

О методологии проведения реабилитации поверхностных водных объектов

А.Н. Попов ✉

✉ wrm@wrm.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование посвящено анализу состояния водных объектов на территории России, разработке методологии обоснования необходимости проведения реабилитационных работ, выбору оптимальных методов реабилитации деградировавших водотоков и водоемов, мониторингу и защите оздоровленных водных объектов от негативного воздействия, приводящего к деградации водных экосистем. **Методы.** Анализ «Отчета о результатах экспертно-аналитического мероприятия» Счетной Палаты РФ за 2020 г., результатов исследований зарубежных и отечественных авторов, результатов собственных многолетних наработок по обсуждаемому вопросу. **Результаты.** Разработаны методы реализации общей методологии реабилитации водных объектов, представленной в исследованиях РосНИИВХ. Для каждого типа водного объекта – водоемы (малопроточные, средней проточности, эвтрофные фитопланктонного и макрофитного типов, загрязняемые химическими ингредиентами), речная сеть – представлен алгоритм определения необходимости проведения реабилитационных работ, методика выбора приоритетных мероприятий по реабилитации водных объектов. Доказана обязательность прогноза состояния водного объекта до реализации выбранных мероприятий. Показаны результаты применения разработанной методики выбора оптимального направления реабилитационных мероприятий на примере двух водоемов – эвтрофного и загрязняемого химическими веществами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реабилитация, истощение водных бассейнов, экосистемный подход, принципы реабилитации, общая методология, водоемы, речные системы.

Для цитирования: Попов А.Н. О методологии проведения реабилитации поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 4. С. 87–107. DOI:10.35567/19994508-2024-4-87-107.

Дата поступления 05.07.2024.

About a methodology of the surface water bodies' rehabilitation

Aleksandr N. Popov ✉

✉ wrm@wrm.ru

Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Ural Branch, Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. This study is devoted to the analysis of the water bodies' status on the territory of Russia, to development of a methodology of justification of the necessity of rehabilitation, to selection of optimal method of rehabilitation of degraded watercourses and water bodies, and to monitoring and protection of the rehabilitated water bodies against adverse impact causing

© Попов А.Н., 2024

the aquatic systems' degradation. **Methods.** Analysis of "The report about results of expert/analytical operation" of the Accounts chamber of the Russian Federation, 2020, results of the outcomes of the studies of foreign and domestic authors, and results of our own many-year efforts on the discussed issue. **Results.** The methods of implementation of the general methodology of water bodies' rehabilitation presented in the RisNIIVKh proceedings for each type of water bodies (low-running, medium-running, eutrophic of phytoplankton and macrophyte types polluted with chemical ingredients), and river networks, concrete actions for determination of the necessity of rehabilitation, and the methods of choosing priority measures aimed at the water bodies' rehabilitation have been developed. We have proved the necessity of the water body status forecast prior to realization of the measures selected. Results of the application of the developed methods of selection the rehabilitation measures optimal direction have been demonstrated with two water bodies (an eutrophic one and polluted with chemical substances one) as examples.

Keywords: rehabilitation, depletion of water basins, ecosystem approach, rehabilitation principles, general methodology, water bodies, river systems.

For citation: Popov A.N. About a methodology of the surface water bodies' rehabilitation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 4. С. 87–107. DOI:10.35567/19994508-2024-4-87-107.

Received 05.07.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты взаимовлияния водных объектов, технологий и качества окружающей среды позволяют сделать вывод, что в настоящее время «водные ресурсы являются критическим критерием устойчивого развития в эколого-экономическом и социально-эстетическом понимании»¹. Анализ показывает, что в Российской Федерации происходит, по существу, ресурсное истощение водных бассейнов, в результате чего они не способны поддерживать биоразнообразие, устойчивость, сбалансированность биоты и гидрохимического режима, и, следовательно, всего комплекса взаимовлияющих факторов (водных, наземных, воздушных) в целом. Сформировавшаяся эколого-социальная ситуация характеризуется следующим: многие водотоки и водоемы на освоенной территории России представляют непосредственную опасность для здоровья человека; наблюдается тяжелейшая ситуация с воспроизводством пресноводных биоресурсов; продолжается политика экстенсивного хозяйственного освоения ресурсов поверхностных водных объектов. По сути, сложились условия, ведущие к безвозвратной потере водотоков и водоемов и как источников водоснабжения, и как неотъемлемого элемента ландшафтной структуры, активно участвующего в формировании и поддержании здоровой среды обитания всего живого.

