. Однако такие упрощенные методы могут представлять значительную экологическую угрозу, поскольку забор 50 % воды приводит к ухудшению состояния водосборной геосистемы. В исследовательской работе [7] представлен подробный обзор подходов к оценке экологического стока, применяемых сегодня в мире. Авторы анализируют как их преимущества, так и недостатки. Одним из преимуществ является то, что метод может применяться даже при отсутствии наблюдений, показывающих связь расхода воды с биологическим (экологическим) состоянием реки и прилегающей территории.

Равнинный рельеф Беларуси затрудняет создание крупных водохранилищ, поэтому необходим поиск локальных мест аккумуляции воды в прудах или использование в полном объеме существующих водохранилищ.

Водохранилище «Светлогорское» создано на территории бывших торфоразработок южнее города Светлогорска Минской области. Строительство водохранилища было начато в 1980 г., завершение работ планировалось на 1985 г., однако по ряду объективных и субъективных причин затянулось. При запуске водохранилища в эксплуатацию в 1989 г. насосы не смогли его наполнить более чем наполовину от запланированного уровня. С развалом СССР вышла из строя и насосная система водоема, сейчас водохранилище наполняется самотеком из р. Березины.

Площадь наливного водохранилища достигает 14,4 км^2 (в ненаполненном состоянии – 6,3 км^2), длина – 6,6 км, средняя ширина – 2,14 км, максимальная

ширина – 3,15 км. Максимальная глубина водохранилища составляет 4,5 м, в карьерах – до 18 м. Полный объем воды 64,43 млн м^3, полезный – 54,60 млн м^3. Колебание уровня воды в годовом разрезе до 4 м. Водохранилище предназначено для увлажнения сельскохозяйственных угодий на площади 49,8 тыс. га, а также для рыбоводства и рекреации [11].

Ограждающая дамба – земляная, трасса дамбы водоема проходит по озерно-аллювиальной равнине времени валдайского оледенения и по водно-ледниковой равнине днепровского оледенения. Абсолютные отметки поверхности дамбы составляют 130,6–142,6 м, ее длина 15,3 км, однородная, намывная, в теле дамбы предусмотрен трубчатый дренаж из асбестоцементных перфорированных труб диаметром 150–200 мм, крепление откосов – за счет травяного покрова, по гребню – песчано-гравийное покрытие, максимальная высота дамбы – 7,7 м. Для перехвата профильтровавшейся воды из водохранилища вдоль низового откоса дамбы предусмотрены два ловчих канала протяженностью 8587 м и 6983 м с максимальными глубинами 5,4 м и 5,7 м соответственно. Грунтовые воды по трассе дамбы вскрыты на глубине 0,3–4,5 м от поверхности земли.

Наполнение водохранилища производилось за счет стока р. Березины, подача которого к комплексу осуществляется по Светлогорскому магистральному каналу протяженностью холостой части 22,66 км. Забор воды из р. Березины (в период с декабря по май включительно) предусмотрен насосной станцией № 1 с подачей ее в Светлогорский магистральный канал. Наполнение водохранилища осуществляется с помощью насосной станции № 2, которая в вегетационный период также подает воду на увлажнение сельскохозяйственных угодий. Подача воды на увлажняемые системы идет по оросительным каналам общей протяженностью более 49 км.

В 1996 г. строительство водохранилища было приостановлено. Незаконченное строительством водохранилище передано на баланс Светлогорскому ПМС в ноябре 1998 г. Заполненный в 1996 г. объем воды до уровня мертвого объема постепенно уменьшался. Ложе водохранилища превратилось в заболоченную территорию, заросшую древесно-кустарниковой и травяной растительностью на 50–60 %.

Цель настоящего исследования – разработка водохозяйственного баланса водохранилища «Светлогорское» для его реконструкции с учетом современных климатических изменений [12, 13].

В рамках проведенной работы решены следующие задачи:

– определены водные ресурсы р. Березины в створе г. Светлогорска и р. Сведи в створе отбора воды в водохранилище с учетом современных климатических колебаний и антропогенных воздействий;

– установлена потребность в водоснабжении сельскохозяйственных угодий при современном потеплении климата;

– дана прогнозная оценка гидролого-климатическим показателям;

– апробирована методика определения экологического стока на реках Березине и Сведи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водохозяйственный баланс является основой комплексного использования водных ресурсов водохранилища, его разработка необходима для обеспечения устойчивого водопользования и управления гидротехническими сооружениями[2]. В случае нарушения водохозяйственного баланса могут наступить: гидрологическая нестабильность, ведущая к аномальным уровням воды (переполнению или осушению); ухудшение гидробиологических условий водных объектов, включая эвтрофикацию и дефицит кислорода; нарушение водного режима прилегающих территорий, что может спровоцировать деградацию экосистем; экономические потери при необходимости реконструкции инфраструктуры [14].

Существует несколько методов расчета водохозяйственного баланса, которые применяются в зависимости от целей исследования, доступных данных и особенностей водного объекта. Основные методики включают:

1. Метод водного баланса: основан на уравнении баланса, учитывающем приходные и расходные компоненты водохранилища: атмосферные осадки, приток воды, испарение, фильтрацию и водопотребление.

2. Гидрологический метод: использует данные о стоке рек, осадках и испарении для определения водных ресурсов и их распределения.

3. Метод математического моделирования: основан на построении гидродинамических моделей, учитывающих физические процессы движения воды и взаимодействие с окружающей средой.

4. Метод статистического анализа: применяется для прогнозирования изменений водного баланса на основе многолетних наблюдений и статистических закономерностей.

5. Метод спутникового мониторинга: использует данные дистанционного зондирования для оценки уровня воды, испарения и других параметров.

6. Метод гидрохимического анализа: позволяет оценить качество воды и влияние антропогенных факторов на водохозяйственный баланс.

В настоящее время подходы к разработке водохозяйственного баланса определены ТПК 17.06-03-2008[3], Основное уравнение водохозяйственного баланса имеет вид:

---

2 О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 февр. 2022 г. № 91 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22200091&p1=1 (дата обращения: 20.06.2025).

3 Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Порядок проведения расчета и оформления водохозяйственных балансов. ТКП 17.06-03-2008 (02120). Минск, 2018. 25 с.

$$B = W_{вх} + W_{бок} + W_{пэв} + W_{вв} + W_{дот} \pm \Delta V - W_{исп} - W_{ф} - W_{у} - W_{пер} - W_{вдп} - W_{кп}, \quad (1)$$

где B – значение баланса на расчетном участке;

$W_{вх}$ – объем стока, поступающий из верхнего течения рассматриваемого водного объекта, м^3;

$W_{бок}$ – объем воды, формирующийся в пределах расчетного участка и представляющий, как правило, боковую приточность;

$W_{пэв}$ – объем водозабора, формирующийся за счет добычи из подземных источников;

$W_{вв}$ – возвратные воды на водохозяйственном участке в виде сточных вод;

$W_{дот}$ – объем воды за счет межбассейновых переброс;

$\pm \Delta V$ – объем воды на наполнение и опорожнение прудов и водохранилищ на расчетном водохозяйственном участке;

$W_{исп}$ – потери на дополнительное испарение в результате увеличения площади водной поверхности;

$W_{ф}$ – потери на фильтрацию из водохранилищ, каналов, других поверхностных водных объектов;

$W_{у}$ – изменение речного стока, обусловленное водозабором из подземных водных объектов, при наличии гидравлической связи с расчетным водным объектом;

$W_{пер}$ – переброска объема воды из расчетного водохозяйственного участка в смежные водосборы;

$W_{вдп}$ – суммарная потребность всех водопользователей в пределах расчетного водохозяйственного участка;

$W_{кп}$ – требуемая величина стока в замыкающем створе расчетного водохозяйственного участка (в первую очередь санитарно-экологические и хозяйственные попуски).

