

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЫБХОЗА «СЕЛЕЦ» НА СТОК РЕКИ ЯСЕЛЬДА

**А. А. Волчек¹, С. И. Парфомук², Н. Н. Шешко³,
Н. Н. Шпендик⁴, Д. Н. Дашкевич⁵, С. В. Сидак⁶, М. Ф. Кухаревич⁷**

¹ Д. геогр. н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры природообустройства

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: optimum@tut.by

⁴ К. геогр. н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: shpendik@tut.by

⁵ Ст. преподаватель кафедры природообустройства

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: dionis1303@mail.ru

⁶ Магистр физ.-мат. н., ассистент кафедры информатики и прикладной математики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

⁷ Магистр тех. н., аспирант кафедры природообустройства

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

Реферат

В результате исследования выполнена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Селец», расположенного в бассейне реки Ясельды в районе г. Березы, на гидрологический режим реки. Определены величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки, используемых для нужд рыбхозов, с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ и прудов, при обеспечении условия сохранения в реках экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыбоводческих прудов. Полученные прогнозные оценки изменения стока реки Ясельды на период до 2035 года характеризуются незначительным изменением стока в среднем за год, но высока вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы (особенно в летние).

Ключевые слова: рыбоводное хозяйство, эвтрофирование, рекогносцировочное обследование, экологический сток, расход воды, математическая модель, водность года, поперечный профиль, верхний створ, нижний створ.

ASSESSMENT OF THE SELETS FISH FARM IMPACT ON THE YASELDA RIVER RUNOFF

A. A. Volchak, S. I. Parfomuk, N. N. Sheshko, N. N. Shpendik, D. N. Dashkevich, S. V. Sidak, M. F. Kukharevich

Abstract

A comprehensive assessment of the impact of the Selets fish farm located in the Yaselda River basin in the area of the Bereza city on the hydrological regime of the river was carried out. The values of permissible withdrawal of surface water from the river used for the needs of fish farms are determined taking into account evaporation losses from the water mirror and filtration from reservoirs and ponds, while ensuring the conditions for preserving ecological runoff in rivers. It will allow determining the most effective filling regime for fish ponds. The obtained forecast estimates of the Yaselda River runoff change for the period up to 2035 are characterized by a slight change in average year runoff, but there is a high probability of its unevenness and multidirection in seasons and months (especially in summer).

Keywords: fish farming, eutrophication, reconnaissance survey, ecological runoff, water consumption, mathematical model, water content of the year, transverse profile, upper section line, lower section line.

Введение

Рыбное хозяйство является уникальным видом производства и играет важную роль в продовольственном комплексе Республики Беларусь, которое обеспечивает население качественными продуктами питания. Для устойчивого обеспечения потребности населения Беларуси необходимо не менее 180 тыс. т рыбы и рыбной продукции в год. В настоящее время основная часть этого объема импортируется в виде продуктов глубокой заморозки. Доля собственной, наиболее ценной свежей и живой рыбы, около 8%. В то же время водный фонд Беларуси насчитывает более 10 тыс. озер общей площадью около 200 тыс. га, 150 водохранилищ общей площадью 80 тыс. га, 20,8 тыс. различных рек общей протяженностью 90,6 тыс. км [18]. Кроме того, насчитывается 21,86 тыс. га прудов рыбоводных хозяйств, 4,6 тыс. га прудов, а также 17,0 тыс. км каналов различного назначения. Большая часть производимой в республике рыбы (около 78%) выращивается в прудах, но площадь их не превышает 10% от всех имеющихся водоемов. Это свидетельствует об огромных резервах по выращиванию рыбы в озерах, водохранилищах, реках, мелиоративных каналах, потенциальные возможности которых используются недостаточно. Это позволит снабжать населения страны продуктами питания на основе рыбы и морепродуктов в необходимом количестве, высокого качества и по доступным ценам [19].

Рыбное хозяйство непосредственно связано с использованием водных ресурсов и предъявляет очень высокие требования к их режиму, количественному и качественному состоянию. Для успешного воспроизводства и нормального развития рыбы необходимы чистая вода с достаточным количеством растворенного кислорода и отсутствием вредных примесей, соответствующая температура и обеспеченность кормами. Нормативы качества воды для рыбоводческих объектов более строгие, чем для источников питьевого водоснабжения.

Вода содержит различные растворенные и взвешенные вещества, количество и состав которых определяют большое разнообразие ее химического состава. Этот состав зависит как от физических условий окружающей среды, так и от биологических и микробиологических процессов, протекающих в водоемах. Взаимообусловленное воздействие абиотических и биотических факторов, а также деятельность человека вызывают существенные различия в гидрохимическом режиме водоемов.

Большим своеобразием отличается гидрохимический режим рыбоводных прудов и мелких водоемов, периодически осушаемых в различные сезоны года, на почву и воду которых сильно влияет хозяйственная деятельность человека. Посадка в пруды большого количества рыбы на единицу площади, удобрение прудов и кормление рыбы также отрицательно влияют на качество воды. В результате поступления в воду легкоразлагающегося органического материала увеличивается

окисляемость, повышается водородный показатель воды (рН), отмечается увеличение суточных колебаний содержания кислорода, изменяются физические свойства воды, увеличивается ее цветность, снижается прозрачность. Поэтому при интенсификации рыбоводства необходимо своевременно принимать меры по оптимизации режима, обеспечению условий для нормальной жизнедеятельности водных организмов. Пригодность поверхностных вод для использования в рыбохозяйственных целях определяется их соответствием требованиям и нормативам государственного стандарта.

Вода водоисточника должна соответствовать нормам, обеспечивающим сохранность вида, плодовитость и качество потомства рыбы, биологические потребности выращиваемых видов рыб, необходимый уровень развития естественной кормовой базы. Она не должна быть источником заболеваний разводимых рыб. Перед использованием воды для разведения рыб следует провести гидрохимические, токсикологические и ихтиопатологические исследования, а также определить способы подготовки воды (аэрация, очистка и др.) до нормы.

Для рыбы наиболее важными условиями являются температура, прозрачность, газовый режим, содержание биогенных элементов. Связь гидробионтов с элементами внешней среды взаимообусловлена, и изменение одной системы связей неминуемо вызывает изменение другой. Поэтому, рассматривая влияние отдельных компонентов гидрохимического режима на жизнедеятельность гидробионтов, необходимо иметь в виду условность такого вычленения, ибо в природе все отношения организма и среды взаимосвязаны.

В жизни рыб температура воды имеет огромное значение, прежде всего в том, что она является непременным условием жизни. В отличие от многих других абиотических факторов температура действует не только в случае экстремальных значений, определяющих границы существования вида, но и в пределах оптимальной зоны в целом, определяя скорость и характер всех жизненных процессов. Влияние ее не ограничивается непосредственным воздействием на живые организмы, а сказывается и косвенно, через другие абиотические факторы. Поэтому температура является одним из универсальных экологических факторов, которое проявляется через воздействие на распределение гидробионтов в водоемах и скорость протекания различных жизненных процессов, количественно связанных с температурой.

Прозрачность воды является одним из основных критериев, позволяющих судить о состоянии водоема. Она зависит от количества взвешенных частиц, содержания растворенных веществ и концентрации фито- и зоопланктона. Влияет на прозрачность и цвет воды. Важным фактором, определяющим прозрачность воды в непроточных водоемах, являются биологические процессы. Таким образом, прозрачность воды может характеризовать уровень развития жизни в водоеме и выступать как показатель распределения света в толще воды, от которого зависит в первую очередь фотосинтез и кислородный режим водной среды.

Газовый режим водоема определяется растворимостью газов, которая, в свою очередь, зависит от природы газа, температуры воды, ее минерализации, а также давления. Наибольшее значение для водных организмов имеют кислород, углекислый газ и сероводород. От концентрации кислорода в воде зависит жизнедеятельность рыб. При уменьшении его ниже определенных границ падает интенсивность питания и использования пищи, в результате чего замедляется рост рыб, снижается устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды, в том числе к промышленным и бытовым загрязнениям.

В водоемах основным источником углекислого газа является бактериальное окисление органических веществ, а также дыхание водных организмов. Биопродуктивность водоемов определяется наличием диоксида углерода. В большой концентрации углекислый газ ядовит для животных, и по этой причине водоемы, пересыщенные углекислотой, лишены жизни. Отрицательное влияние высокой концентрации углекислоты на жизнедеятельность рыб заключается в том, что рыбы, находясь в угнетенном состоянии, хуже используют кислород, растворенный в воде и корм. При этом значение имеет не просто абсолютное содержание в воде кислорода и углекислота, а их соотношение.