Эта ситуация требует масштабной организации мероприятий по разработке водосберегающих технологий не только в промышленности и сельском хозяйстве, но и в бытовой сфере, а также реабилитации (оздоровления) и последующей защиты деградировавших поверхностных водных объектов. Наряду с

¹ Руководящие принципы экосистемного подхода к водохозяйственной деятельности. ЕЭК ООН, 1993 г. Режим доступа: www.unece.org/.../sem.4/mp.wat.sem.4.2004.4r.pdf

этим, в документе Счетной Палаты РФ² дана негативная оценка результатам девятилетней работы по реабилитации водных объектов: «...После завершения мероприятий по ЭРВО класс качества воды по ряду объектов не улучшился, а по ряду – ухудшился (например, Брянская, Владимирская, Тамбовская, Томская области, Республика Удмуртия), что свидетельствует о неэффективном использовании бюджетных средств согласно показателям, установленным в пункте 15 Методики оценки эффективности реализации ФЦП «РВХК» (приложение № 13)». Указана и основная причина неэффективного освоения финансовых средств (более 10 млрд руб.) – отсутствие единой методологической основы проведения восстановительных работ.

Анализ результатов, опубликованных за последние 17 лет (2007–2024 гг.) российских и зарубежных исследований³ [1–14], посвященных вопросам реабилитации водных объектов, показал отсутствие в Российской Федерации базовых документов, в которых были бы закреплены понятия «экологическая реабилитация водных объектов», цель реабилитационных работ, принципы и общая методология реабилитации поверхностных водных объектов, положения, на которые опирается реализация методологии, ранжирование целей реабилитации и механизмы реализации. Последствия – отсутствуют единые методические документы, позволяющие проводить:

- обоснование необходимости проведения реабилитационных работ для различных видов водных объектов;
- обоснование целесообразного комплекса реабилитационных мероприятий в зависимости от состояния водного объекта, воздействующих факторов и планируемых к достижению показателей;
- прогнозировать эффективность планируемых реабилитационных мероприятий;
- устанавливать (рассчитывать) характеристики проектируемых мероприятий;
- рекомендовать технологию мониторинга водных объектов в постреабилитационный период.

К сожалению, в нашей стране в настоящее время не используются методологии комплексной оценки состояния водных объектов, учитывающие положения «Экосистемного подхода к водохозяйственной деятельности». Положение, зафиксированное в российском законодательстве, игнорируется практически всеми разработчиками оздоровительных мероприятий на водных объектах. По сути, в вопросах оздоровления водных объектов не произошло перемен по отношению к отмеченному в документе².

В работах [15, 16] проанализированы некоторые теоретические вопросы развития механизмов реализации проектов экологической реабилитации

²Анализ результативности принятых мер по экологической реабилитации водных объектов (ЭРВО) в 2012–2019 годах и истекшем периоде 2020 года, а также оценка достижения показателей, предусмотренных документами стратегического планирования, касающихся экологического состояния водных объектов». Отчет о результатах экспертно-аналитического мероприятия. Счетная Палата РФ, 2020 г.

³Патент на изобретение RU 2784508 С1. Способ реабилитации водных объектов.

водных объектов, в целом не решающие обозначенные выше актуальные задачи. Частичное решение представлено в работе «Временные рекомендации по выбору метода восстановления и мелиорации водоема» [17], выполненной коллективом авторов РосНИИВХ и получившей одобрение Научно-технического совета Минводхоза РСФСР. Рекомендации были апробированы при разработке методов восстановления зарастающих озер Среднего Урала, прогнозировании гидробиологического состояния проектируемых водохранилищ (Иштугановское, Верхне-Араслановское, Юмагузинское, Сулёмское). Апробация показала необходимость совершенствования механизмов планирования и проведения мероприятий по экологической реабилитации водных объектов (ЭРВО), в т. ч. в части установления критериев оценки, подлежащих учету при выборе требующих восстановления в первоочередном порядке водных объектов, определении приоритетных оздоровительных мероприятий, порядке их проведения, соблюдения комплексного подхода, учитывающего изменение класса качества воды в водном объекте по результатам проведения ЭРВО.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая результаты апробации методики [17], собственных исследований по данному вопросу, коллектив авторов в 2017 г. опубликовал статью [18], в которой представлена общая методология обоснования необходимости проведения оздоровительных работ, оптимальной направленности, глубины и времени реабилитационных воздействий на биогеоэкосистему поверхностных водных объектов: водотоков (реки, ручьи, каналы); водоемов (озера, пруды, обводненные карьеры, водохранилища). Приведем кратко некоторые положения, изложенные в работе [18]:

Цель реабилитации поверхностных водотоков и водоемов – возрождение функциональной способности геоэкосистем водных объектов до состояния, при котором они смогут стабильно воспроизводить и поддерживать экологически безопасные условия существования биоты. Одним из главных базисов реабилитации водных объектов в условиях влияния техногенеза принят экосистемный подход к водохозяйственной деятельности, являющийся методологической основой поддержания устойчивого развития водных экосистем, требующий рассматривать как единое целое водный объект, его водосбор, воздушное пространство над ним и деятельность по планированию, исследованию и рациональному использованию его ресурсов с учетом возможности поддержания устойчивого состояния окружающей среды в целом¹.

Задачи реабилитации. Реабилитация поверхностных водных объектов – это совокупность чередующихся в пространстве и во времени действий, направленных на достижение конкретной цели. Одна из наиболее важных задач – обоснование необходимости проведения реабилитации водного объекта, оптимальной направленности, глубины и времени реабилитационных воздействий, которые позволят достичь максимально возможного результата в конкретной эколого-экономической ситуации. Немаловажной задачей является также оценка характеристик технологических процессов, которые будут выбраны для реализации реабилитационных мероприятий.

Каждый из обозначенных в работе [18] типов водных объектов (водоемы, водотоки) имеет свои морфометрические, гидрологические и гидрометрические параметры, режимы эксплуатации и другие особенности. Возникает вполне закономерный вопрос: каким образом представленная методология может быть реализована для каждого типа водного объекта?

Водоемы

Различаются несколько типов водоемов. Тип водоема определяется на основании данных о коэффициенте прозрачности $K_{оп}$ – отношения прозрачности воды (по диску Сэжки) к средней глубине. В табл. 1 представлены данные о взаимосвязи между $K_{оп}$ и типом водоема [19].

Таблица 1. Взаимосвязь между коэффициентом прозрачности и типом водоема
Table 1. Interconnection between the transparency coefficient and the water body type

№	Название	Коэффициент относительной прозрачности ($K_{оп}$)	Тип водоема
1	Оптически очень мелководные озера (олигофотобатные)	$\leq 0,25$	фитопланктонный (планктотрофный)
2	Оптически мелководные озера (олигомезофотобатные)	0,25-0,50	фитопланктонный (планктотрофный)
3	Оптически средне-глубокие (мезофотобатные)	0,5-1,0	фитопланктонно-макрофитный бентопланктотрофного типа (гармоничного)
4	Оптически глубокие (мезополифотобатные)	1-2	макрофитный (бентотрофный)
5	Оптически очень глубокие (полифотобатные)	2 – 4	макрофитный (бентотрофный)

Примечание: олигофотобатные – преобладающий вид проявления продукционных процессов – «цветение» фитопланктона; олигомезофотобатные – преобладающий вид проявления продукционных процессов – «цветение» фитопланктона; мезофотобатные – проявление продукционных процессов – «цветение» фитопланктона, частичная зарастаемость акватории, до 50 %; мезополифотобатные – проявление продукционных процессов – зарастаемость акватории > 50 – < 100 %; полифотобатные – проявление продукционных процессов – зарастаемость акватории – до 100 %

Каждый из типов водоемов имеет трофический статус, который зависит от интенсивности продукционных процессов и определяется поступлением лимитирующего биогенного элемента, его площади, средней глубины и времени водообмена. Для большинства водоемов России лимитирующим биогенным элементом является фосфор общий. При наличии перечисленной информации трофический статус фитопланктонных и макрофитных типов водоемов определяется по схемам Фолленвайдера (рисунок) [20], соотносящим удельную фосфорную нагрузку в $г/м^2$ год с морфометрическими и гидрологическими параметрами для непроточных, малопроточных и водоемов умеренной

проточности, либо по иным схемам. При отсутствии такой информации трофический статус фитопланктонных и фитопланктонно-макрофитных водоемов определяется на основании данных, представленных в табл. 2.