Как и при решении иных инженерно-технических задач, водохозяйственный баланс составляется для нескольких расчетных случаев, что обеспечивает многовариантность[3]. Ключевым элементом решения уравнений водохозяйственного баланса является определение величины попусков, необходимых для нормальной работы водозаборов, поддержания санитарно-экологического состояния реки, обеспечения судоходства, а в отдельных случаях – обводнения пойм и нерестилищ.

Под санитарно-экологическими попусками в настоящее время понимают экологический сток, который представляет собой минимальную величину речного стока, постоянного или переменного в течение года. В первую очередь размер экологического стока должен обеспечить условия существования и развития ихтиофлоры и ихтиофауны, что достигается поддержанием скорости течения воды в достаточно высоких пределах 0,25–0,6 м/с, а глубины русла –

не менее 0,1–3 м. При этом минимальная глубина из диапазона соответствует маловодным периодам (зима, лето). В свою очередь, при средней мощности ледообразования от 17 до 45 см может наблюдаться гибель ихтиофауны по причине недостаточного объема поступающего кислорода в поток (низкая турбулентность и отсутствие участков открытой воды).

При оценке экологического стока необходимо учитывать универсальные подходы:

– *объем, необходимый для нормального развития ихтиофлоры и ихтиофауны.* В этом случае требуется обеспечить скорости течения воды в пределах 0,25–0,6 м/с (0,25 м/с – нижний предел скоростного режима, при котором в значительной степени снижается турбулентность и наблюдается бурное развитие фитопланктона) при глубине потока не менее 0,1 м. Значимыми периодами, с точки зрения средообразующих функций геосистемы, являются маловодные периоды летней и зимней межени;

– *осуществление рекой функций по перемещению вещества и энергии.* Речная сеть транспортирует вещества и энергию, перераспределяя их во времени и в пространстве;

– *внутригодовое колебание стока реки.* Внутригодовая изменчивость стока поддерживает природную цикличность в развитии различных гидробионтов, а также биологических видов в пределах геосистемы реки;

– *многолетняя изменчивость стока реки.* Как и внутригодовая изменчивость, вариация объемов стока за многолетний период позволяет в период затопления обогащать пойменную часть водотока питательными веществами. Одновременно затопление снижает количество гидрофобных растений, заселивших пойму за маловодный период.

В период активного развития промышленного производства в прошлом веке начали широко использовать понятие минимального стока. Однако это в большей степени продиктовано учетом потребностей общества в водных ресурсах. Кроме того, нормирование минимального количества воды, поступающей в нижний бьеф, связано с необходимостью обеспечения водопотребителей в расположенных ниже расчетных створах реки. Конечно, с учетом современного мировоззрения, такие подходы к оценке минимального стока являются неприемлемыми и научно не обоснованными.

В настоящее время существуют различные методы и способы оценки размера экологического стока, которые можно условно разделить на четыре группы. Анализ этих методов выполнен в работах [15, 16], где оценка величины экологического стока проведена по методу повышения обеспеченности, который подразумевает фиксацию нижнего и верхнего предела изменения стока реки.

Наполнение водохранилища «Светлогорское» предусмотрено стоком рек Березины и Сведи. Река Березина – единственный из крупных водотоков (дли-

на 615 км), который от истока до устья протекает по территории Беларуси. Площадь водосбора – 24 650 км². Водосбор грушевидной формы, асимметричный, более развито правобережье.

Березина – третий по величине и водности приток Днепра, водосбор реки расположен в пределах Верхне-Березинской низины, Центрально-Березинской равнины и Минской возвышенности. Наиболее высокая точка водосбора – гора Маяк с абсолютной отметкой 335 м, а самая низкая – в устье р. Березины – 118 м. Средний уклон водосбора в этой части долины – 0,32 ‰. Среднегодовой расход воды в устье – 142 м³/с. Общий уклон – 69 м. В питании реки преобладают грунтовые воды – 60 % (годовой сток), доля снегового питания – 30 %, дождевого – около 10 %. На р. Березине расположены города Докшицы, Борисов, Березино, Бобруйск и Светлогорск.

Березина относится к категории рек с достаточной самоочищающей способностью. Ее водообильность в меженный период позволяет производить водоотбор на промышленные и коммунальные нужды в размере 6–8 м³/с. Лесами и болотами занято более половины территории водосбора, лесистость водосбора порядка 35 %, общая заболоченность – около 20 % (в т. ч. 16 % заболоченные леса), озерность водосбора – около 1 %. Наиболее крупные озера, через которые протекает р. Березина, Палик и Медзозол.

Гидрологический режим реки изучался на 16 постах. В настоящее время действуют четыре гидрологических поста в створах городов Борисов, Березино, Бобруйск, Светлогорск.

Река Сведь – правый приток Березины, полная длина водотока составляет 49 км. Площадь водосборного бассейна – 625 км², средний уклон реки 0,3 ‰, средний расход воды в устье 2,60 м³/с. Вдоль реки протянулась обширная сеть мелиоративных каналов. В среднем течении Сведь соединена каналом со Светлогорским водохранилищем.

В настоящей работе использованы следующие методы для определения основных гидрологических характеристик, подробно описанных в Техническом кодексе установившейся практики (ТКП)[4] [17]:

– оценка однородности исходных рядов гидрологических наблюдений осуществлялась на основе генетического и статистического анализов;

– расчет основных статистических характеристик для р. Березины проведен по данным наблюдений, для р. Сведи, в связи с отсутствием данных гидрометрических наблюдений, по региональным формулам с применением данных рек-аналогов;

– для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения применялось трехпараметрическое распределение Крицкого – Менкеля;

4 Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. 55 с.

– расчеты внутригодового распределения стока р. Березины в створе г. Светлогорска осуществлялись методом компоновки сезонов по водохозяйственным годам, начинающимся с первого месяца многоводного сезона марта. Для р. Сведи – по типовым региональным схемам в зависимости от водности года.

Климатические условия бассейнов рек Березины и Сведи

Применительно к бассейну р. Березины на основании выполненного анализа климатических данных было отобрано пять ближайших метеорологических станций (Бобруйск, Василевичи, Жлобин, Мозырь, Октябрь), обязательным условием являлось непрерывность рядов наблюдений с 1961 по 2015 г. Исходные климатические данные при этом получены из различных источников, включая открытые информационные ресурсы Всемирной метеорологической организации и других организаций, занимающихся изучением климата, а также из климатических справочников.

Анализ изменения климата за период 1961–2015 гг. позволил сделать следующие обобщенные выводы [18]. Произошло повышение температуры воздуха в среднем по бассейну р. Березины на 1,1 °С, причем наибольшее повышение температуры отмечено в зимний период – на 2,0 °С, наименьшее – в осенний период с максимальным повышением на 0,3 °С (рис. 1).