Наиболее благоприятно для большинства рыб значение водородного показателя (рН), близкое к нейтральному. При значительных сдвигах в кислую или щелочную сторону возрастает кислородный

порог, ослабляется интенсивность дыхания рыб, а вода сама по себе может стать токсичной для рыб.

Солевой состав играет важную роль в жизни гидробионтов. При этом имеет значение как суммарное количество растворенных в воде минеральных солей, так и ионный состав воды. В рыбоводных хозяйствах качество воды оценивают и по общей жесткости. Существенное влияние на рыб оказывают микроэлементы, содержащиеся в воде, недостаток или избыток которых приводит к патологии в развитии, отравлениям и нередко – к гибели. Источником поступления микроэлементов в рыбу являются вода, растительность, естественный и искусственный корм.

Целью настоящей работы является оценка влияния рыбхоза «Селец» на сток реки Ясельда.

Экологическое воздействие рыбоводных хозяйств. Наиболее значимым экологическим фактором рыбоводной промышленности является локальное эвтрофирование водоемов. Источником эвтрофирования являются содержащиеся в кормах и используемые при выращивании рыбы питательные вещества, а также возникающие при их накоплении органические материалы. Загрязняющий эффект при разведении рыб приблизительно в два раза больше, чем при производстве говядины или свинины и в пять раз больше, чем при производстве куриного мяса. Хотя рыбы по сравнению с домашними животными активно употребляют в пищу питательные вещества, но при этом они не перерабатывают полностью употребляемый в пищу корм. Основными источниками эвтрофирования являются:

- растворение в воде несъеденного корма;
- не переработанные организмом питательные вещества в фекалиях рыб;
- побочные продукты обмена веществ и не используемые для роста питательные вещества в жидких выделениях.

Таким образом, самым важным для уменьшения экологических выбросов от рыбоводной промышленности является хорошая эффективность при использовании кормов, т. е. низкий кормовой коэффициент. При изготовлении кормов возникают и прочие факторы экологического загрязнения. Вредные экологические воздействия возникают, например, из-за химикатов, используемых на различных этапах производства:

- средства, препятствующие обрастанию водорослями сетки (делевых вкладышей) садков;
- моющие антибактериальные средства;
- чистящие средства;
- различные антибиотики.

Химические вещества при разведении рыбы используются для борьбы с болезнями, вызываемыми бактериями, плесневыми грибами и паразитами. На предприятиях с проточной водой наиболее распространены виды химикатов, используемых при проведении профилактических и лечебных мероприятий для рыбы и икры, используются формалин, соль, хлорамин, перекись водорода, йодофоры.

На предприятиях, использующих садки, использование лечебных химикатов обычно ограничивается употреблением лекарств вместе с кормами, так как применение ванн с использованием растворенных в воде антибактериальных средств практически невозможно. Садки также обрабатываются средствами против водорослей, которые могут выделять оксид меди, из-за чего содержание меди в донных отложениях вблизи рыбопитомников может увеличиться.

Еще одним источником экологического воздействия рыбоводных хозяйств являются отходы при разведении рыб. К ним относятся:

- мёртвые рыбы;
- твёрдые отходы, например, пакеты из-под корма и неиспользуемые ящики из-под рыбы;
- проблемные отходы, например, старые химикаты, аккумуляторы, лампы дневного света;
- ил, удаляемый из выростных водоемов.

Правильное хранение и переработка отходов являются частью процесса охраны окружающей среды.

Методы исследования и исходные данные

Выбор участка реки и место для установки постовых устройств выбирается выше забора воды и ниже точки сброса рыбхозов. Место гидрологических наблюдений должно удовлетворять двум основным условиям:

– режим реки в выбранном месте должен быть характерным по возможности для большого участка реки;

– выбранный участок должен быть удобен для наблюдений, обеспечивая наибольшую возможную их точность в данных условиях.

Выбору участка реки должно предшествовать предварительное всестороннее ознакомление с районом по литературным данным, архивным материалам и другим источникам и рекогносцировочное обследование реки.

В результате предварительного ознакомления с материалами по району предполагаемого гидрологического поста необходимо выявить:

- основные черты гидрологического режима реки: характер колебаний уровня, расход и мутность и т. п.;
- гидрографические и морфометрические характеристики участка;
- современное состояние и перспективы развития водного хозяйства;
- наличие знаков геодезической сети, высотных реперов, пунктов триангуляции и полигонометрии, могущих служить для планово-высотной привязки геодезической основы участка;
- наличие крупномасштабных карт, планов, профилей реки и т. п.;
- современное состояние путей сообщения и средств связи.

По результатам предварительного анализа намечается один или несколько участков реки, после чего производится рекогносцировка местности и окончательный выбор участка.

Рекогносцировочное обследование производится не только в пределах намеченного участка, а значительно шире. Длина участка рекогносцировочного обследования определяется местными условиями и особенностями водного объекта. Рекогносцировка участка обычно выполняется во время летней межени, когда наилучшим образом можно охарактеризовать рельеф русла, поймы и берегов, растительность, грунты и т.п. Характеристика состояния реки в половодье и зимний период выявляется путем опроса местного населения.

В процессе рекогносцировки участка производятся следующие работы:

- общий осмотр участка;
- глазомерная съемка с промерами глубин, определениями скоростей и уклонов;
- выявление основных характеристик гидрологического режима реки путем опроса местного населения.

Уклоны водной поверхности определяются геодезическими методами. На исследуемом участке реки одновременно забивают колья вровень с водной поверхностью через 50–100 м, а также во всех характерных точках перелома водной поверхности. Отметки площадок кольев определяют нивелированием IV класса, двойным ходом от репера основного поста, а сам уклон вычисляется по формуле:

$$I = \frac{H_B - H_H}{L}, \quad (1)$$

где H_B, H_H – отметки уровня воды соответственно в верхнем и нижнем створах;

L – расстояние между уклонными постами.

Измерения глубин рек является основной частью всех гидрометрических работ и производятся для составления поперечных и продольных профилей.

В связи с тем, что уровень воды является величиной динамической, то глубины, измеряемые в разное время, имеют различную глубину. Для устранения этих различий при обработке материалов измерений глубины приводят к одному расчетному (условному) уровню, соответствующему определенному моменту времени.

Глубина водного потока – это расстояние по вертикали от дна до поверхности воды, которая при глубине до 3 м и относительно небольшой скорости течения определяется с помощью гидрометрической штанги с точность отсчета до 1 см.

Основными приборами для измерения скоростей измерения течения воды в реках и каналах являются гидрометрические поплавки и гидрометрические вертушки.

Гидрометрические поплавки применяются для измерения скорости течения потока на поверхности, на различных глубинах и

средней скорости на вертикали, где невозможно измерить ее гидрометрическим прибором из-за малой глубины и помех в потоке.

Измерения скоростей течения на вертикалях обычно выполняют одной и той же вертушкой, последовательно перемещаемой в различные точки вертикали.

Перед измерением скоростей на каждой вертикали выполняются следующие работы:

- подготовка вертушки к измерению скорости, которая заключалась в сборке и проверке исправности электрической сети сигнализации и контрольного механизма;
- определение уровня воды на водомерном посту на начало и конец работы на вертикали;
- измерение глубины на вертикали;
- вычисление рабочей глубины на вертикали и расчет глубин погружения вертушки для измерения скоростей;
- измерение скорости течения.

В гидрометрическом створе намечаются скоростные вертикали в отдельных точках, которых измерялись скорости течения.

Перед измерением скорости течения на каждой скоростной вертикали вначале измеряют рабочую глубину, чтобы убедиться, что она совпадает с глубиной, полученной по промеру, или близка к ней.

При детальном способе скоростные вертикали назначаются через равные промежутки по ширине реки – через одну промерную вертикаль. Измерение скорости течения на вертикали производят при свободном от водной растительности русле в следующих пяти точках по глубине вертикали: у поверхности, на 0,2h, на 0,6h, на 0,8h и у дна. Этот способ дает наиболее точное значение средней скорости на вертикали.

Вычисляется средняя скорость на вертикали при открытом, не заросшем водной растительностью русле осуществляется по следующей формуле [15]:

$$V_{cp} = 0,05 \cdot V_{пов} + 0,347 \cdot (V_{0,2} + V_{0,6}) + 0,173 \cdot V_{0,8} + 0,083 \cdot V_{дн} \quad (2)$$

Из-за изменчивости гидравлических элементов во времени и пространстве расход воды не поддается прямым измерениям. Его значения получают в результате косвенных измерений элементов: расстояний, глубин и скоростей потока. На их основе расходы воды могут быть вычислены по следующей модели:

$$Q = \sum_{i=0}^N 0,5(V_i + V_{i+1}) \cdot f_{i+1}, \quad (3)$$

где V_i, V_{i+1} – проекция средних скоростей на граничных вертикалях; f_{i+1} – площадь между вертикалями.