Таблица 2. Трофический статус фитопланктонных и фитопланктонно-макрофитных водоемов в соответствии с концентрацией хлорофилла «а» и биомассой фитопланктона (средние за лето величины) [21]
 Table 2. Trophic status of phytoplankton and phytoplankton/macrophyte water bodies in accordance with chlorophyll «a» concentration and phytoplankton mass (average summer values)

Концентрация хлорофилла «а», мг/м ³	Биомасса фитопланктона, мг/дм ³	Трофический статус
<5–10	< 0,1–0,5	олиготрофный
11–20	0,6–2,0	мезотрофный
21–75	2,1–10,0	эвтрофный
76–150	10–50,0	политрофный
150–250 и >	≥ 50–100	гипертрофный

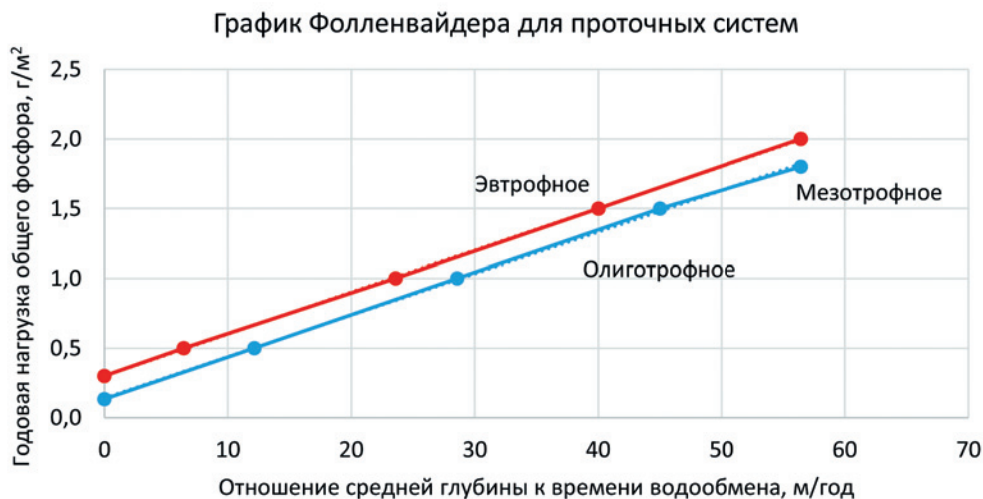


Рисунок. Схема связи между нагрузкой общим фосфором, средней глубиной, временем водообмена и уровнем трофии водоема.
 Fig. A scheme of interconnection between total phosphorous load, average depth, time of water exchange and trophic level of the water body

На необходимость проведения реабилитационных работ указывает трофический статус фитопланктонных водоемов – эвтрофный, политрофный, гипертрофный. Необходимо отметить, что на практике некоторые водохранилища уже при создании даже на водотоках, не подверженных антропогенному воздействию, имеют статус эвтрофного. Это происходит при условии соотношения удельного потока общего фосфора, формирующегося за счет внешних и внутренних источников, гидрологических и морфометрических параметров (средней глубины, отношения средней глубины к проточности), превышающего критическую величину (см. рисунок). В этом случае необходимо предусмотреть либо мероприятия, защищающие водоем от увеличения поступления лимитирующего биогена, либо внесение корректировок в проект. Последнее может быть осуществлено только на основе прогноза гидробиологического состояния проектируемого водохранилища, которое в России практически при проектировании не осуществляют, что противоречит положениям, изложенным в «Руководящих принципах экосистемного подхода к водохозяйственной деятельности»¹.

Для макрофитных водоемов при отсутствии информации о соотношении удельной нагрузки, морфометрических и гидрологических параметров определение трофического статуса производится по степени зарастания (покрытия) высшей водной растительностью (ВВР) акватории водоема (табл. 1), видовому составу высших водных растений. Для любого макрофитного водоема существует оптимум развития ВВР в конкретный период его жизни как водного объекта [22, 23], который может отличаться от фактически определенного в любую сторону. При превышении фактической степени зарастания оптимальной водоем относится к эвтрофному типу.

Оптимальная степень зарастания водной растительностью для водоемов рассчитывается по уравнению [23]:

$$Mcov = IF (Lat < 55) THEN (56,5 \times (Sec/Dmean)) ELSE (23,6 \times (Sec/Dmean)) \quad (1)$$

где Lat – географическая широта, °.ш.;

Sec – прозрачность в метрах по диску Секки;

$D mean$ – средняя глубина водоема в метрах.

Полученное значение указывает на оптимальную площадь зарастания водоема макрофитами в %. Оптимальная годовая продукция макрофитов (ккал/м²год) в водоеме рассчитывается по уравнению [23]:

$$Pmac = 10^{(2,21 + 1,08 Lg (Mcov) - 0,49 (90/(90 - Lat)))} \quad (2)$$

где $Mcov$ – оптимальная степень зарастания водоема макрофитами, %;

Lat – географическая широта, °.ш.

