

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМА ДЛЯ ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНЫХ ДЕЙСТВИЙ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ВОЛЧИХИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

**А.Н. Попов, Т.Е. Павлюк, В.Ф. Мухутдинов, Е.В. Загайнова,
А.С. Польшгалов, В.В. Сандалова, Е.А. Бутакова, О.С. Ушакова**

E-mail: pan1944@rambler.ru

ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ: Представлены результаты прикладного исследования в рамках апробации разработанного в ФГБУ РосНИИВХ «Пособия по выбору приоритетных действий, направленных на экологическую реабилитацию водоемов». Объектом исследования является Волчихинское водохранилище, расположенное на территории Свердловской области.

В соответствии с разработанным документом проведено исследование формирования гидрохимического и гидробиологического режимов водоема с учетом всех воздействующих факторов, оценены объемы загрязняющих и биогенных веществ, поступающих в водоем. Проведено их ранжирование, выявлены источники антропогенного загрязнения и доля каждого из них. Дана оценка трофического статуса водоема по гидробиологическим показателям. В водах водоема зафиксировано значительное количество тяжелых металлов и биогенных веществ, что объясняется влиянием антропогенной деятельности. На основе результатов проведенных исследований определен комплекс мероприятий по экологической реабилитации Волчихинского водохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологическая реабилитация, эвтрофирование, гидрохимическая характеристика, гидробиологическое состояние, биогенная нагрузка, трофическое состояние, антропогенное загрязнение, качество воды, Волчихинское водохранилище.

Антропогенное воздействие на водохранилище могут оказывать эвтрофикационные процессы, техногенное воздействие или оба процесса в совокупности, что ведет к эвтрофикации и ухудшению гидрохимического и гидробиологического состояния водоема. В работе [1] изложены основные вопросы разработанного ФГБУ РосНИИВХ «Пособия по выбору приори-

© Попов А.Н., Павлюк Т.Е., Мухутдинов В.Ф., Загайнова Е.В., Польшгалов А.С., Сандалова В.В., Бутакова Е.А., Ушакова О.С., 2019

тетных действий, направленных на реабилитацию непроточных и малопроточных озер» (далее «Пособие...»), позволяющего определить оптимальный набор мероприятий по экологической реабилитации водоемов. Исходная информация опирается на натурные и расчетные данные для конкретного водного объекта, расчеты основных потоков загрязняющих и биогенных веществ, определение трофического состояния водоема с экосистемных позиций, ранжирование потоков веществ по значимости влияния, выбор оптимального набора методов по эффективной реабилитации водного объекта. Применение основных положений «Пособия...» возможно при условии, что лимитирующим элементом этих процессов является фосфор общий, т. е. соотношение концентраций азота валового к фосфору валовому должно быть не менее семи.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выборе метода реабилитации водоемов, изложенного в «Пособии...», определен порядок необходимых мероприятий:

1. Проводится батиметрическая съемка водоема с определением глубин воды и мощности донных отложений. Определяются средняя глубина, объем воды и донных отложений, зависимость площади и объема водоема от уровня воды, период водообмена.

2. Устанавливается степень зарастаемости водного объекта и средняя биомасса на единицу площади.

3. Исследуется гидрохимическое и гидробиологическое состояние водного объекта.

4. Оценивается химический состав донных отложений и уровень вторичного загрязнения.

5. Для эвтрофируемых водных объектов:

– определяется удельный поток фосфора (общего) в водные массы ($\Gamma_{\text{сум}}$, г/м²·год):

$$\Gamma_{\text{сум}} = \Gamma_{\text{внешн}} + \Gamma_{\text{внутр}}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{внешн}}$ – удельный поток фосфора (общего) в водные массы водоема, формируемый за счет внешних источников поступления, г/м²·год;

$\Gamma_{\text{внутр}}$ – удельный поток фосфора (общего) в водные массы водоема от внутренних источников поступления, г/м²·год.

$$\Gamma_{\text{внешн}} = \frac{\Pi_{\text{внешн}}}{F_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где $\Pi_{\text{внешн}}$ – поступление общего фосфора из внешних источников за вычетом выноса с истоками, г/год;

$$\Pi_{\text{внешн}} = \Pi_{\text{рс}} + \Pi_{\text{ст}} + \Pi_{\text{атм}} + \Pi_{\text{рх}} + \Pi_{\text{ота}} + \Pi_{\text{лп}} + \Pi_{\text{тер}} - \Pi_{\text{ист}} \quad (3)$$

где P_{pc} – поступление фосфора с речным (руслowym) стоком (при прямом методе определения является интегральной характеристикой территории водосбора, при косвенном – не учитывается), г/год;

P_{ct} – поступление фосфора со сточными водами промышленности, ливневой и хозяйственно-бытовой канализации, сбрасываемыми непосредственно в водоем, г/год;

P_{atm} – поступление фосфора с атмосферными осадками, г/год;

P_{px} – поступление фосфора от садкового рыбного хозяйства, г/год;

$P_{ота}$ – поступление фосфора от отдыхающих на территории рекреации, г/год;

$P_{лп}$ – поступление фосфора с листовым опадом, г/год;

$P_{тер}$ – поступление фосфора с недренируемой водотоками территории водосбора водоема, г/год;

$P_{ист}$ – вынос фосфора из водоема с водой истоков, водозабором, г/год.

Для непроточных водоемов $P_{ист}$ равен нулю.

F_v – площадь водоема при фактическом уровне воды, м².

$$\Gamma_{внутр} = \Gamma_{ав} + \Gamma_{амо} + \Gamma_{фла} + \Gamma_{нм}, \quad (4)$$

где $\Gamma_{ав}$ – удельная нагрузка фосфором от плавающей и затопленной древесины, г/м²·год;

$\Gamma_{амо}$ – удельная нагрузка фосфором от донных отложений, обусловленная окислением стойкого мертвого органического вещества, г/м²·год;

$\Gamma_{фла}$ – удельная нагрузка фосфором, обусловленная окислением биомассы фитопланктона, г/м²·год;

$\Gamma_{нм}$ – удельная нагрузка фосфором, обусловленная окислением биомассы макрофитов, г/м²·год.

Устанавливается фактический трофический статус водоема, источники поступления фосфора ранжируются по массе поступающего ингредиента, определяется необходимое для достижения задаваемого уровня трофности снижение биогенной нагрузки. На основании ранжирования определяется – инактивация каких источников будет соответствовать достижению поставленной цели. С учетом наилучших доступных технологий (НДТ) выбираются методы их нейтрализации. В случае недостижения необходимого снижения поступления в водоем ингредиента повторно составляется прогноз состояния водного объекта после инактивации дополнительно выбранных источников.

Обоснование необходимости реабилитации Волчихинского водохранилища

Волчихинское водохранилище имеет статус стратегического водного объекта, из которого осуществляется постоянный забор воды для питьевого и хозяйственного водоснабжения г. Екатеринбурга. Режим эксплуатации

водохранилища отражается на его уровне, гидробиологическом и гидрохимическом режиме, а его экосистема в отдельные периоды находится в напряженном состоянии.

Волчихинское водохранилище является водоемом рыбохозяйственного значения второй категории. Большое преимущество водоему дает обильная естественная залесенность водосбора, отсутствие прямого сброса загрязненных сточных вод предприятий. Определяющее значение для формирования гидрохимического, санитарного и гидробиологического состояния водохранилища имеет р. Чусовая и притоки, вода в которых по целому ряду показателей низкого качества. Отмечается высокое содержание ионов тяжелых металлов, биогенных и органических веществ, обусловленное не только природными факторами, но и влиянием антропогенной деятельности. В последние годы качество воды Волчихинского водохранилища ухудшилось, периодически возникают чрезвычайные ситуации, связанные с массовым развитием синезеленых водорослей. Данная ситуация инициировала вопрос об улучшении гидрохимического, санитарного и гидробиологического состояния водоема. При этом главным назначением водоема остается формирование воды высокого качества.

Волчихинское водохранилище создано в 1942 г. на р. Чусовая в 3,5 км выше устья р. Ревда [2]. Водные ресурсы Волчихинского водохранилища используются для хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения Екатеринбургского промузла. Водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока р. Чусовой (четырёхлетний цикл), эксплуатируется в каскаде с расположенным выше Верхне-Макаровским водохранилищем. Морфометрические характеристики при НПУ: длина – 16 км; ширина (макс./сред.) – 5,5/2,0 км; глубина (макс./сред.) – 12,0/2,5 м; протяженность береговой линии – 55 км; площадь зеркала – 32,8 км²; объем (полн./полезн.) – 82,50/64,50 млн м³; мелководий глубиной до 2,0 м – 15,31 км².