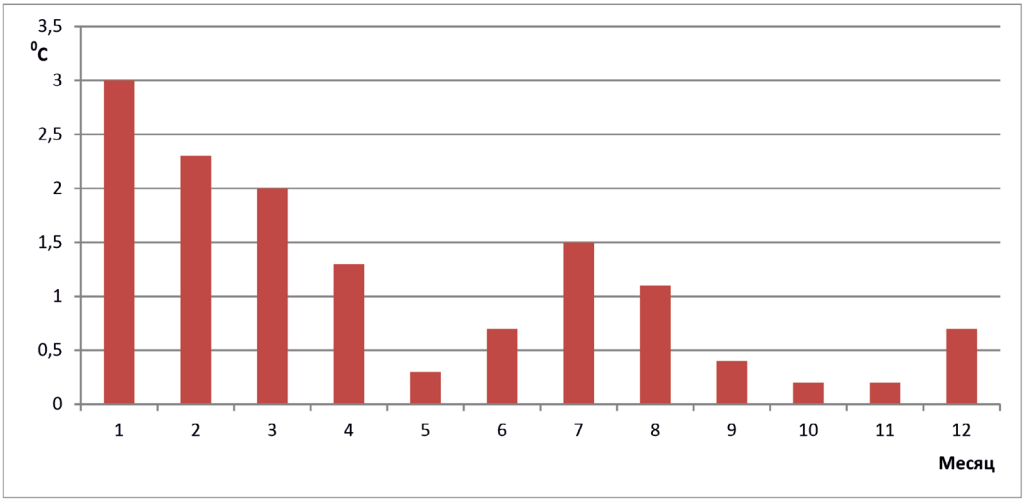


Рис. 1. Внутригодовое (с помесячной градацией) распределение изменения температуры воздуха (°С) за период с 1961 по 2020 г. в бассейне р. Березины
Fig. 1. Intra-annual (with monthly gradation) distribution of air temperature changes (°C) for the period from 1961 to 2020 in the Berezina River basin

Количество осадков в среднем по бассейну р. Березины увеличилось на 4,8 %, при этом наибольшее увеличение отмечено зимой – на 8,6 % (рис. 2).

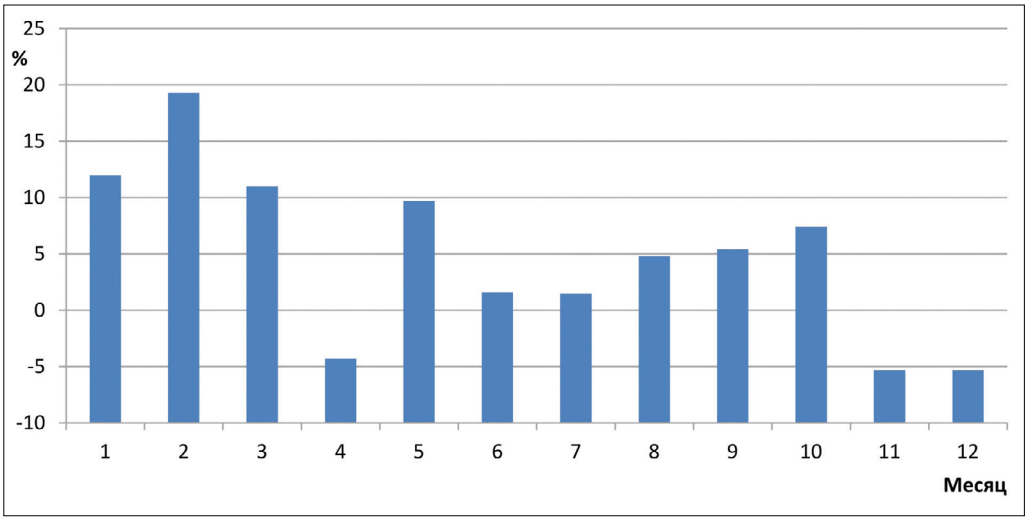


Рис. 2. Внутригодовое (с помесячной градацией) распределение изменения месячного количества осадков (%) за период с 1961 по 2020 г. в бассейне р. Березины
Fig. 2. Intra-annual (with monthly gradation) distribution of changes in monthly precipitation (%) for the period from 1961 to 2020 in the Berezina River basin

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные гидрологические характеристики р. Березины в створе г. Светлогорска определяли непосредственно по данным наблюдений. Пропущенные данные в рядах наблюдений за период 1978–2018 гг. восстановлены с помощью программного комплекса «Гидролог-2» [19]. Данные о количественных характеристиках стока р. Березины в створе Светлогорск и р. Сведь в створе водохранилища представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные гидрологические характеристики стока исследуемых рек
Table 1. Main hydrological characteristics of the flow of the studied rivers

Параметры	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина в створе Светлогорск													
Q, м^3/с	121	127	171	265	171	116	101	92,6	89,9	104	116	112	132
C_v	0,37	0,34	0,30	0,45	0,30	0,32	0,39	0,42	0,29	0,30	0,32	0,29	0,22
C_s	0,82	0,77	–0,15	1,06	0,80	1,12	1,22	2,66	1,36	3,13	1,87	1,32	–1,13
$r(1)$	0,11	0,13	0,14	–0,03	0,04	0,08	0,17	0,17	0,12	0,06	0,07	–0,08	0,23
р. Сведь в створе водохранилища													
Q, м^3/с	1,32	1,71	3,06	4,68	2,54	1,42	1,01	0,815	0,896	1,09	1,51	1,29	1,78

Примечание: Q – расход воды, м^3/с; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии; $r(1)$ – коэффициент автокорреляции.

Анализ внутригодового распределения стока р. Березины по месяцам показал, что на весенний период приходится 39 % от годового стока, зимнего стока – 22 %, на летне-осенний сезон – 39 % от годового стока.

При определении гидрологических характеристик р. Сведи использованы региональные методы расчета гидрологических характеристик, основанные на результатах обобщения данных гидрометеорологических наблюдений в соответствии с ТКП[4] [17]. Данные восстановлены по приведенному к многолетнему периоду ряду наблюдений за стоком по реке-аналогу Ведрич в створе Бабичи, а также в расчет приняты значения по картам изолиний, построенным для исследуемого района с учетом последних лет наблюдений и поправок на влияние местных азональных факторов (табл. 1).

На р. Сведи основной сток проходится на весенний период (48 %), зимний сток составляет 20 %, летне-осенний – 32 % от годового стока. Расчет экологического стока осуществлялся по методу повышения обеспеченности, который подразумевает выделение нижнего и верхнего пределов изменения стока на реке. Суть метода подробно описана в работах [15, 16].

В Беларуси в качестве экологического стока принимается значение, равное 75 % от минимального месячного стока 95 %-й обеспеченности, что закреплено нормативно. Но данный подход не в полной мере соответствует вышеперечисленным требованиям, а именно – не обеспечивает анализ внутригодовой изменчивости стока, не учитывает многолетние циклы водности и в большинстве случаев не позволяет учитывать условие соблюдения минимальной скорости течения воды.

По данным многолетних наблюдений за стоком р. Березины размер экологического стока в створе Светлогорск принят как 75 % от минимального месячного стока 95 %-й обеспеченности и составляет 34,7 м^3/с. Если при расчете использовать метод переноса обеспеченностей, экологический сток р. Березины 95 %-й вероятности превышения (обеспеченности), согласно проведенным гидрологическим расчетам, составляет 67,7 м^3/с. Для р. Сведи в качестве значения экологического стока принято значение, равное 75 % от минимального месячного стока 95 %-й обеспеченности, которое составляет 0,332 м^3/с. По методу переноса обеспеченностей экологический сток р. Сведи 95 %-й вероятности превышения (обеспеченности) равен 0,706 м^3/с.

Исследуемая территория находится в области днепровского оледенения, что обусловливает наличие здесь только двух моренных горизонтов – днепровского и березинского. Геолого-генетический комплекс моренных отложений днепровского оледенения в литологическом составе представлен в виде супесей, суглинков, песка пылеватого, мелкого, среднего и, редко, крупного и гравелистого с коэффициентами фильтрации 0,016–7,900 м/сут. Формирование режима подземных вод происходит в основном под влиянием климатических факторов и поверхностных водотоков.

Глубина залегания первого от поверхности горизонта незначительная и, благодаря созданию избыточного увлажнения почвогрунтов в пониженных частях рельефа, способствует заболачиванию. Избыточное увлажнение грунтов связано с незначительными уклонами поверхности земли, а также со слабой врезанностью гидрографической сети, неспособной обеспечить разгрузку накапливающихся подземных и поверхностных вод.