Полученное значение указывает на оптимальную продукцию макрофитов за год, выраженную в ккал/(м²*год). 1 ккал соответствует 0,217 г органического вещества биомассы ВВР, 0,25 г сухого вещества биомассы ВВР – 1,56 г сырой массы растений [24].

Выбор оптимальных методов реабилитации для эвтрофных водоемов, продукционные процессы которых лимитируются потоками общего фосфора (на территории России их более 95 %), основан на расчете фактической удельной нагрузки биогеном, оценке ее необходимого снижения для достижения задаваемой трофности, ранжировании источников поступления ингредиента и выборе наиболее существенных, определении возможной степени снижения их воздействия (с учетом НДТ), прогнозе изменения состояния водного объекта, корректировке (при необходимости по результатам прогноза) перечня мероприятий и количества инактивируемых источников. Необходимо и определение концентраций базовых аналитов как до проведения реабилитационных мероприятий, так и после, поскольку продуцируемая биомасса филопланктона и макрофитов зачастую является источником загрязнения органическими веществами, соединениями азота и пр.

Для водоемов, на гидрохимический режим и трофический статус которых оказывает влияние поступление химических веществ (аналитов) и потоков общего фосфора, выбор значимых оздоровительных мероприятий основан на определении потоков ингредиентов от различных источников воздействия, с дальнейшим определением наиболее значимых, оценке возможной степени их инаktivации на основе НДТ и последующего прогноза изменения их состояния.

Факторы воздействия на состояние водных объектов:

1. Локализованное поступление загрязненных вод: бытовые, промышленные, ливневые сточные воды, шахтный и карьерный водоотлив, сток с осушительных и оросительных систем и пр.

2. Рассеянное поступление загрязнений: диффузный сток с водосбора, грунтовый сток, диффузный сток с сельскохозяйственных территорий, сток с территории неблагоустроенных населенных пунктов, подотвальные воды, добыча полезных ископаемых на акваториях и пр.

3. Внутренние факторы: донные отложения, физико-химические, биологические и физические процессы в толще воды, продукционно-деструкционные процессы в воде и на грунте, жизнедеятельность гидробионтов, морфометрические характеристики, гидролого-гидравлические характеристики и пр. Морфометрические характеристики – средняя глубина, средняя площадь, средний объем воды и донных отложений, изолинии глубин воды, изолинии мощности донных отложений – определяются при обязательной батиметрической съемке.

Методы определения фактической суммарной удельной фосфорной нагрузки на водоем

Один из методов определения фактической суммарной удельной фосфорной нагрузки на водоем ($\Gamma_{\text{сумм}}$) построен на следующем положении: среднегодовая концентрация общего фосфора в водоеме (C_p) равна его концентрации в период полного перемешивания объема (чаще всего в мае [10]). Фактическая суммарная фосфорная нагрузка на водоем определяется по уравнению:

$$\Gamma_{\text{сумм}} = C_p * V / F_{\text{общ}}, \quad (3)$$

где V – среднегодовой объем водоема;

$F_{\text{общ}}$ – площадь акватории при среднегодовом объеме.

При невозможности определения $\Gamma_{\text{сумм}}$ по уравнению (3) определение фактической суммарной удельной фосфорной нагрузки на водоем производится суммированием внутренних и внешних годовых потоков фосфора, определяемых при проведении полевых и лабораторных работ, деленных на площадь акватории водоема. Поступление общего фосфора в водоем за счет внешних источников за вычетом выноса с истоками ($\Pi_{\text{внешн}}$), г/год:

$$\Pi_{\text{внешн}} = \Pi_{\text{рч}} + \Pi_{\text{ст}} + \Pi_{\text{атм}} + \Pi_{\text{рх}} + \Pi_{\text{ота}} + \Pi_{\text{лп}} + \Pi_{\text{всб}} - \Pi_{\text{ист}}, \quad (4)$$

где $\Pi_{\text{рч}}$ – поступление фосфора с речным (русловым) стоком, г/год;

$\Pi_{\text{ст}}$ – поступление общего фосфора со сточными водами промышленности, ливневой и хозяйственно-бытовой канализации, сбрасываемыми непосредственно в водоем, г/год;

$\Pi_{\text{атм}}$ – поступление общего фосфора на акваторию водоема с атмосферными осадками, г/год;

$\Pi_{\text{рх}}$ – поступление фосфора от садкового рыбного хозяйства (при его наличии), г/год;

$\Pi_{\text{ота}}$ – поступление фосфора от рекреационной нагрузки, г/год;

$\Pi_{\text{лп}}$ – поступление фосфора с листовым опадом, г/год;

$\Pi_{\text{всб}}$ – поступление фосфора с недренируемой водотоками территории частного водосбора, г/год;

$\Pi_{\text{ист}}$ – вынос фосфора из водоема с водой истоков, водозабором, г/год. Для непроточных водоемов $\Pi_{\text{ист}}$ равно нулю.