Наполнение Волчихинского водохранилища обеспечивается попусками Верхне-Макаровского водохранилища, притоками р. Чусовой, а также притоками непосредственно в водохранилище. В периоды маловодья в водохранилище производят перекачку воды из Ревдинского водохранилища. В наиболее напряженные периоды осенней межени осуществляется переброска воды по системе р. Чусовой из Нязепетровского водохранилища Челябинской области.

Как показали исследования, Волчихинское водохранилище нуждается в реабилитационных мероприятиях, снижающих возможность его интенсивного эвтрофирования. По результатам обследования 2017 г. соотношение концентрации общего азота и общего фосфора составляло 27,7, что указывает на возможность применения «Пособия...» для разработки реабилитационных мероприятий, направленных на деэвтрофирование водоема.

Предварительная оценка современного трофического состояния водохранилища выполнена по индексу развития береговой линии и по морфоэдафическому индексу. Одним из параметров, используемых для определения склонности водоема к интенсивному эвтрофированию, является индекс развития береговой линии (SDI) [3]. Используя данные по площади Волчихинского водохранилища (32,8 км² при НПУ 302,16 м) и длине береговой линии (55,0 км), получено следующее значение индекса: $SDI = 55 / (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot 32,8}) = 2,7$. С учетом шести островов величина индекса развития береговой линии составила: $SDI = 64,95 / (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot 32,8}) = 3,2$. В совокупности по индексу развития береговой линии у Волчихинского водохранилища предрасположенность к эвтрофикации увеличивается. Это указывает на то, что в процессе водопользования должны жестко выполняться водоохраные мероприятия на частном водосборе с полным исключением поступления загрязненных стоков.

Морфоэдафический индекс (МЭИ) позволяет рассчитать концентрацию фосфора в воде, характерную для естественных процессов в водном объекте, а также определить долю фосфора, поступающего за счет всех видов антропогенной деятельности [4]. Для вычисления МЭИ используется следующая формула:

$$МЭИ = C/H, \quad (5)$$

где МЭИ – морфоэдафический индекс; С – средняя величина электропроводности воды, $\mu\text{S}/\text{cm}$ при 20 °С; Н – средняя глубина водного объекта, м.

Концентрация общего фосфора в данном случае рассчитывается по формуле:

$$\text{Lg } |P| = 0,75 + 0,27 (\pm 0,11) \cdot \text{Lg } МЭИ. \quad (6)$$

Перерасчет на концентрацию общего фосфора указывает, что в среднем фоновое содержание фосфора в воде составляет 16,39 мкг/л. Фактически, с учетом стандартного отклонения, фоновая концентрация общего фосфора в воде Волчихинского водохранилища колеблется от 10,6 до 25,3 мкг/л. Таким образом, антропогенная часть фосфорной нагрузки на Волчихинском водохранилище с учетом реальной средней концентрации общего фосфора в воде за 2017 г. в пределах 48 мкг/л составляет 30,1 мкг/л (62 %). Следовательно, при разработке методов реабилитации важное внимание необходимо уделить и водосбору.

На рис. 1 представлена схема территории проведения исследовательских работ в 2017 г. Порядок действий при проведении исследовательских работ соответствовал изложенному в «Пособии...».

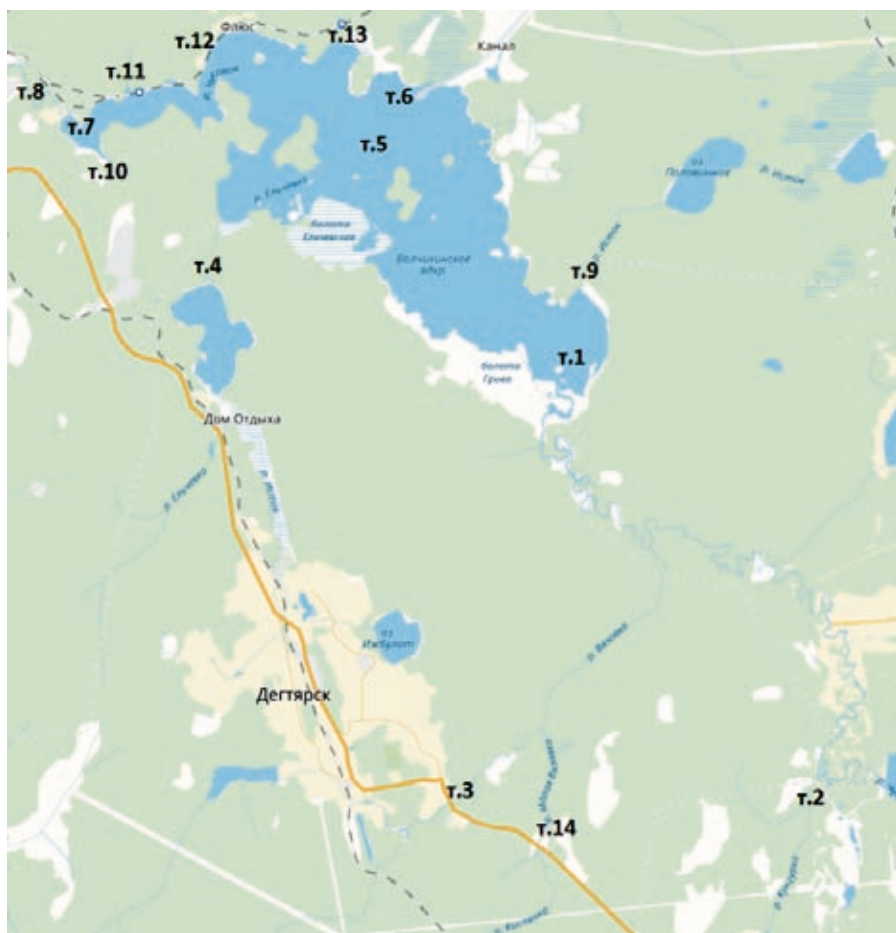


Рис. 1. Схема Волчихинского водохранилища и водосбора со станциями наблюдений и отбора проб: 1 – верховье, 2 – р. Кунгурка, 3 – р. Большая Вязовка, 4 – р. Ельчевка, 5 – центр, 6 – оголовок водозабора, 7 – приплотинный участок, 8 – нижний бьеф (р. Чусовая после водохранилища). Точки постоянных отборов на притоках: 9 – р. Исток. Эпизодические точки наблюдений: 10 – р. Каравашка, 11 – р. Волчонок, 12 – водоем у пос. Флюс, 13 – руч. Топкий, 14 – р. Малая Вязовка.

Fig. 1. The map of the Volchikha Reservoir and its catchment with observation/sampling stations: 1 – the upper course. 2 – the Kungurka River, 3 – the Bolshaya Vyazovka River, 4 – he Elchevka River, 5 – the center, 6 – the water intake portal, 7 – the near-dam site, 8 – downstream (the Chusovaya River down the reservoir). The points of continuous sampling on the tributaries: 9 – the Istok River. Occasional sampling points: 10 – the Karavashka River, 11 – the Volchonok River, 12 – a water body near Flyus, 13 – the Topkiy Stream, 14 – the Malaya Vyazovka River.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимическая характеристика Волчихинского водохранилища и его притоков

Наблюдения за состоянием водоема и притоков проводили во все сезоны года. На химический анализ было отобрано 58 проб, определяли 31 компонент. Непосредственно в полевых условиях выполнены замеры растворенного в воде кислорода, температуры, удельной электропроводности и минерализации.

На акватории Волчихинского водохранилища пробы отбирали на пяти гидрохимических станциях: верховье, центр, оголовка водозабора, приплотинный участок. Кислородный режим здесь в целом благоприятный, за исключением зимнего периода, когда в отдельных частях водохранилища отмечена острая нехватка растворенного кислорода: особенно в районе плотины – 2,38 мгО/дм³. Вода водохранилища имеет слабощелочную реакцию: в летний период рН выше (7,58–8,17 ед.), чем зимой (7,32–7,7 ед.). Наиболее низкие значения рН характерны для приплотинного участка.

Повышенная цветность наблюдалась во все периоды, кроме марта: в верховьях водохранилища – 113 град. цветности, в центральной части до 50–80, в районе плотины – снижение до 20–40 градусов цветности.

По минерализации вода Волчихинского водохранилища относится к категории «ультрапресная». С марта по октябрь происходило снижение средней минерализации воды от 158 до 130 мг/дм³. Величина ХПК варьировала от 13,2 мгО/дм³ (в марте) до 32,2 мгО/дм³ (в июле); БПК₅ – от 1,13 мгО/дм³ (в марте) до 5,22 мгО/дм³ (в июле); ПО – от 6,3 мгО/дм³ (в марте) до 9,3 мгО/дм³ (в сентябре), в октябре снизилось до 7,07 мгО/дм³. Из элементов азотной группы содержание ПДК_{рх} превышалось только нитритами, от 0,022 до 0,043 мгО/дм³ (р-н плотины, центр, водозабор, верховье).