Достоинство модели (3) перед другими подобными моделями в том, что данная модель допускает различную степень дискретизации поля скоростей и глубины: количество промерных вертикалей, как правило, назначается в 2–3 раза больше, чем скоростных, кроме того, она дает более точные результаты [15].

Вычисление расхода воды аналитическим способом производится в следующей последовательности [5, 8, 15]:

1. Определяется площадь отсеков между скоростными вертикалями f_j посредством планиметрирования частей поперечного профиля или аналитическим методом трапеций по формуле:

$$f_j = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_{j-1}} (h_{i,j} + h_{i+1,j}) \cdot b_{i,j}, \quad (j = 0, n), \quad (4)$$

где h_{ij} – глубина воды на i -ой вертикали j -го отсека, N_{j-1} – количество промерных вертикалей в отсеке (рисунок 1); b_{ij} – ширина между промерными вертикалями в j -ом отсеке.

2. Вычисляется средняя скорость на вертикали по формуле (2).
3. По рабочим глубинам всех промерных вертикалей со срезкой на расчетный уровень площади живого сечения между скоростными вертикалями.

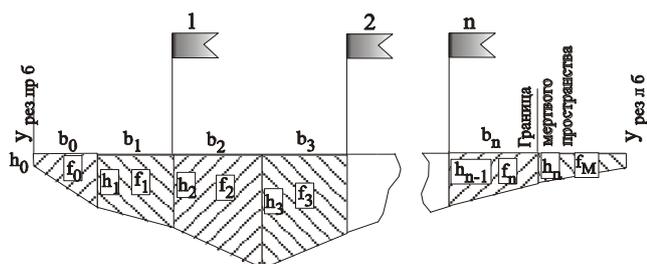


Рисунок 1 – Схема к вычислению частных площадей живого сечения

4. Средняя скорость $V_{j,s}$ в отсеке между скоростными вертикалями вычисляется как полусумма скоростей V_j и V_{j+1} :

$$V_{j,s} = 0,5(V_j + V_{j+1}), \quad (j = 0, n). \quad (5)$$

Частные расходы q_j находят как произведение $V_j f_j$, а полный расход как

$$Q = \sum_{j=0}^{n+1} q_j. \quad (6)$$

Таким образом, расчетная формула для полного расхода через все живое сечение приобретает вид:

$$Q = kV_i f_0 + 0,5 \sum_{j=1}^{n+1} (V_j + V_{i+1}) \cdot f_i + k^1 V_n \cdot f_n. \quad (7)$$

Ниже представлены результаты промерных работ, вычисленные скорости течения и расходы воды в расчетных створах рек. Построены поперечные профили рассматриваемых рек.

Алгоритм математической модели уровней и расходов. Для определения средней глубины потока и скорости для определения расходов воды различной обеспеченности в отдельном створе необходимо решение двух отдельных задач:

- устроить временный водомерный пост и измерить основные характеристики потока;
- определить водность года исследуемого водотока на текущий момент времени.

По результатам стандартных гидрометрических работ определяются отметки характерных точек русла, на основе которых строится поперечный профиль русла, и вычисляются площади поперечного сечения (ω), смоченный периметр (χ) и гидравлический радиус (R) для различной глубины наполнения по следующим формулам:

$$\omega = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i (y_{i+1} - y_{i-1})), \quad (8)$$

$$\chi = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}, \quad (9)$$

где X_i и Y_i – координаты i -ой точки рассматриваемого многоугольника (рисунок 2), м;

n – количество точек многоугольника.

Таким образом, задаваясь приращением глубины Δh , строится зависимость площади поперечного сечения ω и средней глубины h_{cp} . Приращение глубины принимается в зависимости от выраженности рельефа дна водотока, но рекомендуется принимать количество итераций $\tau > 25$, тогда $\Delta h = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{\tau}$. Аналогично определяется зависимость смоченного периметра χ и гидравлического радиуса R .

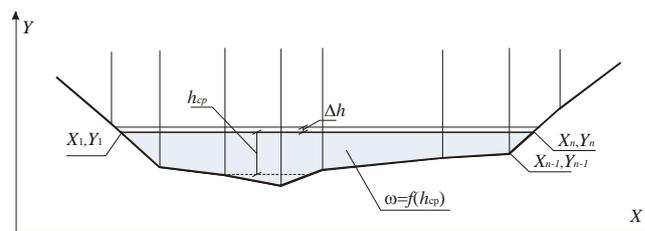


Рисунок 2 – Схема численной обработки данных промерных работ

Используя полученные массивы $[\omega, h_{cp}]$ и $[R, h_{cp}]$, выполняется оценка параметров регрессионной модели вида [12]

$$z = \alpha \cdot h_{cp}^2 + \beta \cdot h_{cp} + \varphi, \quad (10)$$

где z – прогнозируемый геометрический параметр русла; α, β, φ – константы регрессионного уравнения.

С помощью зависимости площади живого сечения от средней глубины в форме функции вида (10) находится численное решение уравнения Шези по средней глубине потока

$$Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i}, \quad (11)$$

где $C_{P\%}$ – коэффициент Шези, $m^{0.5}/c$;

$i = i_0$ – гидравлический уклон, при равномерном установившемся движении можно принять как средний уклон дна водотока (первое допущение).

Выполнив некоторые преобразования, получим из уравнения (11) систему уравнений:

$$\begin{cases} Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i} \\ \omega_{P\%} = \alpha_{\omega} \cdot h_{cp P\%}^2 + \beta_{\omega} \cdot h_{cp P\%} + \varphi_{\omega} \\ R_{P\%} = \alpha_R \cdot h_{cp P\%}^2 + \beta_R \cdot h_{cp P\%} + \varphi_R \\ C_{P\%} = \frac{R_{P\%}^{2,5\sqrt{n}-0,13-0,75\sqrt{R_{P\%}}(\sqrt{n}-0,1)}}{n} \end{cases} \quad (12)$$

Так как в уравнении (12) количество неизвестных больше, чем количество уравнений, то принимаем второе допущение, т. е. измеренные значения гидравлических характеристик стока $Q_{uzm}, R_{uzm}, \omega_{uzm}, C_{uzm}, i$ и искомая средняя глубина воды заданной обеспеченности относятся к одному гидрологическому сезону. Исходя из этого, шероховатость русла водотока определяется по формуле Н. Н. Павловского:

$$C_{uzm} = \frac{R_{uzm}^{2,5\sqrt{n}-0,13-0,75\sqrt{R_{uzm}}(\sqrt{n}-0,1)}}{n}, \quad (13)$$

где $C_{uzm} = \frac{Q_{uzm}}{\omega_{uzm} \sqrt{R_{uzm} i}}$ – коэффициент Шези определяемый на основе измеренных значений расхода и параметров поперечного сечения русла водотока, $m^{0.5}/c$.

Формула Н. Н. Павловского принята как наиболее устойчивая в условиях малых значений гидравлического радиуса.

Необходимо отметить, что при численном решении уравнения (12) необходимо учитывать границы применимости регрессионных уравнений, то есть решение данного уравнения должно находиться в пределах $0 < h_{cp P\%} < h_{cp max}$. Так как экстраполяция данных зависимостей может привести к ошибочным результатам.

На следующем этапе камеральной обработки проводятся исследования с целью выявления водности гидрологического года для исследуемой реки.

Для определения водности текущего года подбирается река-аналог, имеющая длинный ряд наблюдений за гидрологическим режимом. Как показал предварительный анализ, водность года с высокой достоверностью аппроксимации ($r > 0,75$) определяют месяцы, предшествующие расчетному. При определении параметров функции распределения (трехпараметрическое гамма распределение) применяется метод наибольшего правдоподобия, для которого имеется система уравнений.

Определения основных гидрологических характеристик рек. Согласно ТКП 45-3.04-168-2009, определение расчетных гидрологических характеристик должно основываться на данных гидрометеорологических наблюдений, в том числе регулярных наблюдений последних лет, опубликованных в специальных документах в области гидрологии; дополнительно должны учитываться данные инженерно-гидрометеорологических изысканий [13]. В связи с тем, что на р. Ясельда в створе г. Береза ведутся регулярные гидрологические наблюдения Республиканским центром по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, то определения расчетных гидрологических характеристик осуществлялось непосредственно по данным гидрологических наблюдений с учетом требований, изложенных в п.4.3 – 4.10 и 5.1.1 – 5.1.15 ТКП 45-3.04-168-2009 [13]. В настоящей работе использованы данные гидрометрических наблюдений за период с 1954 по 2018 гг., т.е. 65 лет, что достаточно для получения объективных статистических гидрологических характеристик по р. Ясельда в створе г. Береза.