Внешняя удельная нагрузка общим фосфором равна:

$$\Gamma_{\text{внешн.}} = \Pi_{\text{внешн}} / F_{\text{в}}, \quad (5)$$

где $F_{\text{в}}$ – площадь водоема при фактическом уровне воды, м².

Внутренний удельный поток общего фосфора равен:

$$\Gamma_{\text{внутр}} = \Gamma_{\text{ав}} + \Gamma_{\text{амо}} + \Gamma_{\text{фпл}} + \Gamma_{\text{н.м.}} \quad (6)$$

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

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

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

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

Общая удельная нагрузка равна сумме внешней и внутренней удельной нагрузки.

Выбор приоритетных мероприятий для реабилитации водоема

Методология выбора приоритетных мероприятий по реабилитации водоема представлена на примере эвтрофных условных малопроточных водоемов фитопланктонного и макрофитного типов.

Общие процедуры: определение концентрации фитопланктона и степени зарастаемости, на основании чего оценивается трофический статус водоема (табл. 1) и принимается решение о необходимости его реабилитации. При положительном решении проводится батиметрическая съемка, по результатам которой строятся кривые площадей и объемов воды и донных отложений. Дифференцированно определяется годовое поступление из каждого источника внешней нагрузки, вынос с истоками и водозаборами.

В случае отсутствия либо недостатка данных о водоеме, втекающих и вытекающих водотоках, водозаборах, сбросах сточных вод и пр. проводят натурные наблюдения. Створы (посты) наблюдений намечаются в зависимости от расположенных источников загрязнения, точек водоотбора: в проточной части водоема, в верховье, верхнем бьефе, вблизи водозаборов и нижнем бьефе водохранилищ. Объем, сроки и продолжительность наблюдений устанавливаются в зависимости от состояния изученности водоема, впадающих рек, источников загрязнения.

Следует учитывать, что при отборе проб четыре раза в год (раз в сезон) глубина изучения ретроспективы должна составлять пять лет, а современного состояния 2–3 года. При ежемесячном отборе глубина ретроспективного обзора, соответственно, уменьшается до одного года. Для хорошо изученных водных объектов можно ограничиться проведением экспресс-обследования. Особое внимание необходимо обратить на факторы, влияющие на диффузное поступление биогенов с водосбора (рекреационная нагрузка, сельхозугодия и пр.).

Натурные наблюдения для определения внешней нагрузки с замерами концентраций и расходов производятся в течение календарного года. Внутренняя нагрузка (5) определяется на основании результатов лабораторного моделирования (нагрузка от донных отложений) и данных о биомассе фитопланктона, затопленной древесины, высших водных растений.

Фитопланктонные водоемы. Зная фактическую концентрацию фитопланктона или удельную нагрузку общим фосфором в соответствии с графиками Фолленвайдера или по данным табл. 2, определяется фактический трофический статус водоема, задается желаемый. Графически или расчетным путем определяется величина снижения потока биогена, необходимая для достижения выбранного трофического статуса. Потоки общего фосфора от внешних и внутренних источников ранжируются по величине. Выбирается поток с наибольшим рангом, определяется возможная степень его инактивации с учетом НДТ. Далее из общей нагрузки вычитается инактивированная часть потока с наибольшим рангом, определяется величина оставшегося суммарного воздействия и прогнозируется трофический уровень водоема. При не-

достижении задаваемого результата реабилитации процедура повторяется со следующим по рангу потоком и так до достижения задаваемой удельной нагрузки. При этом необходимо понимать, какова фоновая концентрация общего фосфора в воде, характерная для естественных процессов в водном объекте и на водосборе, чтобы адекватно определять степень ее возможного снижения. Для этого можно воспользоваться морфоэдафическим индексом (МЭИ), позволяющим рассчитать концентрацию биогена в воде, характерную для естественных процессов в водоеме [26]:

$$\text{МЭИ} = \frac{C}{H} \quad (7)$$

где МЭИ – морфоэдафический индекс;

C – средняя величина электропроводности воды ($\mu\text{S}/\text{cm}$ при 20°C);

H – средняя глубина, м.