Фосфор минеральный и фосфор общий обнаружены в пробах воды всех исследованных точек Волчихинского водохранилища во все периоды. Максимальных значений Р_{общ} достиг в июле (0,094 мгР/дм³) в районе оголовка водозабора и в центре водохранилища; фосфат-ион – в июне (0,020 мгР/дм³) в районе оголовка водозабора и плотины.

Содержание железа общего варьировало в пределах 0,07–0,58 мг/дм³ и превышало ПДК_{рх} в 1–5,8 раза, минимально – в мае, максимально – в сентябре. Высокие концентрации чаще отмечались в верховье, центре и районе водозабора. Концентрации ионов марганца (2+) варьировали от 0,056 мг/дм³ (в марте, 5,6 ПДК_{рх}) до 1,27 мг/дм³ (в июне, 127 ПДК_{рх}), чаще всего в приплотинной части. Среднемесячные концентрации иона алюминия (3+) варьировали по водохранилищу от 0,047 до 0,089 мг/дм³, наименьшие показатели измерены в марте, наибольшие – в мае. Превышение ПДК_{рх}

зафиксировано от 1,6 до 3,2 раза, чаще в районе водозабора и в верховье. Содержание меди (2+) с марта по октябрь поочередно снижалось и увеличивалось в пределах 0,004–0,036 мг/дм³. Норматив ПДК_{рх} в среднем во все периоды превышался в 15 раз, кроме июля и октября, когда отмечено снижение ПДК_{рх} до 4 раз.

Концентрация взвешенных веществ нарастала с марта по сентябрь, в среднем от 2,6 до 24,4 мг/дм³. Особенно высокие значения характерны для центра водохранилища (до 36 мг/дм³), района водозабора и верховья. Содержание нефтепродуктов резко возрастает в июле, в районе плотины (5 ПДК_{рх}), в сентябре и октябре – в центральной части водохранилища и верховьях (2–3 ПДК_{рх}). Концентрация фенолов на всех участках во все периоды имела превышения ПДК_{рх} от 2 до 11 раз. Максимальные значения – в июне и июле, приурочены к верховьям и центру водохранилища.

В водном балансе водохранилища, рассчитанном для года 50 % обеспеченности, показано, что в течение 9 месяцев расходная часть превышает приходную [2]. Именно такая картина наблюдалась в 2017 г. К концу весеннего половодья уровень водохранилища – 301,66 м не достиг НПУ (302,16 м), а до полного объема не хватало 15 млн м³. Несмотря на переброску воды из Ревдинского водохранилища, уже с июля наблюдалось увеличение площади осушенных прибрежий и обмеление водохранилища. Расчетный санитарный попуск и фильтрация через гидроузел должны составлять около 160 л/с, но в отдельные даты отбора проб воды течение в русле было очень слабым или совсем отсутствовало.

Усредненные результаты химического анализа воды нижнего бьефа Волчихинского водохранилища по целому ряду показателей превосходили по качеству (их значения были ниже) аналогичные данные верхнего бьефа: по фосфору общему – в 6 раз (0,013 и 0,079 мгР/дм³), азоту общему – в 1,1 раза (1,17 и 1,29 мг/дм³), ХПК – в 2 раза (12,3 и 24,4 мгО/дм³), концентрации общего железа – в 2 раза (0,133 и 0,266 мг/дм³), концентрации взвешенных веществ – в 4,8 раза (2,06 и 10,03 мг/дм³), по фенолам – в 2 раза (0,004 и 0,009 мг/дм³) и т. д., что свидетельствует об аккумулялирующей роли водохранилища.

Аналогичные исследования гидрохимического состояния проведены в пунктах наблюдений и отбора проб по впадающим в Волчихинское водохранилище рекам. Так, в частности, установлено, что воды р. Исток (ст. 9) загрязнены биогенными веществами: азот общий обнаружен в диапазоне 1–2 мг/дм³, аммоний-ион – в среднем 0,26 мг/дм³; нитриты – от 0,015 до 0,031 мг/дм³, нитраты – от 0,53 до 0,83 мг/дм³. Индекс ПО соответствует категории «эвтрофная» – «политрофная». В р. Кунгурка (ст. 2) норматив ПДК_{рх} по меди превышался от 7 раз в сентябре до 36 раз в июле. Концентра-

ция железа общего изменялась в пределах 0,46–0,95 мг/дм³, соответственно, ПДК_{рх} превышалось в 4,6–9,5 раз, концентрации марганца варьировали от 14 до 49 раз.

Река Ельчевка (ст. 4) на своем пути принимает приток р. Исток, где ниже их слияния создано Ельчевское водохранилище-отстойник. Согласно классификации О.П. Оксьюк, данный приток можно охарактеризовать как «гипертрофный». Сульфат-ионы превышали ПДК_{рх} в 5–6 раз, а их средняя концентрация составляла 579 мг/дм³. Содержание сухого остатка – наибольшее из всех притоков – достигало в среднем 983 мг/дм³. Река Большая Вязовка (ст. 3) – левый приток Чусовой, впадающий в 3–5 км выше Волчихинского водохранилища. Содержание общего фосфора с мая по июль росло, а к октябрю снижалось, средняя концентрация составила 0,04 мгР/дм³. Фосфор фосфатов варьировал от 0,004 до 0,025 мгР/дм³. Содержание железа общего превышало ПДК_{рх} от 0,7 до 3 раз, марганца – от 3 до 11, меди – от 3 до 24 раз.

Лабораторные исследования качества воды проведены также по рекам Малая Вязовка (ст. 14), Каравашка (ст. 10), ручьям Волчонок (ст. 11) и Топкий (ст. 13).

Гидробиологическое состояние Волчихинского водохранилища

Для полной оценки состояния водной экосистемы Волчихинского водохранилища исследованы следующие биотические компоненты: фитопланктон, хлорофилл «а», высшая водная растительность (макрофиты), зоопланктон, донные беспозвоночные организмы (макрозообентос).

Для исследования фитопланктона отобрано и проанализировано 10 проб в марте, мае и сентябре. По результатам исследований фитопланктона в 2017 г. в Волчихинском водохранилище выявлено разнообразное и высокопродуктивное сообщество, видовое разнообразие которого составило 89 видов, разновидностей и форм водорослей из 7 отделов. Численность фитопланктона изменялась от 0,13 до 112,54 млн кл/л, биомасса – от 0,062 до 35,398 мг/дм³ [5]. Минимальные значения количественных показателей чаще отмечались в приплотинной акватории, максимальные – в верховье водохранилища. Согласно классификации А.П. Оксьюк, по величине биомассы качество воды водохранилища можно оценивать от класса качества I («предельно чистая») до IV («сильно загрязненная») [6].

Анализ сезонной динамики концентрации хлорофилла *a* на каждой станции показал, что в результате развития фитопланктона оптимальная экологическая обстановка в гидроценозе складывалась в районе плотины: концентрация хлорофилла *a* только в сентябре соответствовала уровню «цветения» [7]. Основная причина экологической напряженности в водохранилище кроется в массовом развитии микроскопических водорослей

вследствие избыточного количества биогенных веществ. Большую часть периода исследований по содержанию хлорофилла водоем находился в эвтрофном, а в некоторые периоды и в высокоэвтрофном состоянии [6, 8].

При изучении высших водных растений выявлено 49 видов макрофитов из 31 рода, 19 семейств и трех отделов. Флора водоема характерна для региона и носит интразональный характер с преобладанием бореальных видов [9, 10]. Волчихинское водохранилище является водоемом умеренного зарастания. Площадь зарослей не превышает 20 %. Наиболее интенсивно зарастают верховья водохранилища и устьевой участок р. Ельчевки. Вес общей фитомассы высшей водной растительности Волчихинского водохранилища в конце вегетационного периода составил 2886,4 т.

Зоопланктон водохранилища – однообразный, представлен 16 видами: коловраток – 7, ветвистоусых рачков – 5, веслоногих рачков – 4 вида. Согласно индексам сапробности, рассчитанным по индикаторным видам, вода в верховье – «грязная», в центре – «умеренно загрязненная», в районе плотины – «слабо загрязненная» [11].

В акватории водоема зарегистрировано 14 таксонов макрозообентоса в ранге вида и выше. Реофильные виды малочисленны и встречаются лишь в литоральной зоне, особенно в поясе макрофитов. Биомасса бентоса в среднем за сезон по акватории составила 3,814 г/м² при численности 587 экз/м². В районе плотины отмечаются самые максимальные показатели для водоема, численность и биомасса достигали 1960 экз/м² и 10,36 г/м². По шкале «оценка кормности водоемов» пищевая ценность Волчихинского водохранилища соответствовала «средней кормности» [12]. Приплотинная акватория имеет высокий потенциал рыбопродукции и пригодна не только для любительского, но и для промыслового лова. Результаты обследования макрозообентоса выявили, что экосистема Волчихинского водохранилища находится в умеренно угнетенном состоянии.