Методика определения экологического стока рек. Разработанная нами методика определения детально изложена в работах [4, 7]. Остановимся вкратце на ее сути. Экологический сток – это то количество воды, которое должно оставаться в реке для обеспечения условий существования гидробионтов с одновременным сохранением ее необходимого качества. В этом случае сохраняются экосистемы пойм, а река остается элементом ландшафта. Таким образом, экологический сток обеспечивает количественное и качественное состояние водного объекта в самый маловодный период года.

В общем случае экологический (минимально допустимый) сток должен учитывать следующие факторы [10, 11, 14]:

- объем, необходимый для нормального развития гидробионтов. В этом случае требуется сохранять скорости течения воды в диапазоне: 0,25–0,6 м/с (0,25 м/с – нижний предел скоростного режима, при котором начинается бурное развитие фитопланктона), при глубине потока не менее 0,1–3 м. Важным периодом с точки зрения средообразующих функций является меженные периоды лета и зимы. Однако при средней мощности ледообразования от 17 до 45 см может наблюдаться гибель ихтиофауны;
- выполнение рекой ее природных функций. Речная сеть транспортирует вещества и энергию, таким образом, перераспределяя их во времени и в пространстве;
- внутригодовую изменчивость стока. Наличие изменчивости стока реки в течение года поддерживает естественную цикличность в развитии различных биологических видов;
- изменчивость стока по годам. Как и внутригодовая изменчивость, колебания объемов стока по годам позволяет обогащать пойменную часть водотока питательными веществами. Одновременно затопление уничтожает гидрофобные растения, заселяющие пойму за маловодный период.

Способ минимальных расходов предполагает, что размер минимального (экологического) стока принимается равным минимальному среднемесячному стоку 95 % обеспеченности [3]. Кроме того, объем экологического стока принимается в зависимости от вариации годового стока реки [9]. При значительной изменчивости годового стока экологический сток может доходить по абсолютному значению до минимального годового стока. Экологический сток определяется как доля от расчетной величины.

В Беларуси размер экологического стока принимается как 75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности. Но данный подход не в полной мере соответствует выше перечисленным требованиям, а именно: не обеспечивает внутригодовую изменчивость

стока, не учитывает многолетние циклы водности и в большинстве случаев не достигается минимальная скорость течения воды.

Применение способа натуральных исследований основано на выполнении полевых или лабораторных исследований. Способ наиболее часто применяется для важных с экологической точки зрения объектов. Сложность реализации его связана со значительными экономическими затратами, а также необходимостью проведения продолжительных непрерывных наблюдений. В настоящее время широко распространение получили автономные автоматизированные пункты гидрологического мониторинга, накапливающие всю необходимую информацию для достоверной оценки размеров экологического стока. При этом реализуются все требования, предъявляемые к величине экологически обоснованного минимального стока реки [2].

Однако, как и в иных отраслях народного хозяйства, остается проблема оценки предельных антропогенных нагрузок (объемов сброса сточных вод, их химического состава и режима сброса), обеспечивающих условия существования и развития геоценозов. Причем предельные экологически обоснованные характеристики водотока в каждом отдельном случае будут своими. Так, с точки зрения условий рыбного хозяйства, ключевым фактором будет являться количество кислорода, растворенного в воде; при этом геолого-минералогические условия могут существенно влиять на количество кислорода. Также стоит отметить, что данный способ не определяет подходов к определению экологического стока при различных обеспеченностях [1, 2].

Применение метода пропорциональных расходов основано на пропорциональном выделении экологического стока как доли стока реки в текущий момент времени. В этом случае используется некий коэффициент пропорциональности K , характерный для конкретных условий. С учетом коэффициента пропорциональности величина экологического стока $Q_i^{\text{эко}}$ в i -й интервал времени определится следующей зависимостью [11]:

$$Q_i^{\text{эко}} = Q_i \cdot K_i. \quad (14)$$

Применение данного подхода требует проведения натуральных исследований с привлечением специалистов биологического направления. Широкое применение указанный подход получил в Западной Европе. К недостаткам можно отнести отсутствие обоснованных подходов к оценке коэффициентов пропорциональности в различных природных условиях. При условии разработки нормативных подходов к определению данного коэффициента рассматриваемый подход может быть эффективным.

Способ повышения обеспеченности подразумевает выделение нижнего и верхнего предела изменения стока, практически встречающегося на реальной реке [16, 17]. Суть метода заключается в установлении нижнего предела экологически допустимого стока на уровне месячных расходов для года 99 % обеспеченности, так как эти условия являются предельными с точки зрения природопользования.

В качестве верхнего предела принимается расход 50 % обеспеченности. В этих условиях формируется нормальный режим обмена веществом и энергией в пределах геосистемы река-пойма. Как указано в работах [10, 11], наибольшая продуктивность речных и пойменных экосистем наблюдается при обеспеченности в пределах 40...60 %.

Определение параметров функции распределения экологического стока основывается на переносе обеспеченности среднегодового стока к заранее определенным обеспеченностям экологического стока. А именно, предполагается, что экологический сток 95 % обеспеченности соответствует среднегодовому стоку 99 % обеспеченности, а экологический сток 25 % обеспеченности принимается равным стоку 50 % обеспеченности. Имея две точки кривой функции распределения случайной величины, можно подобрать ее параметры. Однако применение данного подхода ограничивает диапазон применяемых теоретических кривых распределений (применимы только двух параметрические функции распределения). Кроме того, применение перехода и видится достаточно субъективным и не всегда может быть использовано в качестве проектного либо директивного. Применение данного подхода наиболее эффективно для крупных рек. В условиях Беларуси, где составление водохозяйственного

баланса нацелено в основном на малые или средние реки, применение этого метода не всегда эффективно и обоснованно [10].

Существующие подходы определения экологического стока регламентируют только минимальное значение стока реки. При этом отсутствует определение экологического стока при различных обеспеченностях. Наиболее эффективным способом определения экологического стока с учетом внутригодового распределения является способ повышения обеспеченности. Поэтому он использован в данной работе.

Одним из крупнейших производителей товарной рыбы в Республике Беларусь является ОАО «Опытный рыбхоз «Селец»», основанный в 1983 г. и являющийся крупнейшим как по занимаемым площадям для выращивания рыбы, так и по объемам продукции. В целом для рыбхоза в производстве товарной рыбы в Беларуси составляет 25 %. Основная специализация – производство и выращивание прудовой рыбы: карпа, толстолобика, белого амура. Общая площадь прудов составляет около 2500 га, нагульных прудов – 1823 га, питомных прудов – 677 га, при этом проектная мощность составляет 3116 т рыбы. Отдельные пруды здесь дают до 30 ц/га – почти вдвое больше норматива.

ОАО «Опытный рыбхоз «Селец»» расположен в бассейне реки Ясельды и является типичным для Белорусского Полесья рыбхозом. Бассейн реки Ясельды расположен в центральной части Брестской области и в основном приурочен к Полесской седловине. Водосбор занимает площадь в 7790 км². Рельеф равнинный. На повышенных участках территории преобладают песчаные грунты, на пониженных – торфяные. Лесами и болотами занято 60 % водосбора, лесами на суходолах – 27 %, болотами (в основном низинными травяными) – 34–35 %, в том числе около 7 % заболоченным лесом, озерами – около 1 %. Характерно высокое стояние уровня поверхностных вод и богатый запас грунтовых вод верхних горизонтов, которые являются основным источником питания рек бассейна Ясельды [19].

Строительство водохранилища «Селец» продолжалось с октября 1977 г. по 1986 г. Оно предназначено для рыбоводного хозяйства, увлажнения сельскохозяйственных угодий, противопожарных и хозяйственных нужд. Основные характеристики водохранилища приведены в таблице 1, а его схема на рисунке 3.