Концентрация общего фосфора в данном случае рассчитывается по уравнению:

$$\text{Lg}|P| = 0,75 + 0,27 (\pm 0,11) \cdot \text{Lg МЭИ} \quad (8)$$

В качестве примера реализации представленной выше методологии выбора целесообразных методов реабилитации эвтрофных фитопланктонных озер, приведены результаты выполненной работы для высокоэвтрофного оз. Шарташ, расположенного в черте г. Екатеринбурга. Озеро на момент наблюдения имело статус фитопланктонно-макрофитного. Среднегодовое содержание общего фосфора в воде Шарташа – $0,35 \text{ г P}/\text{м}^3$.

Общий объем озера составляет $38,4 \text{ млн м}^3$, из них донные отложения занимают $17,2 \text{ млн м}^3$, объем воды – $21,2 \text{ млн м}^3$. Средняя глубина – $2,89 \text{ м}$, площадь озера на момент проведения работ составила $7,33 \text{ км}^2$, площадь водосбора – 4 км^2 . Притоков, впадающих в озеро, нет, постоянно действующего истока не обнаружено. Постоянно действующего водозабора не обнаружено. Локальных сбросов сточных вод не производится.

На территории водосбора находится 686 домов, включая оздоровительные учреждения, где постоянно проживает до трех тысяч человек. На берегах озера на расстоянии $50\text{--}400 \text{ м}$ размещено 23 промышленных объекта, многие из которых не имеют отношения к рекреационным целям (склады, производственные базы, цеха по производству швейных изделий, теплицы и т. д.). Санитарное состояние прибрежной зоны, особенно в период массового отдыха населения, неудовлетворительное. Отсутствие необходимого количества мусоросборников, туалетов, низкая культура поведения населения делает эту зону интенсивным источником бактериального и вирусного загрязнения.

Степень зарастаемости акватории озера на момент исследования составила 45% , P_m (биомасса высшей водной растительности, рассчитанная на сухой вес) $342 \text{ г}/\text{м}^2$, в основном погруженная высшая водная растительность (ВВР). Общий вес сырой биомассы высшей водной растительности – $29\,000 \text{ т}$.

Поток общего фосфора из плавающей и затопленной древесины – 0. Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период – 0,4574 г/м³ (сухой вес), в зимний период – 0. Длительность зимнего периода – 233 дня.

Для вегетационного периода были получены следующие параметры поступления фосфора из донных отложений и высшей водной растительности – 1,906 г Р/м²·год. Внешний удельный поток общего фосфора в озеро составил 0,15 г Р/м²·год, суммарный поток фосфора на единицу площади водоема – 2,056 г Р/м²·год.

Согласно модели Фолленвайдера, водоем со средней глубиной Шарташа (2,89 м) является эвтрофным, начиная с годовой удельной нагрузки общим фосфором 0,11 г Р/м²·год ($P_{крит}$). Фактическая нагрузка на Шарташ почти в 19 раз выше, т. е. водоем является высокоэвтрофным.

Рассмотрены следующие методы реабилитации озера, реализация которых в условиях его существования в той или иной степени осуществима:

- при создании проточности (~ 10 % от объема озера) и содержании фосфора в добавляемой воде = 0 величина снижения удельного потока составит лишь 6 % от $P_{сум}$, т. е. не вызовет существенного улучшения состояния водоема. Для увеличения степени проточности отсутствуют необходимые ресурсы;

- при полном удалении донных отложений и макрофитов из оз. Шарташ суммарный поток фосфора в его воды снизится на 1,906 г Р/м² год (C_2), средняя глубина озера увеличится до 6 м, за счет чего величина $P_{крит}$ увеличится с 0,11 г Р/м²·год до 0,145 г Р/м²·год. Полное удаление донных отложений переводит озеро практически в мезотрофное состояние;

- предотвращение внешнего (территория водосбора) загрязнения оз. Шарташ фосфором снижает $P_{сум}$ на величину на 0,15 г Р/м²·год, что заметно не скажется на уровне его трофности;

- регулярное проведение химической коагуляции фосфора в оз. Шарташ может снизить суммарный поток фосфора не более чем до 1,007 г Р/м²·год. Озеро будет оставаться высокоэвтрофным водоемом. Более того, метод не устраняет причин поступления фосфора, неизвестна реакция экосистемы на подобное вмешательство;