Оценка состояния Волчихинского водохранилища по уровню антропогенной нагрузки

Для оценки динамики самоочищения водного объекта и притоков использовали метод «условной водоемкости» – показатель антропогенной нагрузки (ПАН) [13].

Состояние водохранилища и притоков по средним значениям общего показателя антропогенной нагрузки (ПАН) с экологических позиций можно оценить как водные объекты I–II класса качества, характеризующиеся устойчивым стабильным состоянием и высокой скоростью протекания процессов самоочищения (табл. 1).

В водохранилище необходимо обратить внимание на увеличение концентрации ионов марганца в летний период, а также на содержание взве-

шенных веществ, т. к. именно ПАН этих показателей вносит основной вклад в величину общего ПАН. По притокам – на р. Ельчевку с высоким содержанием, а также на р. Исток, приносящую большое количество органических веществ с болотистой водосборной территории.

Таблица 1. Общие значения показателей антропогенной нагрузки и классы качества воды по результатам исследований 2017 г.

Table 1. General values of anthropogenic load and water quality classes according to the 2017 research outcomes.

Створ	ΣПАН по месяцам, усл. м ³ /м ³						Класс и среднее значение ΣПАН, усл. м ³ /м ³
	март	май	июнь	июль	сентябрь	октябрь	
р. Кунгурка	ВВ, Fe, Mn 6,23	ХПК, Fe, Mn 3,40	ХПК, ВВ, Fe, Mn 4,51	ХПК, Fe, Mn 2,12	ХПК, Fe, Mn 1,96	ХПК, ВВ, Fe, Mn 2,13	3,4 (I)
р. Вязовка	–	ХПК 0,6	ХПК, ВВ, Mn 0,93	ХПК 1,1	ХПК, Норг. 0,32	0	0,59 (I)
р. Ельчовка	Норг., СС, Zn, Mn 11,43	СС, Zn 6,75	ХПК, СС 6,85	ХПК, СС 6,72	Норг, СС 6,72	СС 7,2	7,6 (II)
р. Исток	–	ХПК, Fe 3,97	ХПК, ВВ, Fe 9,42	ХПК, Норг., Fe, Mn 7,98	ХПК, Fe 4,63	ХПК, Fe 4,4	6,1 (II)
Верховье Волчихинского вхр	–	ХПК, ВВ, Fe, Mn 6,39	ХПК, ВВ, Mn 4,19	ХПК, ВВ, Mn 5,54	ХПК, ВВ, Fe, Mn 7,67	ХПК, Mn 2,3	4,35 (II)
Центр Волчихинского вдхр	ХПК, Mn 0,47	ХПК, ВВ, Fe, Mn 5,31	ХПК, ВВ, Mn 5,76	ХПК, Норг., ВВ, Mn 5,54	ХПК, ВВ, Fe, Mn 12,1	ХПК, ВВ, Mn 2,17	5,2 (II)
Район водозабора ЕМУП	ХПК, Mn 2,7	ХПК, ВВ, Fe, Mn 6,42	ХПК, ВВ, Mn 6,46	ХПК, Норг., ВВ, Mn 7,76	ХПК, ВВ, Fe, Mn 9,89	ХПК, ВВ, Mn 2,72	6,0 (II)
Плотины Волчихинского вдхр	ХПК 0,26	ХПК, Mn 9,0	ХПК, ВВ, Mn 12,6	ХПК, Норг., Mn 2,72	ХПК, ВВ, Fe, Mn 6,73	ХПК, Mn 3,3	5,8 (II)
Район нижнего бьефа Волчихинского вдхр	ХПК 0,05	ХПК, Mn 0,46	ХПК, ВВ, Mn 2,6	ХПК, Mn 0,69	ХПК, Mn 0,15	ХПК 0,11	0,68 (I)

Оценка трофического статуса Волчихинского водохранилища

Для выявления трофического состояния водоема на основе ранее проведенных работ [14] использовали вероятностную оценку трофического статуса [15], включающую четыре категории: среднюю за вегетационный период величину прозрачности воды по диску Секки; среднюю концентрацию общего фосфора; среднюю и максимальную концентрации хлорофилла *a* за этот же период (табл. 2).

Таблица 2. Оценка трофического состояния Волчихинского водохранилища по вероятностной классификации в 2017 г.

Table 2. Assessment of the Volchikha Reservoir trophic status according to the 2017 probability classification

Вероятность трофического состояния, % / показатели	Средняя прозрачность, 1,25 м	Средний фосфор общий, 0,048 мгР/м ³	Средний Хл <i>a</i> , 31 мг/м ³	Максимальный Хл <i>a</i> , 80 мг/м
Ультраолиготрофное	0	0	0	0
Олиготрофное	0	2	0	0
Мезотрофное	5	40	3	3
Эвтрофное	35	55	30	48
Гипертрофное	61	7	65	48

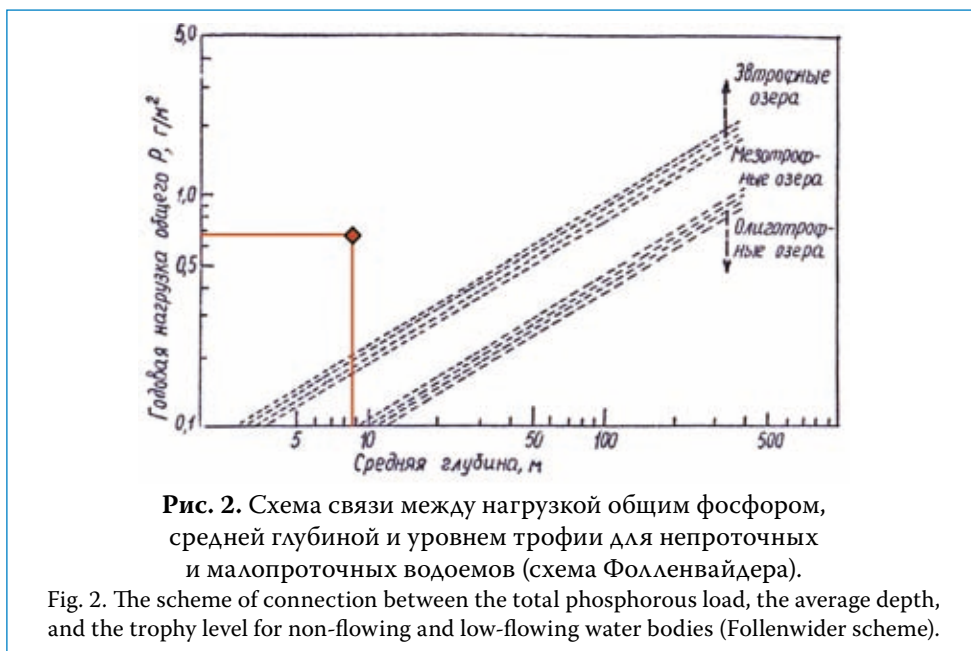
Результаты оценки трофического статуса в значительной мере указывают на эвтрофно-гипертрофное состояние Волчихинского водохранилища в год 50 % водообеспеченности. Следовательно, с уверенностью можно предположить, что в маловодном году проявится тенденция по смещению трофического статуса к гипертрофному типу, а в многоводный – произойдет небольшое смещение в зону мезотрофии.

Комплексная оценка состояния Волчихинского водохранилища продемонстрировала, что оно является эвтрофным водоемом с вероятными отклонениями в сторону снижения или увеличения трофического статуса в годы разной водности. Расчеты продукционных процессов согласно модели В.В. Бульона [16] указывают на их лимитирование в водохранилище содержанием общего фосфора. Таким образом, согласно «Пособию...», для водохранилища следует определить удельную фосфорную нагрузку и по ее величинам установить трофический статус водоема.

Определение удельной фосфорной нагрузки

Выбор оптимальных реабилитационных методов для малопроточного водоема определяется на основе данных о суммарном потоке фосфора в

водное тело водоема и его средней глубине с применением схемы Фолленвайдера [17] (рис. 2). Эта схема может быть использована для определения величины удельной нагрузки для достижения заданного трофического уровня и выбора метода реабилитации проблемного водоема.



Удельный поток фосфора (общего) в водные массы водоема $\Gamma_{\text{сум}}$ (г/м² год) определяется в соответствии с п. 5 «Порядка действий при выборе метода реабилитации водоемов...», изложенного в «Пособии ...». Поступление фосфора за год определяется как взвешенная величина по расходам воды и по концентрациям фосфора в момент измерения расходов воды.

Определение удельной нагрузки на Волчихинское водохранилище общим фосфором, поступающим из внешних источников

В приходную часть баланса включены: рабочий попуск Верхне-Макаровского водохранилища; холостой сброс Верхне-Макаровского водохранилища; переброска из Ревдинского водохранилища; поступление по р. Ельчевке (в этот же объем включены сбросы г. Дегтярска); поступление по р. Исток; поступление по рекам Кунгурке и Вязовке включены в приток в водохранилище с частной водосборной площади. Для расчета годового стока использовали собственные данные, полученные в течение года, для тех месяцев, когда измерений не было, экстраполирую. Всего за год поступило фосфора общего 28 662,5 кг (28,6 т).