Таблица 1 – Основные характеристики водохранилища «Селец»

Характеристики	Величина
Площадь водосбора в створе плотины, км ²	681
Объем годового стока 75 % обеспеченности, млн м ³	93,58
То же , 50 % обеспеченности, млн м ³	101
Максимальный расход воды весеннего половодья $P = 1 \%$, м ³ /с	98,1
Максимальный сбросной расход воды при ФПУ, м ³ /с	68,0
Среднемноголетний расход воды, м ³ /с	3,52
Вид регулирования стока	Сезонное
Длина, км	11,3
Ширина максимальная, км	4,1
Ширина средняя, км	1,84
Площадь зеркала при НПУ, км ²	20,7
Объем полный, млн м ³	56,3
Объем полезный, млн м ³	41,5
Отметка форсированного подпорного уровня ФПУ, м	154,26
Отметка нормального подпорного уровня, НПУ, м	154,0
Отметка уровня мертвого объема, УМО, м	151,5
Средняя глубина при НПУ, м	2,7
Глубина максимальная при НПУ, м	5,4

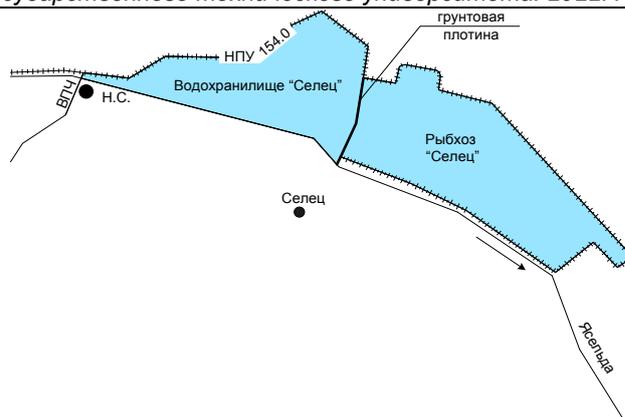


Рисунок 3 – Схема водохранилища «Селец»

Река Ясельда и ее притоки принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. Режим стока в годовом разрезе характеризуется высоким весенним половодьем, относительно низкой летне-осенней меженью, нарушаемой почти ежегодно дождевыми паводками, и обычно несколько повышенной водностью в зимний период за счет таяния снега в период оттепелей [19].

Особенность режима реки – растянутое весеннее половодье, кратковременная летняя межень, которая нарушается дождевыми паводками и почти осенними ежегодными подъемами уровня воды. Весеннее половодье начинается в конце марта и длится до первой половины мая. Наивысший уровень половодья – в конце марта, среднее превышение уровня воды над межени в д. Хореве (в верховье) 1,4 м, в д. Городище (в нижнем течении) – 2,6 м, максимальное соответственно равно 1,7 и 3,1 м. На весенний период приходится 50 % годовых стоков, летне-осеннюю межень – 24 %, зимнюю – 16 %. Глубина реки в межень на перекатах составляет 0,5–0,9 м, а на плесах может достигать 1,5–2 м. Скорость течения реки в меженный период колеблется в пределах от 0,1 до 0,3 м/с. Замерзает река в начале декабря, ледоход в конце марта. Весенний ледоход 2–3 суток. Среднегодовой расход воды в устье 35,8 м³/с, наибольший (53 км от д. Сенин Пинского р-на 1958 г.) – 573 м³/с, наименьший (1958 г.) – 1,36 м³/с [19].

Результаты исследования и их обсуждения. Для количественной оценки влияния рыбхоза «Селец» на сток реки Ясельды 20.06.2021 г. нами выполнены гидрометрические измерения расхода воды в створах, расположенных выше и ниже рыбхоза. Верхний створ располагался в восточной части Пружанского района (Брестская область) на южной окраине деревни Рогачи вблизи моста через реку Ясельду (рисунок 4).



Рисунок 4 – Карта-схема расположения верхнего створа

Русло в пределах используемого створа имело прямолинейную форму на протяжении более чем трехкратной ее ширины. Ширина русла для участка створа составила в пределах 16–18 м. Берега высотой порядка 1–2 м представлены участками с большим уклоном,

высланными песчаными породами. Дно участка реки песчаное. На береговой линии и пойме присутствует травяная и кустарниковая растительность, а на некотором отдалении от русла присутствуют одиночные деревья. Водная растительность на исследуемом участке присутствовала в незначительном количестве (рисунок 5).



Рисунок 5 – Участок исследования в верхнем створе

По результатам промеров глубин в верхнем створе построен поперечный профиль реки Ясельды (рисунок 6) и определены основные характеристики на момент изысканий: расход воды $Q = 2,43 \text{ м}^3/\text{с}$; площадь поперечного сечения $F = 15,66 \text{ м}^2$; ширина реки по урезу воды $B = 16,35 \text{ м}$; средняя глубина потока $h_{\text{ср.}} = 0,96 \text{ м}$; средняя скорость течения воды $V_{\text{ср.}} = 0,16 \text{ м/с}$; максимальная скорость $V_{\text{max}} = 0,18 \text{ м/с}$; уклон водной поверхности $i_{\text{пов}} = 0,67 \text{ ‰}$.

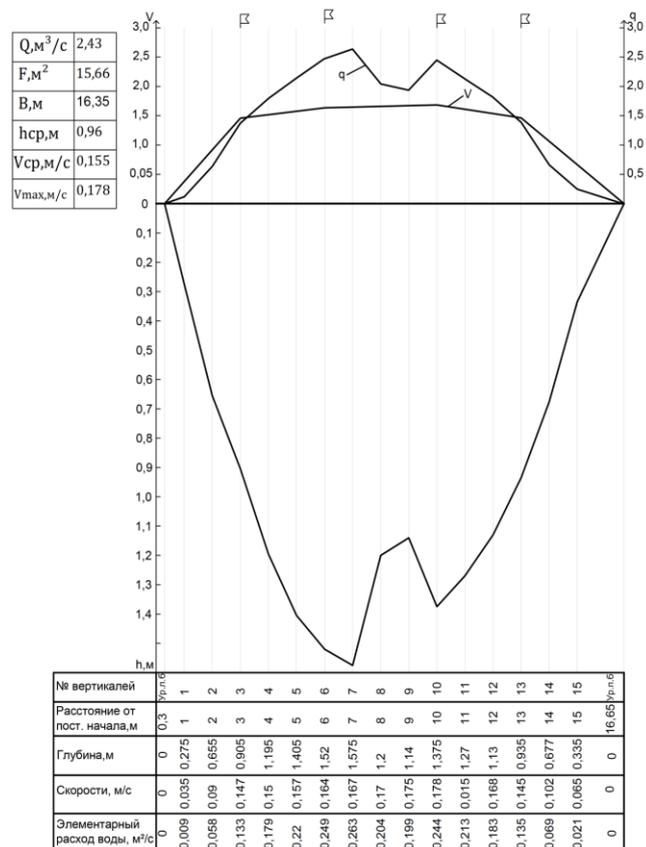


Рисунок 6 – Поперечный профиль реки Ясельды в верхнем створе

Нижний створ реки Ясельды размещен вблизи автомобильного моста, расположенного на северо-восточном въезде в город Березу (Брестская область) по дороге Р6 (рисунок 7).

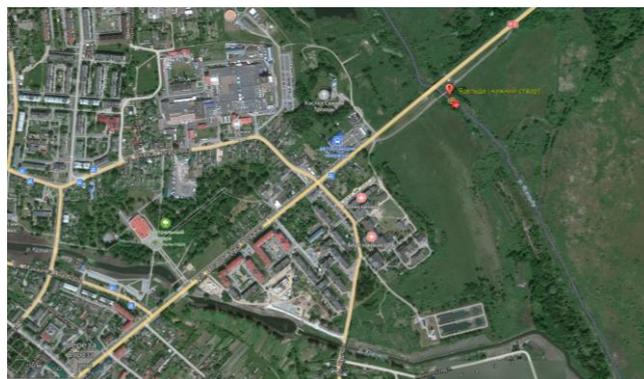


Рисунок 7 – Карта-схема нижнего створа реки Ясельды

Русло на участке створа относительно прямое. Ширина русла в створе варьируется от 7 до 10 метров. Левый и правый берег пологий и на всем протяжении створа торфянистый с большим количеством отложений органического происхождения. Берега и пойма в пределах створа покрыта кустарником и травяной растительностью. Помимо этого, на некотором расстоянии от русла имеются отдельные деревья. Водной растительности в значительном количестве не присутствовало. Речное дно в створе преимущественно илистое, особенно возле береговой линии (рисунок 8).

По результатам промеров глубин в верхнем створе построен поперечный профиль реки Ясельды (рисунок 9) и определены основные характеристики на момент изысканий: расход воды $Q = 2,20 \text{ м}^3/\text{с}$; площадь поперечного сечения $F = 6,38 \text{ м}^2$; ширина реки по урезу воды $B = 7,00 \text{ м}$; средняя глубина потока $h_{\text{ср.}} = 0,91 \text{ м}$; средняя скорость течения воды $V_{\text{ср.}} = 0,35 \text{ м/с}$; максимальная скорость $V_{\text{max}} = 0,45 \text{ м/с}$; уклон водной поверхности $i_{\text{пов}} = 1,18 \text{ ‰}$.

Сравнительный анализ исследуемых створов показал существенное их различие. Так участок реки в нижнем створе требует чистки русла. Из количественных характеристик обращает на себя внимание снижение расхода воды в нижнем створе $\Delta Q = -0,23 \text{ м}^3/\text{с}$. Это вызвано дополнительным испарением воды с поверхности водохранилища и рыбоводных прудов.