По химическому составу воды гидрокарбонатные, кальциевые и кальциево-магниевые. Дренируются воды реками Припять, Березина и их притоками.

Расчетная линейная схема водохозяйственного участка

Водохозяйственные балансы участков водосборов, для которых технически возможна подача воды из водохранилища «Светлогорское» выполнены с целью оценки имеющихся ресурсов поверхностного стока в год расчетной обеспеченности (P = 75 %) и представлены на рис. 3. Расчеты выполнены по составляющим водного баланса – приходная и расходная части. Гидрологические характеристики реки оценивались по гидрологическим постам наблюдений на р. Березина – г. Бобруйск, р. Березина – г. Светлогорск (табл. 2).

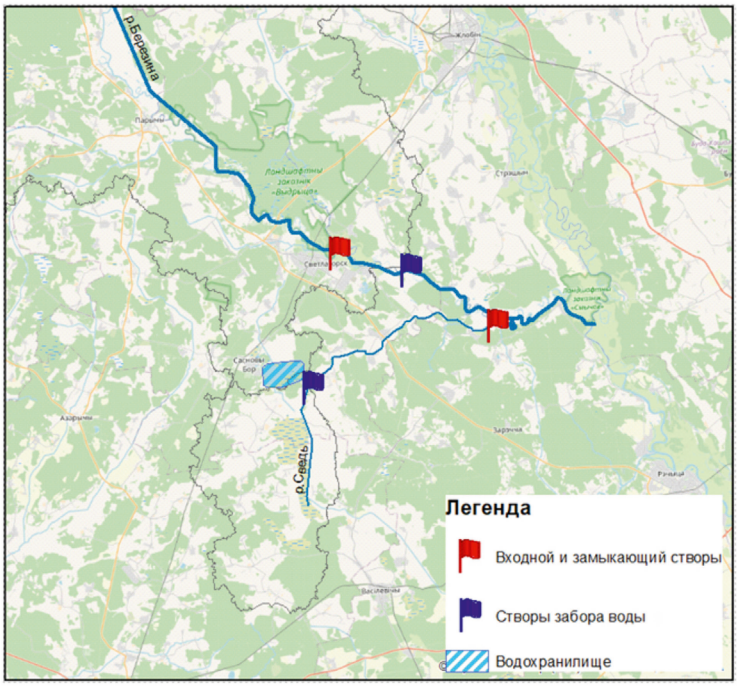


Рис. 3. Расчетная линейная схема водохозяйственного участка
Fig. 3. Calculated linear diagram of the water management area

Анализ структуры поверхностного стока позволил установить основные направления линий стока и возможных участков увлажнения непосредственно из р. Сведи.

Таблица 2. Характеристика водохозяйственного участка р. Березины
Table 2. Characteristics of the water management area of the Berezina River

Створ	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Расход воды, м^3/с				
			Норма стока	C_v	Расчетная обеспеченность, %		
					50	75	95
Борисов	383	5690	35,2	0,18	34,7	31,8	28,5
Бобруйск	167	20 300	114	0,21	115	99,2	75,3
Светлогорск	68	23 300	132	0,22	131	111	82,7

Характеристика водопотребления на водохозяйственном участке в привязке к уровням развития

На берегах р. Березины расположены крупнейшие потребители рекреационных ресурсов – города Борисов, Бобруйск и Светлогорск. У г. Борисова выделены четыре зоны рекреации, вмещающие одновременно до 25 тыс. отдыхающих.

Запасы имеющихся пресных поверхностных и подземных вод Светлогорского района достаточны для удовлетворения не только существующих, но и перспективных потребностей населения и отраслей экономики. Наибольшую нагрузку на р. Березину в створе г. Светлогорска как по объему отводимых очищенных стоков, так и по массе содержащихся в них загрязняющих веществ оказывает ОАО «СветлогорскХимволокно».

Объем подачи воды на увлажнение из водохранилища «Светлогорское» расчетной обеспеченностью 75 % (основной расчет) и 90 %-й обеспеченностью (поверочный расход) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Объем подачи воды на увлажнение из водохранилища «Светлогорское» (75 % обеспеченности, основной, числитель) (90 %-й обеспеченности, поверочный, знаменатель)
Table 3. Volume of water supplied for humidification from the Svetlogorsk reservoir (75 % provision, main, numerator) (90 % provision, verification, denominator)

№№ п.п.	Потребление воды	Потребление воды, тыс. м^3				Итого
		Май	Июнь	Июль	Август	
1	Потребление воды для регулирования почвенной влажности шлюзованием	1854,6 2707,1	8107,0 9840,6	3792,8 10 818,5	9119,0 2072,4	22 873,4 25 438,6
2	Заполнение водоподводящих каналов	372,6 372,6				372,6 372,6
	в т. ч. ВП-1	294,3 294,3				294,3 294,3
	ВП-1-1	57,2 57,2				57,2 57,2
	ВП-2	16,5 16,5				16,5 16,5
	ВП-3	4,6 4,6				4,6 4,6
3	Потери на испарение и фильтрацию по каналам	92,7 135,4	405,4 492,0	189,6 540,9	456,0 103,6	1143,7 1271, 9
Итого		**2319,9 3215,1**	**8512,4 10 332,6**	**3982,4 11 359,4**	**9575,0 2176,0**	**24 389,7 27 083,1**

По результатам водохозяйственных расчетов в пределах данного участка определен график подачи воды из двух основных источников – рек Березины и Сведи. В качестве оценки допустимых объемов изъятия принята разница стока расчетной обеспеченности (75 %) и величины стока данной обеспеченности, вычисленной методом переноса обеспеченностей. Это позволяет наиболее объективно оценить объем забора, оказывающий минимальное воздействие на естественный гидрологический режим реки. Общий объем забора из р. Березины составил 37 720,00 тыс. м^3, из р. Сведи – 3673,71 тыс. м^3. При этом доля снижения стока р. Березины составила около 1 %, что находится в пределах допустимых погрешностей. В свою очередь, в период с февраля по апрель доля снижения экологического стока р. Сведи составила 20 % при допустимых 75 % (табл. 4).

Таблица 4. Водохозяйственный баланс
75 %-й обеспеченности (основной расчетный случай)
Table 4. Water balance at 75 % availability (basic calculation case)

Характеристика	Объем воды, млн м^3												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина – Светлогорск													
75 %	268,76	280,73	377,31	586,05	377,67	257,59	223,06	204,89	198,88	229,80	256,46	247,62	3508,82
95 %	199,64	208,53	280,28	435,34	280,55	191,34	165,69	152,20	147,74	170,70	190,50	183,94	2606,45
75 % от мин 95 %	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	1094,30
р. Сведь – в створе водохранилища													
75 %	3,21	3,58	6,02	8,94	4,06	3,07	2,29	1,94	2,62	2,69	2,97	2,99	44,38
эк 75 % перенос	2,57	2,87	4,83	7,16	3,25	2,46	1,84	1,55	2,10	2,16	2,38	2,39	35,58
эк 95 % перенос	1,62	1,75	2,97	4,39	2,05	1,57	1,18	1,00	1,35	1,36	1,48	1,54	22,27
75 % от мин 95 %	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	10,47
Доступно для забора	0,64	0,71	1,19	1,77	0,80	0,61	0,45	0,38	0,52	0,53	0,59	0,59	8,80
Забор насосной № 1			10,00	10,00	9,00	8,72							37,72
Забор насосной № 2	0,00	0,00	9,50	9,50	8,55	8,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,83
Забор насосной № 4 (фильтрация)	0,00	0,00	0,18	0,27	0,35	0,37	0,31	0,23	0,17	0,17	0,16	0,00	2,20
Забор из р. Сведи	0,00	0,71	1,19	1,77									3,67
Итого	0,00	0,71	10,87	11,54	8,90	8,65	0,31	0,23	0,17	0,17	0,16	0,00	41,71
Подача воды на увлажнение	0,00	0,00	0,00	2,32	8,51	3,98	9,58	0,00	0,00	0,00	0,00	24,39	0,00
Наполнение (+),	0,71	10,87	11,54	6,58	0,14	0,00	0,00	0,17	0,17	0,16	0,00	30,34	0,71
Сработка (–) водохранилища	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–3,67	–9,35	0,00	0,00	0,00	0,00	–13,01	0,00