Расходная часть состояла: из забора воды МУП «Водоканал г. Екатеринбург»; попуска воды через старый канал в р. Решетку; санитарного попуска и фильтрации через гидроузел. Из водоема за год было удалено общего фосфора 35 627,003 кг (35,6 т). Таким образом, забор воды из водохранилища и санитарный попуск выносят за год фосфора больше, чем его поступает с русловым стоком.

Поступление фосфора с поверхностным стоком с водосборной площади

Если часть территории водосбора не дренируется втекающими в водоем водотоками, проводится определение поступления с поверхностным стоком. Водосбор Волчихинского водохранилища ассиметричен и дренируется в отдельных частях по-разному, весь нерусловый сток диффузно по рельефу скатывается в водоем. Площадь частного водосбора Волчихинского водохранилища была изучена по схемам и картографическим материалам. За вычетом дренируемых реками площадей остались участки: 1 – на правобережье водохранилища – от района плотины до водозаборного канала МУП и к бассейну р. Исток; 2 – участок, примыкающий к реке Чусовой ниже Верхне-Макаровского водохранилища, ограниченный с севера оз. Чусовское, с запада – водосбором р. Исток; 3 – участок между водосборами рек Ельчевка и Вязовка, ограниченный с севера левым берегом водохранилища. Площади указанных участков измеряли с помощью космоснимков в программе Google Планета Земля. Размеры вычисленных площадей следующие: первый – 38,46 км², второй – 35,3 км², третий – 34,42 км².

Для расчета поступления общего фосфора с диффузным стоком выбран упрощенный метод, основанный на усредненных величинах, необходимых для расчета. Формула расчета представлена ниже [18]:

$$\Pi_{\text{терр}} = C \cdot k_4 \cdot r_5 \cdot F_{\text{и}} \quad (6)$$

где C – средний вынос фосфора в зависимости от вида и состояния водосборной площади [18];

k_4 – коэффициент уклона территорий, определение которого производят согласно [19];

k_5 – коэффициент удаленности рассматриваемой территории, определяется по формуле (11).

Для водосбора Волчихинского водохранилища использованы следующие переменные: $C = 0,025$ кг/га год; $k_4 = 0,75$ для крутосклонного правобережья; $k_4 = 0,54$ для равнинного и заболоченного правобережья р. Чусовой.

$$k_5 = 3,28 \cdot e^{-Bx}, \text{ где } B = 1,57 \text{ км}^{-1}, \quad (7)$$

где x – расстояние (км) от центра рассматриваемой площадки водосбора до ближайшего уреза воды. Для выбранных площадок такие расстояния

были следующие: 1 – 1,5 км; 2 и 3 – по 5,0 км. Таким образом, k_5 равны для площадки 1 – 0,0013, для площадок 2 и 3 – 0,316.

Согласно выполненным расчетам суммарное поступление общего фосфора в Волчихинское водохранилище за счет диффузного стока с территории, не дренируемой реками, составило 37,9 кгР/год.

Определение удельной нагрузки общим фосфором, поступающим из внутренних источников

Внутреннюю фосфорную нагрузку ($\Pi_{\text{внутр}}$) рассчитывали по уравнению (8):

$$\Pi_{\text{внешн}} = \Pi_{\text{ав}} + \Pi_{\text{амо}} + \Pi_{\text{фпл}} + \Pi_{\text{н.м.}} + \Pi_{\text{ам}} \quad (8)$$

где $\Pi_{\text{ав}}$ – поток фосфора из плавающей и затопленной древесины, г/м²·год;
 $\Pi_{\text{амо}}$ – поток фосфора из донных отложений, обусловленный окислением стойкого мертвого органического вещества на дне, г/м²·год;
 $\Pi_{\text{фпл}}$ – поток фосфора, обусловленный окислением биомассы фитопланктона, г/м²·год;
 $\Pi_{\text{н.м.}}$ – поток фосфора, обусловленный окислением биомассы макрофитов, г/м²·год;
 $\Pi_{\text{ам}}$ – поток фосфора из донных отложений в макрофиты, г/м²·год.

Согласно указаниям и формулам «Пособия...», поток фосфора из затопленной и плавающей древесины составит 0,002001 г/м²·год или при пересчете на все Волчихинское водохранилище – 65,6 кг/год.

Поток фосфора из донных отложений обусловлен окислением стойкого мертвого органического вещества и рассчитывается по формуле (9), либо на основании данных лабораторного эксперимента.

$$\Pi_{\text{амо}} = \frac{(\sum_1^i [Aqt\delta(T_1 - T_2) \frac{qn}{Kok} \sqrt{Kit \cdot B(t^0)_A \cdot \text{ПОД} \cdot \text{АЖ} \cdot \text{КА}}]_i)}{F}, \quad (9)$$

где i – число отрезков времени, на которые делится год (выбирается, исходя из удобства суммирования);

T_1 и T_2 – моменты начала и окончания каждого конкретного отрезка времени, сут;

$Aqt\delta$ – усредненное по времени от T_1 до T_2 и по акватории содержание фосфора в сухом органическом веществе верхнего 5 см слоя донных отложений, гР/г сухого вещества;

qn – усредненная по времени от T_1 до T_2 и по акватории концентрация кислорода в придонном слое воды, гО₂/м³;

Kit – усредненная по времени от T_1 до T_2 и по акватории константы окисления мертвого стойкого органического вещества для верхнего 5 см слоя донных отложений, равен $4,2 \cdot 10^{-3}$ м³/гО₂ сут;

$B(t^0)_D$ – усредненная по времени от T_1 до T_2 и по акватории температурная поправка для донных отложений, определяется как функция усредненной по времени от T_1 до T_2 и по акватории температуры придонного слоя;

ПО_д – усредненная по времени от T_1 до T_2 и по акватории перманганатная окисляемость верхнего 5 см слоя донных отложений, гО₂/м³;

Аж – усредненная по времени от T_1 до T_2 и по акватории объемная доля осадков фазы в верхнем 5 см слое донных отложений;

К_д – коэффициент диффузии кислорода в донных отложениях, равный $4,72 \cdot 10^{-5}$ м²/сут;

К_{ок} – кислородный коэффициент, показывающий сколько весовых частей кислорода требуется на окисление одной весовой части сухого органического вещества, равный 1,47 гО₂/г орг. вещества.

F – площадь донных отложений, м².

Для расчета поступления общего фосфора из донных отложений в воду Волчихинского водохранилища использованы результаты лабораторных экспериментов с донными отложениями из разных участков водохранилища: приплотинного, центрального и верховья [5]. Наибольшую вероятность вторичного загрязнения общим фосфором показали донные отложения приплотинного плеса, где доля выхода вещества в воду составила – + 11,35 мгР/м²·мес., второе место по интенсивности заняли донные отложения верховий – +1,66 мгР/м²·мес. Эффект самоочищения принадлежал донным отложениям центрального плеса, где теоретически происходила седиментация ингредиента в интервале – 2,37 мгР/м²·мес. В действительности центральный плес – широкий, мелководный и часто подвергается ветро-волновому перемешиванию, в результате чего происходит взмучивание донных отложений и подъем детрита в водную толщу, где он легко минерализуется в присутствии кислорода, т. е. общий фосфор переходит в минеральную форму и потребляется фитопланктоном. Доказательством служит «цветение» воды на протяжении почти всего вегетационного периода в центральном плесе, при котором биомасса и численность водорослей достигали наибольших значений. Концентрация хлорофилла соответствовала эвтрофному и гипертрофному статусу водоема.

Суммарную величину гипотетически выделяемого общего фосфора в воду водохранилища рассчитывали в соответствии с площадями акваторий перечисленных плесов. В отсутствии данных по выделению общего фосфора из донных отложений в зимних условиях для всех сезонов года использованы экспериментально полученные значения для лета. В результате расчетов получено количество общего фосфора, способного суммарно выделиться в воду водохранилища за год, которое составило 1,47 т, а нагрузка на единицу площади водоема – 0,045 гР/м²·год.

Удельный поток фосфора из окисленного органического вещества фитопланктона ($\text{г}/\text{м}^2$) рассчитывали по формуле (10):

$$\Pi_{\text{ФПЛ}} = \sum_1^i [0,028 \cdot B_{\text{ср}} \cdot a_{\text{ф}}(T_2 - T_1)]_i \quad (10)$$

где $B_{\text{ср}}$ – усредненная по времени от T_1 до T_2 и по объему водоема сырая биомасса фитопланктона, $\text{г}/\text{м}^3$;

$a_{\text{ф}}$ – доля фосфора в биомассе фитопланктона: усредненное значение равно $0,0085 \text{ гР}/\text{г}$ биомассы ($\sim 1 \%$);

$T_2 - T_1$ – период, принятый в 150 дней сезона летней вегетации.