На основе данных по температуре воды и воздуха, относительной влажности воздуха и скорости ветра выполнена оценка испарения с водной поверхности за период с 1973 по 2013 гг. [19]. Расчетные величины приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Испарение с водной поверхности

Надежность, %	Испарение с водной поверхности, мм
5	588
25	665
50	725
75	790
90	853
95	894

Верхний створ находится в подпоре со стороны водохранилища «Селец», что вызвало увеличение площади поперечного сечения по сравнению с нижним створом $\Delta F = 9,28 \text{ м}^2$ и ширины потока $B = 9,35 \text{ м}$ и как следствие увеличением уклона водной поверхности в нижнем створе $i_{\text{пов}} = 0,51 \text{ ‰}$, что привело к увеличению средней $V_{\text{ср.}} = 0,19 \text{ м/с}$ и максимальной $V_{\text{max}} = 0,27 \text{ м/с}$ скорости течения воды в нижнем створе.



Рисунок 8 – Участок исследования в нижнем створе

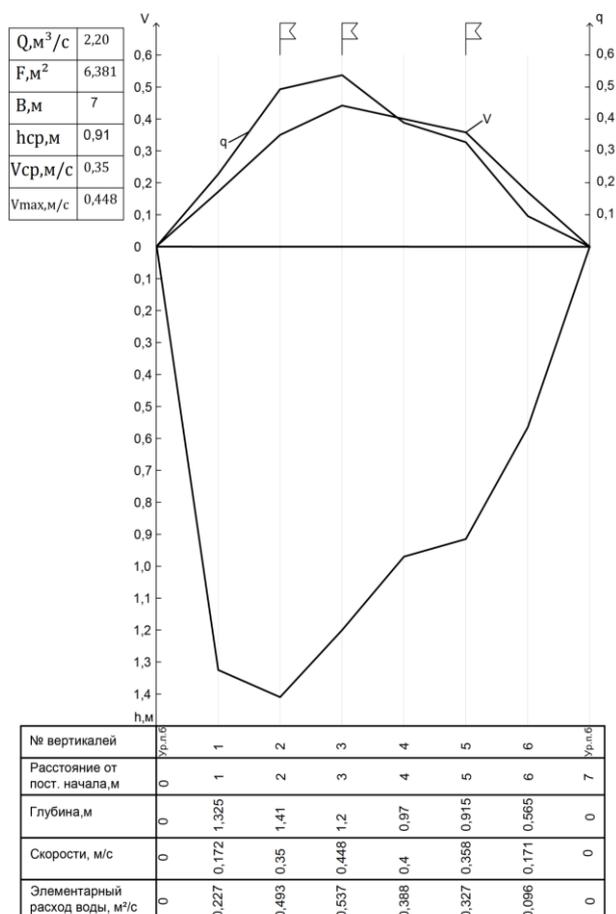


Рисунок 9 – Поперечный профиль реки Ясельды в нижнем створе

По результатам обработки данных гидрометрических измерений по методике, описанной выше, получены математические модели

(расходы/уровни/скорости) и кривые связи скорости/расхода и уровня воды в створе. В качестве особенности следует отметить, что применение кривых связи допустимо только в пределах установленного диапазона. Применение экстраполяции допустимо, однако может приводить к значительным отклонениям и погрешностям.

Для верхнего створа:

$$V = -0,0370h_{ср}^3 + 0,0519h_{ср}^2 + 0,1455h_{ср};$$

$$Q = 1,6653h_{ср}^3 + 1,0378h_{ср}^2 - 0,0113h_{ср}.$$

Для нижнего створа:

$$V = 0,1113h_{ср}^3 - 0,2736h_{ср}^2 + 0,5367h_{ср};$$

$$Q = 0,2075h_{ср}^3 + 2,7085h_{ср}^2 - 0,2417h_{ср}.$$

Данные, полученные при расчете экологического стока рек, позволили определить величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ. Результаты расчетов при условии обеспечения сохранения в рассматриваемых реках экологического стока с учетом внутригодового распределения для различных вероятностей превышения (обеспеченностей) приведены ниже.

Анализ гидрологических характеристик реки Ясельды проведен на расчетном участке реки ниже рыбхоза «Селец».

Данные о количественных характеристиках стока реки Ясельды по месяцам и в годовом разрезе представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Внутригодовое распределение стока реки Ясельды в средний по водности год

Интервалы осреднения												
ян-варь	фев-раль	март	апр-ель	май	июнь	июль	ав-густ	сен-тябрь	ок-тябрь	но-ябрь	де-кабрь	Год
Расход, м ³ /с												
4,45	4,36	6,83	9,64	4,74	3,10	2,86	3,27	4,40	4,48	4,40	4,62	4,75
Коэффициент вариации, Cv												
0,70	0,64	0,66	0,82	0,43	0,43	0,65	0,73	0,71	0,63	0,70	0,69	0,31
Коэффициент асимметрии, Cs												
1,72	0,93	1,38	2,96	0,75	0,23	1,68	1,42	0,50	1,02	2,22	2,37	0,48
Коэффициент автокорреляции, r(1)												
0,27	0,28	0,36	0,28	0,27	0,20	0,22	0,50	0,71	0,30	0,10	0,01	0,34

Анализ внутригодового распределения стока реки Ясельды в створе города Березы, по месяцам показал, что на весенний период приходится 37 %, 36 % от годового стока соответственно, зимний сезон составляет 24 %, 25 % от годового стока, на летне-осенний сезон приходится 39 %, 38 % от годового стока.

Минимальные среднемесячные расходы воды 95 % обеспеченности. Характеристики минимального стока являются расчетными при гидрологическом обосновании различных водохозяйственных и водоохраных проектов, а именно: проектирование гидростанций для выработки энергии, водоснабжение городов, сельских населенных пунктов, водного транспорта, рыбного хозяйства. В практике водохозяйственного проектирования основное применение находят величины минимального стока обеспеченностей в диапазоне 75–99 %, характеризующие годы с маловодной меженью сравнительно редкой повторяемости. При оценке наихудших условий для формирования качества воды обычно используется минимальный сток 95 %-ной обеспеченности (средняя повторяемость 1 раз в 20 лет), что является достаточно произвольным условием, требующим дифференциации в зависимости от тяжести негативных экологических и санитарно-технических последствий.

В таблице 4 приведены результаты расчета минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения (обеспеченности) с учетом внутригодового распределения стока.

Таблица 4 – Минимальные среднемесячные расходов воды 95 % обеспеченности с учетом внутригодового распределения стока реки Ясельды, млн м³

Интервалы осреднения												
ян-варь	фев-раль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
7,47	6,19	6,14	14,66	9,21	5,48	3,85	3,08	8,49	6,23	4,42	4,89	80,12

Экологический сток рек в различные по водности годы. Рассмотрим определение экологического стока реки Ясельды в створе города Березы. Расчетный период принят с 1954 по 2018 гг. Наиболее эффективно описывает исходные данные функция плотности распределения случайной величины Крицкого – Менкеля. Решая уравнения, получаем две функции плотности распределения экологического стока. Как видно из рисунка 10, для экологического стока кривая несколько сместилась влево и приобрела вид, близкий к нормальному закону распределения.

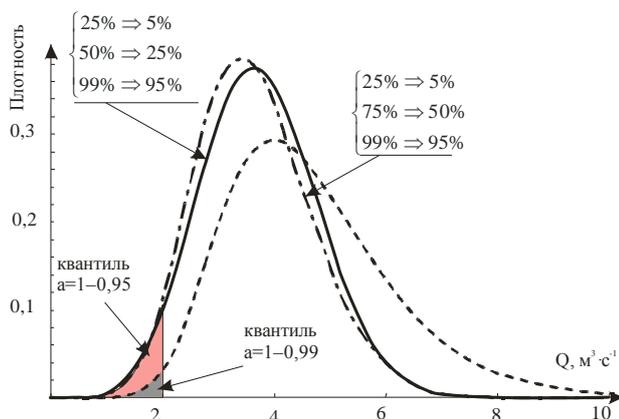


Рисунок 10 – Кривые плотности распределения среднегодового стока (штриховая) и экологического стока (штрихпунктирная и сплошная)

Учитывая результаты проведенных натурных исследований и используя метод переноса обеспеченностей, нами проведены гидрологические расчеты по определению экологического стока реки Ясельды с учетом внутригодового распределения стока для различных вероятностей превышения (обеспеченностей), результаты которых приведены в таблице 5–6.