Продолжение таблицы 4

Характеристика	Объем воды, млн м³												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Сброс							0,00	0,00	0,00				0,00
Предварительный объем водохранилища, начало	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–
конец	22,18	22,89	33,76	45,30	51,88	52,02	48,35	39,01	39,18	39,34	39,50	22,18	–
Расчетный объем	22,89	33,76	45,30	51,88	52,02	48,35	39,01	39,18	39,34	39,50	39,50	22,89	–
Расчетная площадь	21,30	26,10	35,84	42,92	44,03	40,00	31,62	25,65	24,70	23,87	22,80	21,30	–
Распределение испарения	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10
Дополнительное испарение	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,28
Потери на испарение	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,04	0,00	3,62
Отметка воды в водохранилище, м	0,00	0,18	0,41	0,55	0,64	0,68	0,35	0,21	0,10	0,00	0,49	0,00	
Фильтрация	0,83	0,81	0,99	1,36	1,63	1,67	1,52	1,20	0,97	0,94	0,91	0,87	13,70
Объем воды на начало месяца	22,18	21,35	21,25	30,95	40,72	45,12	42,94	37,08	26,17	25,16	24,29	23,54	–
на конец месяца	21,35	21,25	30,95	40,72	45,12	42,94	37,08	26,17	25,16	24,29	23,54	22,18	–
Средняя глубина, м	1,76	1,73	2,08	2,73	3,16	3,22	2,98	2,45	2,04	1,98	1,92	1,84	–
Изменение стока в р. Березина, %	0,000	0,000	2,650	1,706	2,383	3,385	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,075
Изменение стока р. Сведи, %	0,000	19,819	19,819	19,819	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,278

Характерные параметры водохранилища

Объем НПУ	45 119,0 млн м³
Объем УМО	21 253,8 млн м³
Объем полезный	23 865,1 млн м³
Средняя глубина при НПУ	3,30 м
Средняя глубина при УМО	1,72 м
Отметка НПУ	134,77 м
Отметка УМО	132,94 м
Разность НПУ и УМО	1,83 м
Мощность полезного объема	1,75 м

Поверочный расчет для года 90 %-й обеспеченности показал достаточность полного объема водохранилища для удовлетворения сельского хозяйства в водных ресурсах, при этом доля забора в стоке р. Березины в расчетном

створе возросла до 1,5 %, что также незначительно влияет на экологическое состояние реки. Начало и график наполнения водохранилища в феврале – мае остается в данном случае без изменений, только в июне забор воды возрастает до 9000 тыс. м^3 и при необходимости наполнение осуществляется в июле в объеме 2200 тыс. м^3. Незначительно снижается максимальный объем наполнения и составляет 44 236,6 тыс. м^3 (табл. 5).

Таблица 5. Водохозяйственный баланс 90 %-й обеспеченности (поверочный расчетный случай)
Table 5. Water balance at 90 % availability (test calculation case)

Характеристики	Объем воды в млн м^3												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина – Светлогорск													
75 %	268,76	280,73	377,31	586,05	377,67	257,59	223,06	204,89	198,88	229,80	256,46	247,62	3 508,82
95 %	199,64	208,53	280,28	435,34	280,55	191,34	165,69	152,20	147,74	170,70	190,50	183,94	2 606,45
75 % от мин 95 %	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	1 094,30
р. Сведь – в створе водохранилища													
75 %	3,21	3,58	6,02	8,94	4,06	3,07	2,29	1,94	2,62	2,69	2,97	2,99	44,38
эк 75 % перенос	2,57	2,87	4,83	7,16	3,25	2,46	1,84	1,55	2,10	2,16	2,38	2,39	35,58
эк 95 % перенос	1,62	1,75	2,97	4,39	2,05	1,57	1,18	1,00	1,35	1,36	1,48	1,54	22,27
75 % от мин 95 %	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	10,47
Доступно для забора	0,64	0,71	1,19	1,77	0,80	0,61	0,45	0,38	0,52	0,53	0,59	0,59	8,80
Забор насосной № 1			10,00	10,00	9,00	9,00	2,20						40,20
Забор насосной № 2	0,00	0,00	9,50	9,50	8,55	8,55	2,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,19
Забор насосной № 4 (фильтрация)	0,00	0,00	0,18	0,27	0,35	0,36	0,27	0,19	0,17	0,16	0,16	0,00	2,11
Забор из р. Сведи	0,00	0,71	1,19	1,77									3,67
Итого	0,00	0,71	10,87	11,54	8,90	8,91	2,36	0,19	0,17	0,16	0,16	0,00	43,97
Подача воды на увлажнение	0,00	0,00	0,00	0,00	3,22	10,33	11,36	2,18	0,00	0,00	0,00	0,00	27,08
Наполнение (+),	0,00	0,71	10,87	11,54	5,68	0,00	0,00	0,00	0,17	0,16	0,16	0,00	29,30
Сработка (–) водохранилища	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–1,43	–9,00	–1,98	0,00	0,00	0,00	0,00	–12,41
Сброс							0,00	0,00	0,00				0,00
Предварительный объем водохранилища, начало	22,18	22,18	22,89	33,76	45,30	50,98	49,55	40,55	38,57	38,74	38,91	39,07	–
конец	22,18	22,89	33,76	45,30	50,98	49,55	40,55	38,57	38,74	38,91	39,07	39,07	–

Окончание таблицы 5

Характеристики	Объем воды в млн м³												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Расчетный объем	21,77	21,30	26,10	35,84	42,48	42,40	35,06	27,86	25,65	24,70	23,87	22,80	–
Расчетная площадь	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	–
Распределение испарения	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,10
Дополнительное испарение	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,04	0,28
Потери на испарение	0,00	0,00	0,18	0,41	0,55	0,64	0,66	0,35	0,21	0,10	0,00	0,49	3,60
Отметка воды в водохранилище, м	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	–
Фильтрация	0,83	0,81	0,99	1,36	1,61	1,61	1,33	1,06	0,97	0,94	0,91	0,87	13,29
Объем воды в водохранилище на начало месяца	22,18	21,35	21,25	30,95	40,72	44,24	40,56	29,57	26,18	25,16	24,29	23,54	–
на конец месяца	21,35	21,25	30,95	40,72	44,24	40,56	29,57	26,18	25,16	24,29	23,54	22,18	–
Средняя глубина, м	1,76	1,73	2,08	2,73	3,13	3,13	2,68	2,20	2,04	1,98	1,92	1,84	–
Изменение стока в р. Березина, %[5]	0,000	0,000	3,568	2,297	3,208	4,704	1,328	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,542
Изменение стока в р. Сведи, %	0,000	40,505	40,149	40,310	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	16,496

Характерные параметры водохранилища

Объем НПУ	44 236,6 млн м³
Объем УМО	21 253,8 млн м³
Объем полезный	22 982,8 млн м³
Средняя глубина при НПУ	3,26 м
Средняя глубина при УМО	1,72 м
Отметка НПУ	134,70 м
Отметка УМО	132,94 м
Разность НПУ и УМО	1,76 м
Мощность полезного объема	1,69 м

Оценка экологических рисков

Современные климатические колебания и антропогенные воздействия, несомненно, оказывают заметное влияние на речной сток, которое с течением времени будет усиливаться. Поэтому необходимы экспертные оценки изменения стока в будущем, основанные на тенденциях прошлых лет.