Усредненная биомасса фитопланктона Волчихинского водохранилища за летний период – $17,73 \text{ г}/\text{м}^3$. Согласно расчетам, поток фосфора из фитопланктона составит $0,201955 \text{ г}/\text{м}^2$, а с учетом площади водохранилища валовое поступление общего фосфора равно $20761,121 \text{ кг}/\text{год}$.

Поток фосфора из донных отложений при разложении и окислении органического вещества макрофитного происхождения рассчитывается по следующей формуле ($\Pi_{\text{нм}}$, $\text{г Р}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$):

$$\Pi_{\text{нм}} = P_m \cdot A_{\text{ввр}} \cdot \text{ОВ}_{\text{ввр}}, \quad (11)$$

где P_m – усредненная по акватории годовая продукция макрофитов, растущей на единичной площадке дна (сухой вес), $\text{г}/\text{м}^2$;

$A_{\text{ввр}}$ – доля фосфора в биомассе макрофитов накануне их отмирания (усредненное значение), $\text{гР}/\text{г}$ биомассы;

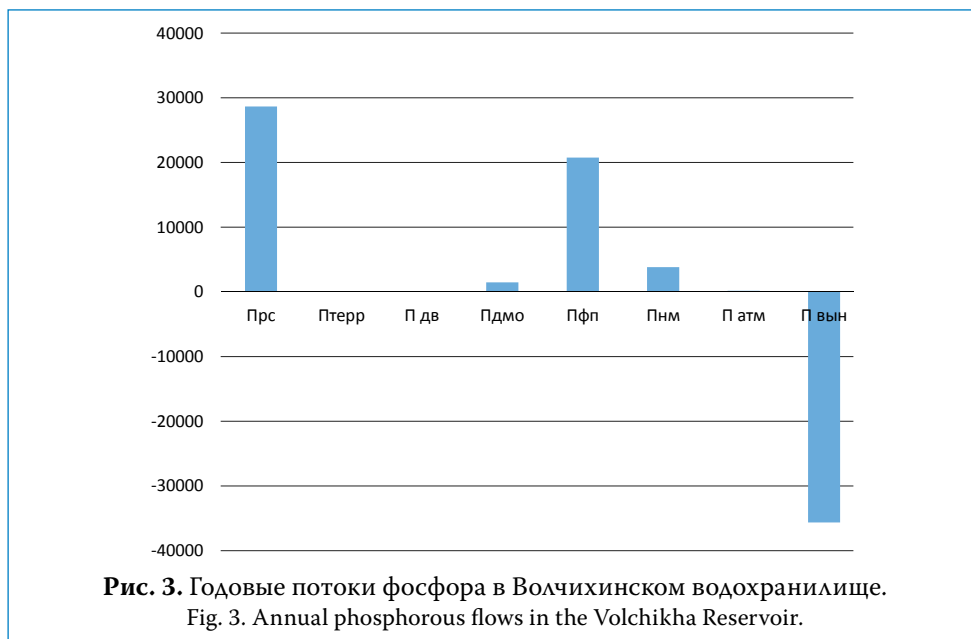
$\text{ОВ}_{\text{ввр}}$ – доля нестойкого органического вещества в биомассе макрофитов накануне их отмирания (усредненное значение), равная $0,6$.

Натурные исследования высшей водной растительности Волчихинского водохранилища показали, что годовая продукция погруженных макрофитов составит $440 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot 6\,560\,000 \text{ м}^2 = 2\,886\,400 \text{ кг}$. С учетом площади водохранилища годовая продукция погруженных растений – $2\,886\,400 \text{ кг} / 32\,800\,000 \text{ м}^2 = 0,088 \text{ кг}/\text{м}^2$. Расчет годового поступления фосфора в Волчихинское водохранилище из погруженной растительности составит: $88 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot 2,21 \text{ мгР}/\text{г} \cdot 0,6 = 116,688 \text{ мгР}/\text{м}^2$ ($0,116 \text{ гР}/\text{м}^2$). Следовательно, в пересчете на площадь водохранилища фосфорная нагрузка от макрофитов составит $3827,4 \text{ кг}$ или $3,8 \text{ т}$.

Графическое изображение потоков фосфора в Волчихинском водохранилище представлено на рис. 3.

Таким образом, из водоема выносятся с забором воды и сбросом через плотину общего фосфора больше, чем поступает с речным стоком. Самыми значимыми поставщиками общего фосфора в воду Волчихинского водохранилища являются потоки от фитопланктона и высшей водной растительности. Донные отложения занимают третье место. Генезис общего фосфора

Волчихинского водохранилища на 79 % обязан жизнедеятельности фито-планктона, 15 % обусловлено жизнедеятельностью макрофитов.



Определение трофического уровня Волчихинского водохранилища и класса качества воды

Волчихинское водохранилище является проточным водоемом. Годовой сток по р. Чусовой в сумме с водозабором воды всеми водопользователями составляет 225,43 млн м³/год. Объем воды в водохранилище равен 82,5 млн м³, период водообмена 135 дней, коэффициент водообмена 0,37.

«Пособие по выбору приоритетных действий...» рекомендует определять трофический уровень Волчихинского водохранилища по схеме Фолленвайдера [17] для проточных водоемов (рис. 4). Баланс поступления общего фосфора в водоем равен 19 341,55 кг/год, а удельный поток общего фосфора на единицу площади водохранилища составит: $19\,341\,550 \text{ гР/год} / 32\,800\,000 \text{ м}^2 = 0,589 \text{ гР/год}$.

Таким образом, по полученным данным определено, что Волчихинское водохранилище по фосфорной нагрузке принадлежит к слабо эвтрофным водоемам. Однако по усредненной концентрации хлорофилла *a* в летний период (31,6 мкг/дм³) водохранилище является типичным эвтрофным водоемом. По усредненной биомассе фитопланктона за летний период (17,73 мг/дм³) водохранилище относится к политрофным водоемам [6]. Противоречивость данных свидетельствует о том, что не все потоки общего фосфора были учтены.



По коэффициенту относительной прозрачности Волчихинское водохранилище принадлежит к переходному типу: от оптически мелководных водоемов фитопланктонного типа до оптически среднеглубоких фитопланктонно-макрофитного типа: $1,45 (0,7) \text{ м} / 2,5 \text{ м} = 0,58 (0,28)$ [1].

Качество воды по некоторым химическим ингредиентам в Волчихинском водохранилище и притоках вызывает беспокойство. Причиной высоких концентраций ионов некоторых металлов в воде являются природные факторы в виде высокой рудогенности в бассейне водосбора, а также антропогенная деятельность (добыча полезных ископаемых и другие виды промышленного производства).

ВЫБОР КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ВОЛЧИХИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Анализ полученных в ходе исследования данных показывает, что наиболее важной проблемой водохранилища является интенсивное развитие водорослей, особенно – в маловодные и жаркие годы. Увеличение площади

литорали (мелководий) при снижении уровня облегчает снабжение водорослей биогенными веществами, что приводит к массовому развитию последних. Перевод водоема из эвтрофного статуса в мезотрофный за счет повышения средней глубины невозможен. Для увеличения проточности нет водных ресурсов. Главное внимание следует обратить на снижение потоков фосфора, поступающего с русловым стоком и из внутренних источников. По графику Фолленвайдера можно определить, до каких пределов следует снизить фосфорную нагрузку для перевода водоема в мезотрофный статус. Для Волчихинского водохранилища такой величиной может стать удельная нагрузка $0,4 \text{ гР/м}^2 \cdot \text{год}$.

Снизить удельную фосфорную нагрузку на водохранилище можно в результате реализации комплекса мероприятий. Непосредственно в водоеме необходимо:

В верховьях водохранилища создать предводохранилище из водовоздушной растительности (рогоз, тростник) для поглощения биогенов, поступающих со стоком р. Чусовой в вегетационный период. Количество поступаемого фосфора снизится на $0,41 \text{ гР/м}^2 \cdot \text{год}$ (с учетом поглощения 80 % поступаемого в вегетационный период фосфора).

Сформировать ботанические площадки для перехвата поступления биогенных веществ, ионов тяжелых металлов в устьевых участках рек Кунгурка, Вязовка, Ельчевка, Исток.

Реализация вышеназванных мероприятий позволит снизить поступление фосфора в водохранилище в вегетационный период за счет поглощения водно-воздушной растительностью (согласно экспериментальным данным) на 80 %, что в сумме составит 13,7 т. При этом общая фосфорная нагрузка на водохранилище уменьшится на $0,41 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$.

Комплекс мероприятий необходимо осуществить и на водосборе Волчихинского водохранилища:

– В зонах санитарной охраны организовать более строгий контроль за соблюдением правил санитарной охраны: установка контейнеров для мусора (и организация вывоза мусора), туалетных кабин в местах пребывания отдыхающих.