Таблица 5 – Экологический сток с учетом внутригодового распределения, м³/с/ млн. м³

Интервалы осреднения												
ян-варь	фев-раль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
95 % вероятности превышения (обеспеченности)												
2,21	1,83	1,82	4,33	2,72	1,62	1,14	0,91	2,51	1,84	1,31	1,44	1,97
5,80	4,81	4,77	11,39	7,16	4,26	2,99	2,40	6,60	4,84	3,44	3,80	62,25
75 % вероятности превышения (обеспеченности)												
3,27	2,71	2,69	6,42	4,03	2,40	1,69	1,35	3,72	2,73	1,94	2,14	2,92
8,59	7,13	7,07	16,87	10,60	6,31	4,43	3,55	9,77	7,17	5,09	5,62	92,21
50 % вероятности превышения (обеспеченности)												
4,13	3,42	3,40	8,10	5,09	3,03	2,13	1,70	4,69	3,45	2,44	2,70	3,69
10,85	9,00	8,93	21,30	13,38	7,96	5,60	4,48	12,34	9,05	6,42	7,10	116,4
5 % вероятности превышения (обеспеченности)												
6,32	5,24	5,20	12,42	7,80	4,64	3,26	2,61	7,19	5,28	3,75	4,14	5,65
16,62	13,78	13,68	32,63	20,50	12,20	8,58	6,86	18,90	13,87	9,84	10,88	178,3

Таблица 6 – Величины допустимого изъятия поверхностных вод из рек с учетом сохранения экологического стока, млн м³

Интервалы осреднения												
ян-варь	фев-раль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
95 % вероятности превышения (обеспеченности)												
1,65	1,36	1,35	3,08	1,52	0,51	0,12	0,01	1,46	1,16	0,90	1,07	14,20
75 % вероятности превышения (обеспеченности)												
2,23	1,85	1,84	4,23	2,25	0,95	0,42	0,26	2,13	1,66	1,25	1,46	20,51
50 % вероятности превышения (обеспеченности)												
2,63	2,17	2,16	5,00	2,73	1,23	0,62	0,42	2,58	1,98	1,48	1,71	24,71
5 % вероятности превышения (обеспеченности)												
5,29	4,38	4,35	10,23	6,02	3,19	2,00	1,52	5,61	4,21	3,06	3,46	53,30

Оценки изменения гидрологического режима рек под влиянием природных и воздействием антропогенных факторов. Оценка изменения стока выполнена по реке Ясельде для гидрологического поста города Березы в среднемесячном и среднегодовом разрезах для периода с 1986–2015 гг. по отношению к периоду с 1961–1986 гг. Исходные гидрологические данные взяты из официальных изданий Белгидромета – гидрологических ежегодников и детально изложена в работах [4, 7].

Итоговые обобщенные результаты по оценке изменения стока за период с 1961 по 2015 гг. по реке Ясельде в створе города Березы в таблице 7, 8.

По результатам оценок изменения стока за период с 1961 по 2015 гг. можно сделать следующие обобщенные выводы:

- среднегодовой сток изменился незначительно в пределах точности измерений;
- произошло значительное снижение стока весеннего половодья – на 66 %, с более ранним наступлением его пика; вызвано как климатическими изменениями, так и антропогенными воздействиями в виде регулирования стока водохранилищем;
- произошло увеличение стока в зимний период – на 39,4 %, вызванное частыми зимними оттепелями;
- сток в летний период изменился значительно более чем 98 %, что вызвано попусками воды с водохранилища «Селец».

Таблица 7 – Изменения стока реки Ясельды в створе города Березы за период с 1961 по 2015 гг.

Характеристика	Значения расходов воды за периоды (1986–2015), (1961–1985), м ³ /с, разница, %											
	ян-варь	фев-раль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Q _{ср.}	4,60	4,24	6,95	8,96	4,69	3,26	3,04	3,45	4,69	4,58	4,37	4,59
Q ₁₉₆₁₋₁₉₈₅	4,27	3,60	8,63	12,5	5,33	3,07	2,31	2,13	2,37	3,33	4,47	4,86
Q ₁₉₈₆₋₂₀₁₅	4,88	4,78	5,56	6,00	4,15	3,41	3,65	4,55	6,63	5,62	4,29	4,36
Δ%	14,3	32,8	-35,6	-52,1	-22,1	11,1	58,0	114,6	180,0	68,8	-4,0	-10,3

Выполнены прогнозные оценки изменения речного стока реки Ясельды на период до 2035 года. При этом использовались результаты оценки фактического изменения климата и речного стока за период с 1961 по 2015 гг. и уточненный прогноз изменения климата на период до 2035 года с учетом мультимодельного ансамбля из четырех сценариев, рекомендуемого МГЭИК, а также региональной изменчивости климата (таблица 9) [4].

Таблица 8 – Изменение характерных видов стока реки Ясельды в створе города Береза за период с 1961 по 2015 гг., м³/с/%

Вид стока			
Средний годовой	максимальный весеннего половодья	минимальный летне-осенней межени	минимальный зимней межени
4,79/1,7	20,8/-66,0	1,72/98,2	2,63/39,4

Обобщение результатов расчетов прогнозного изменения стока в бассейнах реки Припять на период до 2035 года приведено в таблице 3.20 и на картахосхемах в [4].

Таблица 9 – Прогноз изменения поверхностного стока до 2035 года реки Ясельды в створе города Березы, в % от современного состояния

Зима	Весна	Лето	Осень	среднегодовой
-0,3	-27,0	-41,7	-23,3	-23,1

Прогноз стока на период до 2035 года для реки Ясельды в основном подтвердил выявленные тенденции его изменения за период с 1961 по 2015 гг. При незначительном изменении стока в среднем за год высока вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Особенно значительно может измениться сток в летние месяцы.

Следует отметить, что прогнозные оценки изменения стока рек в условиях изменяющегося климата следует рассматривать как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей, исходя из различных факторов, основные из которых это:

- погрешность выявленных тенденций изменения метеорологических и гидрологических характеристик с учетом оценки статистической значимости этих тенденций;
- неопределенность и неоднозначность сценариев изменения климата;
- неопределенность результатов расчетов с использованием гидрологических моделей для прогнозирования стока, обусловленную как погрешностями самих моделей и их верификации, так и с неопределенностями используемых в них данных и коэффициентов;
- неопределенность прогнозов влияния факторов антропогенной нагрузки на водные ресурсы с учетом изменения климата.

Значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании развития ОАО «Опытный рыбхоз «Селец» и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном.

Следует отметить, что рыболовные меры и условия для роста рыбы, улучшающие кормовую эффективность, направлены на уменьшение экологического воздействия на водные объекты. Для этого используют биологические и технические методы. Биологические методы направлены на снижение экологической нагрузки от рыболовства и влияют непосредственно на процесс разведения рыбы. Такие методы предназначены для того, чтобы сделать более эффективным сам процесс разведения рыбы, при котором всё большая часть производственной нагрузки, например, питательных веществ из кормов для рыб, соединяется с конечной продукцией, уменьшая этим долю экологической нагрузки. Повышение эффективности процесса благодаря биологическим методам также зачастую улучшает экономическую рентабельность предприятия.

Технологические методы направлены на снижение экологической нагрузки и напрямую не влияют на процесс разведения рыбы. Такими методами являются методики по обработке отработанной воды, выбор местонахождения рыболовного предприятия, а также применяемые технологии рыболовства.

Насыщение воды кислородом и аэрация также могут уменьшить используемый объем воды, что позволит использовать более эффективные методы обработки отработанной воды. Уровень содержания кислорода в бассейне может быть увеличен с помощью увеличения оборота воды в бассейне, с помощью аэрации, а также с помощью оксигенации.

Заключение

Проведена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Селец», расположенного в бассейне реки Ясельды в районе города Березы, на гидрологический режим реки для повышения эффективности управления водными ресурсами с учетом обеспечения экологического функционирования водных объектов, в ходе которой решены следующие задачи:

- выполнен анализ гидрологического режима расчетных участков рек, используемых для нужд рыбхозов, расположенных в бассейне реки Ясельды, состоящий из анализа имеющейся гидрологической информации, установлен репрезентативный период для расчета гидрологических характеристик, который составляет 65 лет и принят с 1954 по 2018 гг., определены основные гидрологические характеристики, включающие среднеголетние значения стока, коэффициенты вариации, асимметрии, автокорреляции;
- проведены натурные исследования участков реки, в ходе которых заложены створы выше и ниже участка забора воды для нужд рыбхоза. Построены поперечные профили. Для створов рассчитаны гидрологические характеристики, которые включают в себя распределение в поперечных сечениях водотоков местных продольных осредненных скоростей течения воды и расходов воды. Проведенные натурные исследования позволили определить расходы воды на исследуемых участках выше и ниже рыбхозов в период исследований;
- выполнены гидрологические расчеты по определению минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения (обеспеченности) и экологического стока с учетом внутригодового распределения стока различной обеспеченности;
- разработаны математические модели для участков, расположенных ниже и выше рыбхоза, в виде математических моделей, позволяющих в зависимости от средней глубины воды в створе определить скорости течения и расходы воды;
- оперативные гидравлические расчеты с целью оценки воздействия заборов воды рыбхозом на изменение гидрологического режима водных объектов (глубин воды, скоростей течения и расходов воды) осуществляются на основе разработанных математических моделей как разницы расчетных параметров для заложённых створов ниже и выше рыбхозов;
- определены математические зависимости для глубины, скорости течения и расходов воды в исследуемых створах ниже рыбхозов, соответствующих экологическому стоку, с использованием результатов гидрологических расчетов и математических моделей водных объектов;
- определены величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки, используемых для нужд рыбхозов, с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ и прудов, при обеспечении условия сохранения в реках экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыболовческих прудов.