5 Изменение стока реки рассматривалось относительно стока 95 %-й обеспеченности как наиболее невыгодного.

Оценка изменения стока (расходов воды в р. Березине) выполнена для двух гидрологических постов в среднемесячном и в среднегодовом разрезах для периода с 1986 по 2015 г. по отношению к периоду с 1961 по 1985 г. Итоговые обобщенные результаты по оценке изменения стока с 1961 по 2015 г. в бассейне р. Березины по рассматриваемым гидрологическим постам представлены в табл. 6 и табл. 7 [18].

Таблица 6. Изменения стока в бассейне р. Березины за период с 1961 по 2015 г.
Table 6. Changes in runoff in the Berezina River basin for the period from 1961 to 2015.

Гидрологический пост	Площадь водосбора, км²	Характеристика	Значения расходов воды за периоды (1986 – 2015 гг.), (1961 – 1985 гг.), м³/с, разница, %											
			январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Борисов	5690	$Q_{ср}$	28,3	27,6	40,8	84,2	51,0	31,4	24,8	23,0	22,5	26,1	31,0	30,0
		$Q_{1961-1985}$	24,9	21,6	34,5	93,8	51,7	31,2	24,0	23,4	23,0	25,8	30,2	28,5
		$Q_{1986-2015}$	31,1	32,7	46,1	76,3	50,5	31,6	25,5	22,6	22,1	26,4	31,5	31,0
		D	24,7	51,6	33,7	-18,7	-2,3	1,3	6,1	-3,3	-3,8	2,5	4,3	8,9
Бобруйск	20 300	$Q_{ср}$	97,6	99,0	144	265	159	106	90,5	84,2	82,0	90,0	101	97,9
		$Q_{1961-1985}$	89,7	80,8	134	306	167	103	90,0	83,7	82,4	86,4	101	98,4
		$Q_{1986-2015}$	104	114	152	230	153	108	90,9	84,6	81,6	92,8	102	97,4
		D	16,3	41,3	13,6	–24,9	–8,2	4,9	1,0	1,0	–1,1	7,5	0,2	–1,1

Таблица 7. Абсолютные значения характерных расходов воды р. Березины за период с 1961 по 2015 г. (числитель, м³/с), изменение стока (знаменатель, %)
Table 7. Absolute values of characteristic water discharges (m3/s) of the Berezina River for the period from 1961 to 2015 (numerator), change in runoff, (%) (denominator)

Гидрологический пост	Площадь водосбора, км²	Средний	Максимальный весеннего половодья	Минимальный летне-осенней межени	Минимальный зимней межени
Борисов	5690	35,1/3,6	112 / –29,7	16,9 / –3,8	19,7 / 20,9
Бобруйск	20 300	118/ –0,9	407 / –40,4	59,3 / 2,6	57,6 / 11,2

По результатам оценок изменения стока за период 1961–2015 гг. можно сделать следующие обобщенные выводы [18]:

– среднегодовой сток р. Березины изменился незначительно с его увеличением на севере на 3,6 % и уменьшением на юге до 1 %;

– произошло значительное снижение стока весеннего половодья от 30 до 40 % с более ранним наступлением его пика;

– отмечено увеличение стока в зимний период: на 21 % по северу и на 11 % по югу бассейна р. Березины;

– сток в летний период изменился незначительно за период 1961–2015 гг., однако в последние годы произошло значительное снижение стока, который был даже меньше минимального за весь указанный период.

Происходящие климатические изменения и антропогенные воздействия не могли не сказаться на режиме испарения с водной поверхности водоемов Беларуси. Анализ месячных величин испарения с водной поверхности по метеостанциям Беларуси свидетельствует о наличии в многолетнем ходе этих значений статистически значимых на 95 %-ном уровне линейных трендов. Количественная оценка изменения временных рядов испарения с водной поверхности осуществлялась с помощью градиентов линейных трендов, значения которых приведены в месячном разрезе. За период май – октябрь наблюдаются статистически значимые уменьшения величин испарения с водной поверхности в бассейне р. Березины. Наибольшие градиенты приходятся на летние месяцы (июнь, июль). Меньшие градиенты отмечены в осенние месяцы, при этом почти все они отрицательные. Полученные результаты свидетельствует о снижении скорости изменения климатических составляющих и о большем вкладе в изменение величин испарения с водной поверхности природной составляющей, чем антропогенной (табл. 8).

Таблица 8. Градиенты (α, мм/10 лет) изменения испарения с водной поверхности и коэффициенты корреляции линейных трендов (r) по метеостанциям Беларуси
Table 8. Gradients (α, mm/10 years) of changes in evaporation from the water surface and correlation coefficients of linear trends (r) for meteorological stations in Belarus

Интервал осреднения	Параметр	
	Градиент (а	Коэффициент корреляции линейных трендов (*r*)
Май	**–3,35 / –3,12***	**–0,31 / –0,31**
Июнь	**–6,56 / –5,08**	**–0,40 / –0,34**
Июль	**–6,74** / –4,21	**–0,38** / –0,26
Август	–1,91 / –1,365	–0,13 / –0,10
Сентябрь	**–2,52** / –1,79	**–0,29** / –0,22
Октябрь	–0,37 / –0,08	–0,10 / –0,02

Примечание: * – в числителе данные работы [20]; выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Основные факторы, формирующие интенсивность испарения с водной поверхности, – температура воздуха и скорость ветра. Рост температуры воздуха увеличивает скорость испарения с водной поверхности, но скорость ветра уменьшается, и этот вектор в настоящее время оказывает большее влияние на процесс испарения. Кроме того, на испарение с водной поверхности влияют локальные факторы, которые необходимо учитывать при составлении водохозяйственного баланса.

Сценарии изменения климата для бассейна р. Березины на период до 2035 г. получены с использованием материалов, представленных в Атласе глобальных и региональных климатических прогнозов Пятого доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[6] [18]. Для бассейна р. Березины более подробный прогноз климата с учетом его региональной изменчивости, выявленной по метеорологическим станциям за период с 1961 по 2015 г., разработан по наиболее неблагоприятным (консервативным) сценариям наибольшего повышения температуры и снижения осадков, а также с учетом линейной интерполяции.

По прогнозам наиболее консервативных сценариев изменения климата, повышение температуры в бассейне р. Березины в среднем за год может составить до 1,9 °С при максимальном повышении зимой на 2,3 °С, летом – на 1,9 °С, весной и осенью – примерно на 1,7 °С. При этом годовое количество осадков изменится незначительно (суммарно за год уменьшится на 2 %) с увеличением их зимой (в среднем на 7 %), максимальным уменьшением летом (в среднем на 10 %), в меньшей степени уменьшением весной (на 4 %) и незначительном уменьшении осенью (в среднем на 1,6 %).

По методу гидролого-климатических расчетов [21] получены прогнозные оценки изменения речного стока в бассейне р. Березины на период до 2035 г. При этом использованы результаты оценки фактического изменения климата и речного стока за период 1961–2015 гг. и уточненный прогноз изменения климата на период до 2035 г. в исследуемом бассейне с учетом мультимодального ансамбля из четырех сценариев, рекомендованных МГЭИК, а также региональной изменчивости климата [18, 22]. Обобщение результатов расчетов прогнозного изменения стока в бассейне Березины на период до 2035 г. приведено в табл. 9 [18].