– Организация очистки (или вывоза) сточных вод в пос. Флюс и на базах отдыха на побережье.

– Обустройство предводохранилища из водовоздушной растительности (рогоз, тростник) для поглощения биогенов в верховье Верхне-Макаровского водохранилища.

– Снизить поступление фосфора со сточными водами предприятий и ЖКХ городов Полевской и Дегтярск.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация «Пособия по выбору приоритетных действий, направленных на экологическую реабилитацию водоемов» показала сложный и многоступенчатый путь расчета удельной фосфорной нагрузки и определения трофического статуса исследуемого водоема. В ходе проведенного исследования выявлены основные источники поступления фосфора в водоем – русловой принос и развитие фитопланктона. Задача реабилитационных мероприятий – снижение поступления общего фосфора от наибольшего «загрязнителя». Из предложенных «Пособием...» мероприятий по снижению фосфорной нагрузки выбран метод предотвращения внешнего загрязнения фосфором путем создания предводохранилища с высшей водной растительностью в верховье для перехвата биогенных веществ и ионов тяжелых металлов. Аналогичные биоплато должны быть построены и в устьевых участках рек Кунгурка, Вязовка, Ельчевка и Исток.

Расчеты показали, что в результате создания предводохранилища и ботплощадок на притоках при их правильной эксплуатации за вегетационный период поступление фосфора с русловым притоком снизится на 80 %, а годовая фосфорная нагрузка на Волчихинское водохранилище может уменьшиться до 0,18 гР/м² в год. Трофический статус водоема снизится до олиготрофно-мезотрофного уровня (на 69 %), средняя биомасса фитопланктона составит 5,27 г/м³, а ее максимальные значения будут достигать 10,85 г/м³.

Дополнительно в зоне санитарной охраны водоема следует установить строгий контроль за соблюдением правил санитарной охраны: провести установку соответствующими организациями контейнеров для мусора (а также организовать вывоз мусора), установку туалетных кабин в местах пребывания отдыхающих; организовать очистку (или вывоз) сточных вод в пос. Флюс и базах отдыха на побережье. За пределами частного водосбора необходимо создать аналогичное предводохранилище в верховье Верхне-Макаровского водохранилища и снизить поступление фосфора со сточными водами предприятий и ЖКХ Полевского и Дегтярска.

Использование положений разработанного специалистами РосНИИВХ «Пособия...» впервые позволяет обоснованно определить направленность, объекты и объем реабилитационных воздействий, спрогнозировать состояние водоема в результате реализации каждого из них и выбрать наиболее эффективные для достижения поставленных водопользователем параметров состояния водохранилища.

Апробация работоспособности «Пособия...» показала, что пользоваться этой методикой могут специалисты с соответствующим естественно-научным образованием (экология, биология, геология, химия) и специализацией на водохозяйственном направлении. В ходе апробации «Пособия...»

в конкретной ситуации выявилась сложность и многоступенчатость расчета удельной фосфорной нагрузки и ее дифференциации. Одним из направлений дальнейших исследований является разработка упрощенной, но не менее точной методики определения данной характеристики. Необходимо также обосновать и исключить из расчетов фосфорной нагрузки на водоем поток фосфора из донных отложений в макрофиты. Одним из важнейших направлений дальнейших исследований является упрощение определения внутренней нагрузки на водоем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Попов А.Н.* Выбор приоритетных действий, направленных на реабилитацию непроточных и малопроточных озер // Водное хозяйство России. 2017. № 5. С. 68–89.
2. Разработка проекта правил использования водохранилищ водохозяйственной системы Екатеринбургского промузла (Верхне-Макаровское и Волчихинское на реке Чусовая, Верх-Исетское, Исетское на реке Исеть, Ново-Мариинское и Ревдинское на реке Ревда) / РосНИИВХ. Екатеринбург, 2013. 158 с.
3. *Фальковская А.Н., Каминский В.С., Пааль А.А., Грибовская И.Ф.* Основы прогнозирования качества поверхностных вод. М.: Наука, 1982. 182 с.
4. *Григорьева И.А., Ланцова И.В., Тулякова Г.В.* Геоэкология Иваньковского водохранилища и его водосбора. Конаково: ИД «Булат», 2000. 248 с.
5. Отчет о НИР «Разработка инструктивно-методической базы по реабилитации водных объектов. 2.2. Разработать мероприятия по реабилитации водохранилищ, находящихся в ведении Росводресурсов, и их эколого-экономические показатели (промежуточный) Программа реабилитации водохранилищ (включая эколого-экономические показатели мероприятий), находящихся в ведении Росводресурсов, на примере водоемов Свердловско-Челябинской водохозяйственной системы: Волчихинское водохранилище» / РосНИИВХ. Екатеринбург, 2017. 238 с.
6. *Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский А.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. Вып. 4. С. 62–76.
7. *Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я.* Цветение воды и эвтрофирование. Киев: Наук. думка, 1978. 232 с.
8. *Бульон В.В.* Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
9. *Папченко В.Г.* Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 214 с.
10. *Папченко В.Г.* Различные подходы к классификации растений водоемов и водотоков // Мат-лы VI Всерос. конф. по водным макрофитам «Гидрботаника-2005». Рыбинск: ОАО «Рыбинский Дом печати», 2006. С. 16–24.
11. *Дзюбан И.А., Кузнецова С.П.* О гидробиологическом контроле качества вод по зоопланктону // Научные основы контроля качества вод по гидробиологическим показателям: тр. Всесоюзной конф. Москва, 1978. Л., 1978. С. 160–166.

12. Пидгайко М.А., Александров Б.М., Иоффе Ц.И., Максимова Л.П., Петров В.В., Саватеева Е.Б., Салазкин А.А. Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов Северо-Запада СССР // Известия ГосНИОРХ. 1968. Т. 67. С. 205–228.
13. ГОСТ Р 57075–2016 Методология и критерии идентификации наилучших доступных технологий водохозяйственной деятельности. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.
14. Мухутдинов В.Ф., Павлюк Т.Е. Прогноз гидробиологического состояния Юмагузинского водохранилища // Наука и практика водного хозяйства. Екатеринбург: ФГУП РосНИИВХ, 2014. С. 384–398.
15. Хендесен-Соллерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидромеоиздат, 1990. 280 с.
16. Бульон В.В. Влияние ключевых биотических и абиотических факторов на рыбопродуктивность водоемов. Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды // Мат-лы II Межд. науч. конф. 22-26 сент. 2003. Минск: БГУ, 2003. С. 15–18.
17. Vollenweider R.A. Das Nährstoffbelastungsconzept als Grundlage für denutrophierungsprozess stehender Gewässer und Talsperren // Zeitschrift für Wasser und Abwasser Forschung. 1979. Bd. 12. No. 2. P. 46–56.
18. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. Т. 2. ВИНТИ. М., 1975. 200 с.
19. Рекомендации. Расчет поступления биогенных элементов в водоемы для прогноза их эвтрофирования и выбора водоохраных мероприятий. М.: Росагропромиздат, 1989. 48 с.

Для цитирования: А.Н. Попов, Т.Е. Павлюк, В.Ф. Мухутдинов, Е.В. Загайнова, А.С. Польшгалов, В.В. Сандалова, Е.А. Бутакова, О.С. Ушакова. Исследование состояния водоема для выбора приоритетных действий по экологической реабилитации (на примере Волчихинского водохранилища) // Водное хозяйство России. 2019. № 4. С. 170–195.

Сведения об авторах:

Попов Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: pan1944@rambler.ru

Павлюк Тимур Евгеньевич, канд. биол. наук, заведующий сектором гидробиологических исследований, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: T.Pavluk@rambler.ru

Мухутдинов Валерий Фаметдинович, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: muhutdinov1@rambler.ru

Ушакова Ольга Сергеевна, научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: darilindan@gmail.com

Бутакова Елена Анатольевна, младший научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: butakova77@mail.ru

Загайнова Екатерина Владимировна, инженер-исследователь, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23.

Сандалова Валентина Владимировна, научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: imanova92@mail.ru

Полыгалов Андрей Сергеевич, младший научный сотрудник ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23

INVESTIGATION OF A WATER BODY STATUS TO SELECT PRIORITY ACTIONS ON ECOLOGICAL REHABILITATION (THE VOLCHIKHA RESERVOIR AS A STUDY CASE)

Aleksander N. Popov, Timur Y. Pavluk, Valeriy F. Mukhutdinov, Yekaterina V. Zagaynova, Andrey S. Polygalov, Valentina V. Sandalova, Yelena A. Butakova, Olga S. Ushakova

E-mail: pan1944@rambler.ru

Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), Ekaterinburg, Russia

Abstract: The article presents the outcomes of an applied research within frameworks of testing of «Manual on the choice of priority actions aimed at the water bodies' ecological rehabilitation» developed in RosNIIVKh. The research has been carried out on the Volchikha reservoir located in Sverdlovsk Oblast. In accordance with the developed methods, we have studied the water body hydro/chemical regime formation with taking into account all affecting factors and assessed all the factors that affected the reservoir hydro/biological and hydro/chemical regimes' formation. We have determined the pollutants' and biogenic substances flows, and assessed the water body trophic status against the hydro/biological indicators and identified the anthropogenic pollution sources. Considerable quantities of heavy metals and biogenic metals have been found in the water body waters, due to the anthropogenic activities' impact. The authors have identified a method for the Volchikha Reservoir ecological rehabilitation based on the outcomes of the conducted researches.