Полученные результаты актуальны на ближнюю перспективу (10 лет), однако, возможно, требуют некоторых корректировок в будущем в связи с прогнозируемыми изменениями климата. Прогнозные оценки изменения стока реки Ясельды на период до 2035 года характеризуются незначительным изменением стока в среднем за год, но высока вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Особенно значительно может измениться сток в летние месяцы. Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений, в том числе возникновения маловодных периодов, повышается вероятность наступления длительных маловодных периодов. Во время маловодных периодов может произойти существенное уменьшение стока малых рек, ухудшение экологического состояния и рекреационного потенциала рек и прилегающих территорий, изменение гидрогеологического режима грунтовых вод, истощение почвенного покрова в пойме и т. п.

Хоть прогнозные оценки изменения стока рек рассматривают как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей, тем не менее, разработка и реализация мер по адаптации к изменению климата в части уточнения водохозяйственных балансов рыбхозов является актуальной задачей.

Работа выполнялась в рамках НИР «Оценка воздействия рыбхозов, расположенных в бассейне реки Припять, на гидрологический режим водных объектов» № госрегистрации 20212617

Список цитированных источников

1. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems / A. H. Arthington [et al.] // *Ecological Applications*. – 2006. – No. 16(4). – P. 1311–1318.
2. CIS Guidance Document n°31. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive : Technical Report 2015 - 086 / Martina Bussettini [et al.] ; European Commission. – Luxembourg : European Union, 2015. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/271769108>. – Date of access: 09.01.2021. – doi: 10.2779/775712
3. Владимиров, А. М. Сток рек в маловодный период года / А. М. Владимиров. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 295 с.
4. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 225 с.
5. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А. А. Волчек. – Москва : КНОРУС, 2021. – 418 с.
6. Волчек, А. А. Оптимизация управления природопользованием и эколого-экономическими системами регионов : монография / А. А. Волчек, Ан. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Москва ; Берлин : Дерект-Медиа, 2021. – 148 с.
7. 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*. – 2007. – № 1. – С. 50–62.
8. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учебное пособие / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека. – Москва : КНОРУС, 2021. – 520 с.
9. Лалыкин, Н. В. Определение резервируемого стока малых рек Молдавии / Н. В. Лалыкин // *Рациональное использование поверхностных и подземных вод : сборник научных трудов*. – М. : Гидрометеиздат, 1986. – С. 44–49.
10. Маркин, В. Н. Внутригодовое распределение экологического стока малых рек [Электронный ресурс] / В. Н. Маркин. – Режим доступа: http://www.msuee.ru/science/1/tom/1/1_12.doc. – Дата доступа: 28.04.2013.
11. Маркин, В. Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки [Электронный ресурс] / В. Н. Маркин. – Режим доступа: <http://www.msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm>. – Дата доступа: 04.05.2005.
12. Статистические методы в природопользовании : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев [и др.]. – Брест : БПИ, 1999. – 252 с.
13. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения : ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Введен 2010-07-01. – Мн. : Стройтехнорм, 2010. – 55 с.
14. Ткачев, Б. П. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы / Б. П. Ткачев, В. И. Буланов. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2002. – 114 с.
15. Учебная гидрометрическая практика : учебное пособие / А. А. Волчек [и др.] ; под ред. А. А. Волчека. – Минск : РИВШ, 2020. – 260 с.
16. Фащевский, Б. В. Проблемы экологического нормирования водного режима рек / Б. В. Фащевский // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 1993. – № 5. – С. 12–18.
17. Фащевский, Б. В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока / Б. В. Фащевский. – Минск : БелНИИНТИ, 1989. – 51, [2] с.
18. Энциклопедия : в 3 т. / редкол.: Т. В. Белова [и др.]. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2010. – 504 с.
19. Ясельда / И. В. Абрамова [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, И. И. Кирвеля, Н. В. Михальчука ; Национальная академия наук Беларуси, Полесский аграрно-экологический институт. – Минск : Беларуская навука, 2017. – (Реки Полесья). – 416 с.

References

1. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems / A. H. Arthington [et al.] // *Ecological Applications*. – 2006. – No. 16(4). – P. 1311–1318.
2. CIS Guidance Document n°31. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive : Technical Report 2015 - 086 / Martina Bussettini [et al.] ; European Commission. – Luxembourg : European Union, 2015. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/271769108>. – Date of access: 09.01.2021. – doi: 10.2779/775712
3. Vladimirov, A. M. Stok rek v malovodnyi period goda / A. M. Vladimirov. – L. : Gidrometeoizdat, 1976. – 295 s.
4. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetom izmeneniya klimata / A. A. Volchek [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 225 s.
5. Volchek, A. A. Gidrologicheskie raschety : uchebnoe posobie / A. A. Volchek. – Moskva : KNORUS, 2021. – 418 s.
6. Volchek, A. A. Optimizaciya upravleniya prirodnopol'zovaniem i ekologo-ekonomicheskimi sistemami regionov : monografiya / A. A. Volchek, An. A. Volchek, P. V. SHvedovskij. – Moskva ; Berlin : Derekt-Media, 2021. – 148 s.
7. Volchek, A. A. Ocenka transformacii vodnogo rezhima malyh rek Belorusskogo Poles'ya pod vozdeystviem prirodnyh i antropogennyh faktorov (na primere r. YAsel'da) / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // *Vodnoe hozyajstvo Rossii*. – 2007. – № 1. – S. 50–62.
8. Gidravlika, gidrologiya, gidrometriya: uchebnoe posobie / A. A. Volchek [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka. – Moskva : KNORUS, 2021. – 520 s. – (Bakalavriat i magistratura).
9. Lalykin, N. V. Opredelenie rezerviruемого stoka malyh rek Moldavii / N. V. Lalykin // *Racional'noe ispol'zovanie poverhnostnyh i podzemnyh vod : sbornik nauchnyh trudov*. – M. : Gidrometeoizdat, 1986. – S. 44–49.
10. Markin, V. N. Vnutrigodovoe raspredelenie ekologicheskogo stoka malyh rek [Elektronnyj resurs] / V. N. Markin. – Rezhim dostupa: http://www.msuee.ru/science/1/tom/1/1_12.doc. – Data dostupa: 28.04.2013.
11. Markin, V. N. Opredelenie ekologicheskii dopustimogo vozdeystviya na malye reki [Elektronnyj resurs] / V. N. Markin. – Rezhim dostupa: <http://www.msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm>. – Data dostupa: 04.05.2005.
12. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii : uchebnoe posobie dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij / V. E. Valuev [i dr.]. – Brest : BPI, 1999. – 252 s.
13. Raschetnye gidrologicheskie harakteristiki. Poryadok opredeleniya : ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Vveden 2010-07-01. – Mn. : Strojtekhnorm, 2010. – 55 s.
14. Tkachev, B. P. Malye reki: sovremennoe sostoyanie i ekologicheskije problemy / B. P. Tkachev, V. I. Bulanov. – Novosibirsk : GPNTB SO RAN, 2002. – 114 s.
15. Uchebnaya gidrometricheskaya praktika : uchebnoe posobie / A. A. Volchek [i dr.] ; pod red. A. A. Volcheka. – Minsk : RIVSH, 2020. – 260 s.
16. Fashchevskij, B. V. Problemy ekologicheskogo normirovaniya vodnogo rezhima rek / B. V. Fashchevskij // *Melioraciya i vodnoe hozyajstvo*. – 1993. – № 5. – S. 12–18.
17. Fashchevskij, B. V. Ekologicheskoe obosnovanie dopustimoi stepeni regulirovaniya rechnogo stoka / B. V. Fashchevskij. – Minsk : BelNI-INTI, 1989. – 51, [2] s.
18. Enciklopediya : v 3 tomah / redkol.: T. V. Belova [i dr.]. – Minsk : Belaruskaya Encyklopedyja imya P. Broўki, 2010. – 504 s.
19. YAsel'da / I. V. Abramova [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka, I. I. Kirvelya, N. V. Mihal'chuka ; Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Poleskij agrarno-ekologicheskij institut. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2017. – (Reki Poles'ya). – 416 s.

Материал поступил в редакцию 09.02.2022