Таблица 9. Прогноз изменения поверхностного стока до 2035 г. для бассейна р. Березины, в % от современного состояния
Table 9. Forecast of changes in surface runoff up to 2035 for the rivers of the Berezina basin, in % of the current state

Гидрологический пост	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднегодовой
Борисов	13,7	–0,8	–3,5	–1,1	2,1
Бобруйск	4,3	–18,4	–2,1	–10,8	–6,7

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы о прогнозном изменении стока в бассейне р. Березины до 2035 г. [18]:

– предполагается снижение среднегодового стока на юге бассейна;

– незначительное изменение стока в зимний период по бассейну на юге и увеличение на севере;

6 Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Женева: МГЭИК, 2013. 1552 с. // Материалы МГЭИК. [Электр. ресурс]. Режим доступа: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf (дата обращения: 04.06.2025).

– в весенний период, за редким исключением, вероятно снижение стока;

– в летний период прогнозируется некоторое уменьшение стока;

– в осенний период (особенно в начале осени и до середины октября) также прогнозируется снижение стока.

Исследование и водохозяйственный мониторинг водохранилища «Светлогорское»

Для эффективной эксплуатации водохранилища «Светлогорское» необходимо совершенствовать мониторинг поверхностных вод, для чего следует перейти от эпизодического наблюдения к автоматизированной системе сбора данных.

Предлагается:

– установить гидрометеорологические станции, а также датчики уровня и температуры воды;
– вести учет в реальном времени по фильтрационным потерям и испарению;
– использовать данные спутникового мониторинга для отслеживания площади зеркала водохранилища.
– организовать лабораторные исследования по динамике заиления и коэффициентам фильтрации;
– создать цифровую геоинформационную модель водохранилища (в среде QGIS, ArcGIS и т. п.);
– разработать сценарный анализ эксплуатации водохранилища при экстремальных осадках и длительных засухах, модель изменения сезонной водоотдачи рек Березины и Сведи;
– выполнить анализ потребности водопотребителей по месяцам для сглаживания водозаборов;
– исследовать возможность накапливающей фильтрации для поддержания уровней;
– разработать адаптивные графики управления водоподачей и сбросами;
– провести анализ биоразнообразия в зоне влияния водохранилища, в т. ч. болотных и пойменных экосистем;
– исследовать влияние изменения водного режима на агропромышленный комплекс региона.

Для повышения эффективности мониторинга уровня водопотребления и водопользования предлагается установка измерительного устройства в реперных точках расчетных створов исследуемых рек и водохранилища «Светлогорское»[7].

7 Устройство для измерения уровня воды: пат. 13217. Беларусь, МПК U G 01F 23/00 / А. А. Волчек, М. А. Таратенкова, Д. А. Шпока, Е. И. Дмухайло; заявитель Брест. гос. техн. ун-т. № u 20220312; заявл. 30.12.22; опубл. 30.06.23 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2023. № 3. С. 97–98.

ВЫВОДЫ

Исследование многолетних колебаний стока р. Березины выявило, что весенний период составляет 39 % от общего годового стока, на зимний сток приходится 22 %, на летне-осенний сезон – 39 %. В свою очередь, на р. Сведи весенний сток доминирует, составляя 48 % от годового объема, зимний сток – 20 %, сток летне-осеннего периода – 32 % от общего годового стока.

Анализ изменений стока р. Березины за период с 1986 по 2015 г. по сравнению с периодом 1961–1986 гг. показал, что среднегодовые расходы воды остались практически неизменными. Однако отмечено значительное снижение стока весеннего половодья, составившее от 30 до 40 %, с более ранним достижением пика. В то же время, зимний сток увеличился с 11 до 21 %, тогда как летний сток претерпел незначительные изменения.

На основании многолетних наблюдений за стоком р. Березины экологический сток в створе Светлогорск установлен на уровне 75 % от минимального месячного стока с 95 %-й обеспеченностью и равен 34,7 м^3/с. При применении метода переноса обеспеченностей экологический сток р. Березины с 95 %-й вероятностью превышения, согласно проведенным гидрологическим расчетам, составляет 67,7 м^3/с. Для р. Сведи соответствующие значения экологического стока составили 0,332 м^3/с и 0,706 м^3/с.

По результатам водохозяйственных расчетов в пределах исследуемого участка определен график подачи воды из двух основных источников – рек Березины и Сведи. В качестве оценки допустимых объемов изъятия принята разница стока расчетной обеспеченности (75 %) и величины стока данной обеспеченности, вычисленной методом переноса. Это позволяет наиболее объективно оценить объем забора, оказывающий минимальное воздействие на естественный гидрологический режим реки. Общий объем забора из р. Березины составил 37 720,00 тыс. м^3, из р. Сведи – 3673,71 тыс. м^3. При этом доля снижения стока Березины – около 1 % – находится в пределах допустимых погрешностей. В свою очередь, в период февраль – апрель доля снижения экологического стока р. Сведи составила 20 % при допустимых 75 %.

Таким образом, полный объем водохранилища «Светлогорское» оценивается в 45 119,00 тыс. м^3, мертвый объем – в 21 253,8 тыс. м^3. Средняя глубина при минимальных уровнях составляет 1,72 м, что обеспечивает защиту от зарастания ложа водохранилища, при этом минимальные средние глубины приходятся на зимний и осенний периоды, когда водная растительность имеет минимальную активность. Общие потери воды составили 17 320,27 тыс. м^3, из которых 2204,46 тыс. м^3 – расходы на фильтрацию в оградительный канал.

Поверочный расчет для года 90 %-й обеспеченности показал достаточность полного объема водохранилища для удовлетворения потребностей сельского хозяйства в водных ресурсах, при этом доля забора в стоке р. Березины в расчетном створе возросла до 1,5 %, что также незначительно влияет на эко-

логическое состояние реки. Начало и график наполнения водохранилища в феврале – мае остается в данном случае без изменений, только в июне забор воды возрастает до 9000 тыс. м^3 и при необходимости наполнение осуществляется в июле в объеме 2200 тыс. м^3. Незначительно снижается максимальный объем наполнения – до 44 236,6 тыс. м^3.

Подходы для проведения водохозяйственных расчетов в границах изучаемого участка рек Березины и Сведи и водохранилища «Светлогорское», представленные в этой статье, доказали свою эффективность и могут применяться при решении аналогичных задач в схожих природно-климатических и гидрологических условиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилович И. С., Гледко Ю. А., Тарасевич И. В. Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 61–71. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-61-71
2. Измайлова А. В. Долгосрочные изменения компонентов водного баланса крупных водохранилищ Азии России // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 3. С. 47–58.
3. Данилович И. С. Водный баланс и уровенный режим водоемов Беларуси // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2: Химия. Биология. География. 2005. № 3. С. 110–114.
4. Обухов Е. В. Исследование влияния водности года на внешний водообмен Днепродзержинского водохранилища в условиях изменения климата // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. № 60 (4). С. 380–388.
5. Слейман А., Козлов Д. В. Использование искусственных нейронных сетей для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса бассейна реки Верхний Оронтес // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 21–37. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-21-37
6. Коледа К. В. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур: рекомендации / К. В. Коледа и др., под общ. ред. К. В. Коледы, А. А. Дудука. Гродно: ГГАУ, 2010. 340 с.
7. Arthington A. H., Bunn S. E., Poff N. L. & Naiman R. J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems // Ecological Applications. No. 16 (4). P. 1311–1318.
8. Dyson M., Berkamp G. and Scanlon J. Editors. 2003. Flow: the essentials of environmental flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
9. Tharme R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers // River Research and Applications. 2003. Vol. 19. P. 397–442.
10. Smakhtin V., Revenga C. and Döll. P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity // Water International. 2004. Vol. 29. P. 307–317.

11. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёры, вадасховішчы, турысцкі патынцыял водных аб'ектаў / маст.: Ю. А. Тарэеў, У.І. Цярэнцьеў. Мінск: БелЭн, 2007. 480 с.
12. Шведовский П. В., Валуев В. Е., Волчек А. А., Федоров В. Г. Эколого-социальные аспекты освоения водно-земельных ресурсов и технологий управления режимами гидромелиораций. Минск: Ураджай, 1998. 363 с.
13. Логинов В. Ф., Волчек А. А. Водный баланс речных водосборов Беларуси. Минск: Тонпик, 2006. 160 с.
14. Бурлибаев М. Ж., Волчек А. А., Шведовский П. В. Проблемы оптимизации природопользования и природообустройства в математических моделях и методах. Алматы: Изд-во «Каганат», 2003. 532 с.
15. Ясельда И. В. и др. Реки Полесья / под общ. ред. А. А. Волчека, И. И. Кирвеля, Н. В. Михальчука. Национальная академия наук Беларуси, Полесский аграрно-экологический институт. Минск: Беларуская навука, 2017. 416 с.
16. Волчек А. А., Дашкевич Д. Н., Кухаревич М. Ф., Парфомук С. И., Сидак С. В., Шешко Н. Н., Шпендик Н. Н. Оценка допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами Белорусского Полесья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 76 – 99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99
17. Волчек А. А. Гидрологические расчеты: уч. пособие. М.: КНОРУС, 2021. 418 с.
18. Волчек А. А., Корнеев В. Н., Парфомук С. И., Булак И. А. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / под общ. ред. А. А. Волчек, В. Н. Корнеева. Брест: Альтернатива, 2017. 228 с.
19. Волчек А. А., Парфомук С. И. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / Веснік Палескага джзяржаўнага універсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. 2009. № 1. С. 22 – 30.
20. Логинов В. Ф., Волчек А. А. Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии // География и природные ресурсы, № 2, 2005. С. 137 – 144.
21. Мезенцев В. С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 3. С. 299 – 301.
22. Волчек А. А., Парфомук С. И. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2007. № 1. С. 50–62.

REFERENCES

1. Danilovich I. S., Gledko Yu. A., Tarasevich I. V. Repeatability of dry periods on the territory of Belarus in connection with atmospheric circulation in Atlantic-European sector. *Meteorology and hydrology*. 2023. № 9. P. 61–71. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-61-71
2. Izmajlova A. V. Long-time changes of the water balance components of the major reservoirs of the Asian part of Russia. *Water resources*. 2023. Vol. 50. № 3. P. 47–58.
3. Danilovich I. S. Water balance and level regime of water bodies of Belarus. *Newsletter of the Belarus State University*. Series 2: Chemistry. Biology. Geography. 2005. № 3. P. 110–114.
4. Obuhov E. V. Studies of annual water content on external water exchange of the Dneprodzerzhinsk Reservoir in the conditions of the climate change. *Power Industry. Proceedings of the CIS higher education institutions and power industry associations*. 2017. No. 60 (4). P. 380–388.
5. Slejman A., Kozlov D. V. Application of artificial neuronets for assessment of the surface flow in calculations of water/economic balance for the Verkhny Oronets River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 21–37. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-21-37

6. Koleda K. V. Modern technologies of agricultural crop cultivation: recommendations / K. V. Koleda et al.; edited by K. V. Koleda, A. A. Duduk. Grodno: GGAU, 2010. 340 p.
7. Arthington A. H., Bunn, S. E., Poff N. L. & Naiman R. J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications*. No. 16 (4). P. 1311–1318.
8. Dyson M., Berkamp G. and Scanlon J. Editors. 2003. Flow: the essentials of environmental flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
9. Tharme R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*. 2003. Vol. 19. P. 397–442.
10. Smakhtin V., Revenga C. and Döll P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water International*. 2004. Vol. 29. P. 307–317
11. Blakitny skarb Belarusi: Reki, azery, vadaskhovishchy, turystski patyntsyyal vodnykh ab'ektaў / mast.: Yu. A. Tareeў, U. I. Tsyarents'eў. Minsk: BelEn, 2007. 480 p.
12. Shvedovskii P. V., Valuev V. E., Volchek A. A., Fedorov V G. Ecological/social aspects of the water/ground resources development and water conservation regimes management technologies. Minsk: Uradzhai, 1998. 363 p.
13. Loginov V. F., Volchek A. A. The Belarus river catchments water balance. Minsk: Tonpik, 2006–160 p.
14. Burlibaev M. Zh., Volchek A. A., Shvedovskiy P. V. Problems of nature use and nature arrangement optimization in mathematical models and methods. Almaty: «Kaganat» Publishing House, 2003. 532 p.
15. Yasel'da I. V. [et al.] Rivers of Poles'ye / Edited by A. A. Volchek, I. I. Kirvelya, N. V. Mikhal'chuk; National Academy of Sciences of Belarus, Polessk agrarian/ecological institute. Minsk: Belarusian Science, 2017. 416 p.
16. Volchek A. A., Dashkevich D. N., Kukharevich M. F., Parfomuk S. I., Sidak S. V., Sheshko N. N., Shpendik N. N. Assessment of permissible withdrawal of river waters by floodplain fisheries of Belarusian Poles'ye. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. № 1. P. 76 – 99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99
17. Volchek A. A. Hydrological calculations: Training manual / A. A. Volchek. Moskva: KNORUS, 2021. 418 p.
18. Volchek A. A., Korneev V. N., Parfomuk S. I., Bulak I. A. Water resources of Belarus and the forecast with taking into account the climate changes / Edited by A. A. Volchek, V. N. Korneeva. Brest: Al'ternativa, 2017. 228 p.
19. Volchek A. A., Parfomuk S. I. Application programs package for determination of calculated characteristics of the river flow. *Newsletters of the Polessk University*. Series: Sciences of nature. 2009. № 1. P. 22–30.
20. Loginov V. F., Volchek A. A. Changing of evaporation from water surface on the territory of Belarus. *Geography and water resources*. 2005. № 2. P. 137–144.
21. Mezentsev V. S. The hydrological/climatic hypothesis and examples of its use. *Water resources*. 1995. Vol. 22. № 3. P. 299–301.
22. Volchek A. A., Parfomuk S. I. Assessment of Belarusian Polessye small rivers water regime under the impact of natural anthropogenic factors (the Yaseldsa as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2007. No. 1. P. 50–62.

Сведения об авторах:

Волчек Александр Александрович, д-р геогр. наук, профессор, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0002-8838-797X; e-mail: volchak@tut.by

Парфомук Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой математики и информатики, факультет электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0002-2134-6241; e-mail: parfom@mail.ru

Сидак Светлана Васильевна, канд. геогр. наук, доцент кафедры математики и информатики, факультет электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0001-7433-2524; e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Шешко Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0001-6373-8166; e-mail: optimum@tut.by

Шпендик Наталья Николаевна, канд. геогр. наук, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; e-mail: shpendik@tut.by

About the authors:

Aleksandr A. Volchek, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0002-8838-797X; e-mail: volchak@tut.by

Sergey I. Parfomuk, Ph. D, Associate Professor, Head, Chair of Mathematics and Information Science, Department of Electronic Information Systems, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0002-2134-6241; e-mail: parfom@mail.ru

Svetlana V. Sidak, Ph. D, Associate Professor, Chair of Mathematics and Information Science, Department of Electronic Information Systems, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0001-7433-2524; e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Nikolay N. Sheshko, Ph. D, Associate Professor, Associate Professor, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0001-6373-8166; e-mail: optimum@tut.by

Natalia N. Shpendik, Ph. D, Associate Professor, Associate Professor, Chair of Heat/gas Supply and Ventilation, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, Brest, Belarus; e-mail: shpendik@tut.by

Поступила в редакцию / Received 29.09.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 19.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 12.01.2026.