Key words: ecological rehabilitation, eutrophication, hydro/chemical characteristic, hydro/biological status, biogenic load, trophic status, anthropogenic pollution, water quality, Volchikha Reservoir.

About the authors:

Aleksandr N. Popov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of RosNIIVKh Department, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; e-mail: pan1944@rambler.ru

Timur A. Pavluk, Candidate of Biolog, Head of RosNIIVKh Sector, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; e-mail: T.Pavluk@rambler.ru

Valeriy F. Mukhutdinov, Candidate of Biology, Leading Researcher, RosNIIVKh, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; e-mail: muhutdinov1@rambler.ru

Olga S. Ushakova, Researcher, RosNIIVKh, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; e-mail: darilindan@gmail.com

Yelena A. Butakova, Junior Researcher RosNIIVKh, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; butakova77@mail.ru

Yekaterina V. Zagaynova, Researcher/Engineer, RosNIIVKh, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia

Valentina V. Sandalova, Researcher, RosNIIVKh, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; e-mail: imanova 92@mail.ru

Andrey S. Polygalov, Junior Researcher, RosNIIVKh, ul. Mira 23, Ekaterinburg, 620049, Russia

For citation: Popov A.N., Pavluk T.Y., Mukhutdinov V.F., Ushakova O.S., Butakova Y.A., Zagaynova Y.V., Sandalova V.V., Polygalov A.S. Investigation of a Water Body Status to Select Priority Actions on Ecological Rehabilitation (the Volchikha Reservoir as a Study Case) // *Water Sector of Russia*. 2019 No.4. P. 170-195.

REFERENCES

1. Popov A.N. Vybor prioritnykh deystviy, napravlennykh na reabilitatsiyu ne- protochnykh i maloprotochnykh ozer [Choice of priority actions aimed at rehabilitation of non-flow and low-flow lakes] // *Water Sector of Russia*. 2017. No. 5. Pp. 68–89.
2. Razrabotka proyekta pravil ispolzovaniya vodokhranilishch vodokhozyaystvennoy sistemy Ekaterinburgskogo promuzla (Verkhne-Makarovskoye i Volchikhinskoye na reke Cusovaya, Verkh-Isetskoye, Isetskoye na reke Iset, Novo-Mariinskoye i Revdinskoye na reke Revda) [Development of a draft rules for the use of the Ekaterinburg industrial hub water system reservoirs (Verkhne-Makarovo and Volchikha at the Chusovaya River, Verkh-Iset and Iset at the Iset River, Novo-Marrino and Revda at the Revda River)] / RosNIIVKh, Ekaterinburg, 2013. 158 p.
3. Falkovskaya L.N., Kaminskiy V.S., Paal L.L., Gribovskaya I.F. Osnovy prognozirovaniya kachestva poverkhnostnykh vod [Essential principles of the surface water quality forecasting] M.: Nauka, 1982. 182 p.
4. Grigoryeva I.L., Lantsova I.V., Tulyakova G.V. Geoekologiya Ivankovskogo vodokhranilishcha i yego vodosbora [Geo/ecology of the Ivankovo Reservoir and its catchment]. Konakovo: ID "Bulat", 2000. 248 p.
5. Otchet o NIR "Razrabotka instruktivno-metodicheskoy bazy po reabilitatsiyi vodnykh obyektov. [Report on Research and Development «Development of instruction/methodological foundations on the water bodies' rehabilitation»] 2.2 Razrabotat meropriyatiya po reabilitatsiyi vodokhranilishch, nakhodyashchikhsya v vedeniyi Rosvodresurov, i ikh ekologo-ekonomicheskkiye pokazately (promezhutochniy). Programma reabilitatsiyi vodokhranilishch (vklyuchaya ekologo-ekonomicheskkiye pokazately meropriyatiy), nakhodyashchikhsya v vedeniyi Rosvodrsurov, na primere vodoyomov Sverdlovsko-Chelyabinskoy vodokhozyaystvennoy sistemy: Volchikhinskoye vodokhranilishche" / RosNIIVKh. Ekaterinburg, 2017. 238 p.
6. Oksiyuk O.P., Zhukinskiy V.N. et al. Kompleksnaya ekologicheskaya klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod sushi [Comprehensive ecological classification of surface inland waters' quality] // *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 1993. Vol. 29. Vyp. 4. Pp. 62–76.
7. Sirenko L.A., Gavrilenko M.Y. Tsveteniyе vody i evtrofirovaniye [Water blooming and eutrophication]. Kiev: Nauk. dumka, 1978. 232 p.
8. Bulyon V.V. Pervichnaya produktsiya planktona vnutrennikh vodoyomov [Initial product of the inland water bodies' plankton]. L.: Nauka, 1983. 150 p.

9. *Papchenkov V.G.* Rastitelnyy pokrov vooyomov i vodotokov Srednego Povolzhya [Vegetative cover of water bodies and watercourses of the Middle Volga region]. Yaroslavl: TsMP MUBiNT, 2001. 214 p.
10. *Papchenkov V.G.* Razlichniye podkhody k klassifikatsiyi rasteniy vodoyomov i odotokov [Different approaches to the water bodies' and watercourses' plants classification] // Matly VI Vseros. konf. po vodnym makrofitam "Gidrobotanika-2005". Rybinsk: OAO "Rybinskiy Dom pečhati", 2006. Pp. 16–24.
11. *Dzyuban I.A., Kuznetsova S.P.* O idrobiologicheskom kontrole kahestva vod po zooplanktonu [About the hydro/biological control of water quality by zoo/plankton] // Nauchniye osnovy kontrolya kachestva vod po gidrobiologicheskim pokazatelyam: tr. Vsesoyuznoy konf., Moscow, 1978. L., 1978. Pp. 160–166.
12. *Pidgayko M.L., Aleksandrov B.I. et al.* Kratkaya biologo-produktsionnaya kharakteristika vodoyomov Severo-Zapada SSSR [A brief biological/production characteristic of water bodies of the North-West of the USSR] // Izvestiya GosNIORKh. 1968. Vol. 67. Pp. 205–228.
13. GOST R 57075–2016 Metodologiya i kriteriyi identifikatsiyi nailuchshikh dostupnykh tekhnologiy vodokhozyaystvennoy deyatelnosti [Methodology and identification criteria of the best available techniques for water/economic activities]. M.: Standartinform, 2016. 19 p.
14. *Mukhutdinov V.F., Pavluk T.E.* Prognoz gidrobiologicheskogo sostoyaniya Yumaguzinskogo vodokhranilishcha [Forecast of the Yumaguzinsk Reservoir hydro/biological status] // Nauka i praktika vodnogo khozyaystva. Ekaterinburg. RisNIIVKh, 2014. Pp. 384–398.
15. *Hendesen-Sollers B., Markland H.P.* The dying lakes. Causes and control of anthropogenic eutrophication. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p.
16. *Bulyon V.V.* Vliyaniye klyuchevykh bioticheskikh i abioticheskikh faktorov na ryboproduktivnost vodoyomov. Ozerniye ekosistemy: biologicheskiye protsessy, antropogennaya transformatsiya, kachestvo vody [Impact of the key biotic and abiotic factors on fish productivity of water bodies. Lacustrine ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, and water quality] // mat-ly II Mezhd. nauch. konf. 22-26 sent. 2003. Minsk: BGU, 2003. Pp. 15–18.
17. *Vollenweider R.A.* Das Nährstoffbelastungsconzept als Grundlage für deneutrophierungsprozess stehender Gewässer und Talsperren // Zeitschrift für Wasser und Abwasser Forschung. 1979. Bd. 12. No. 2. Pp. 46–56.
18. Obshchaya ekologiya. Biotsenologiya. Gidrobiologiya [General ecology. Bio/cenology. Hydrobiology]. Vol. 2. VINITI. M., 1975. 200 p.
19. Rekomendatsiyi. Raschet postupleniya biogennykh elementov v vodoyomy dlya prognoza ikh evtrofirovaniya i vybora vodookhrannykh meropriyatiy [Recommendations. Calculating of the biogenic elements input into water bodies in order to forecast their eutrophication and choice of water/protective measures. M.: Rosagropromizdat, 1989. 48 p.