- метод технического изъятия фитопланктона эффективен лишь в периоды интенсивного «цветения» водоема в качестве косметической меры, способствующей также устранению летнего замора рыбы. Метод весьма затратен. Не устраняет причин, вызывающих повышенную интенсивность продукционных процессов. Побочный эффект – увеличение степени зарастаемости;

- изъятие продукции макрофитов из Шарташа эквивалентно разовому снижению $P_{сум}$ на 1,880 г Р/м²·год и изменению трофического статуса до слабоэвтрофного водоема с переводом его в фитопланктонный статус. Не устраняет источник поступления биогенов, следует ожидать в последующий год увеличения биогенной нагрузки и усиленного «цветения» водоема;

- при создании в оз. Шарташ экосистемы с высокой продукцией рыб-макрофитофагов и рыб-фитопланктонофагов и их интенсивном вылове не-

перехваченный восстановительными мероприятиями поток фосфора будет не менее $1,02 \text{ г Р/м}^2 \cdot \text{год}$, т. е. при реализации этого метода восстановления озеро будет оставаться высокоэвтрофным водоемом;

– при повышении уровня Шарташа на 2,5 м с сохранением прежней площади зеркала (что возможно лишь при устройстве кольцевой дамбы на его берегах и наличии необходимого объема воды) $P_{\text{крит}}$ увеличится с $0,11 \text{ г Р/м}^2 \cdot \text{год}$ до $0,15 \text{ г Р/м}^2 \cdot \text{год}$, а величины $P_{\text{сум1}}$ и $P_{\text{сум2}}$ будут равны $0,56 \text{ г Р/м}^2 \cdot \text{год}$. Это средний по эффективности метод реабилитации, поскольку переводит озеро в умеренно эвтрофное состояние.

Таким образом, с точки зрения реальной возможности осуществления реабилитационных мероприятий наиболее эффективным, удаляющим источник поступления биогенов, является очистка озера от донных отложений. Методика позволяет рассчитать достаточное количество удаленных донных отложений для получения любого задаваемого трофического уровня озера (от мезотрофного до эвтрофного).

Для водоемов макрофитного типа порядок проведения выбора целесообразных реабилитационных мероприятий, по существу, аналогичный.

Водоемы, загрязняемые техногенными химическими ингредиентами. На примере Северского водохранилища (Средний Урал) представлено использование предложенной выше методологии выбора целесообразных методов реабилитации водоемов, загрязняемых техногенными ингредиентами. Северское водохранилище характеризуется низкой трофностью, но подвержено интенсивной антропогенной нагрузке, разделившей водоем на три зоны: северную (химическое загрязнение – соединения меди, железа, цинка, сульфаты, гидробиоценоз ацидофильный); южную (загрязнение органическими веществами, величина рН ближе к щелочной); среднюю приплотинную (гидробиоценоз смешанный). Объем водохранилища в настоящее время при отметке воды 338,35 м составляет 11,15 млн м³. Максимальные глубины – 9 м, минимальные – 0,5 м. Объем донных отложений – 1,9 млн м³. В водохранилище впадает 8 водотоков, вытекает только р. Северушка. Наибольшую долю в уровень загрязнения воды вносят соединения меди, алюминия, железа, цинка, марганца, а также фенолы и фторид-ионы, Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , фенолы, сульфаты-ионы, кислоты.

Выбор направления реабилитационных мероприятий необходимо проводить для южной и северной частей водохранилища отдельно, поскольку воздействующие на них объекты имеют разное влияние на состояние водоема. На основании полученных результатов исследования внешних и внутренних источников загрязнения Северского водохранилища проведен выбор целесообразных направлений воздействия и даны рекомендации по их реализации.

В северный рукав водохранилища впадает два водотока, оказывающих максимальное техногенное влияние, – Мертвая река и р. Зюзелька. С водами Мертвой реки за время наблюдения (7 месяцев) в водохранилище поступило $\approx 9 \text{ т}$ серной кислоты (расчет по величине рН), 485,6 т сульфатионов, 51,6 т

фторидов и пр. (ионы меди, цинка, железа). Предлагаемое мероприятие для устранения влияния данной зоны загрязнения – нейтрализация вод реки с применением известняковых блоков соответствующих размеров, помещенных в русло Мертвой реки, с наблюдением за их трансформацией. Далее рекомендовано применение аэробных искусственных водно-болотных угодий (биоплато), на которых будут очищаться впадающие в Северный рукав воды Мертвой реки, периодически действующих ручьев и р. Зюзельки. Рассчитано количество задерживающихся на биоплато ингредиентов, указывающее на значительное снижение их концентрации на выходе из него. Необходима также рекультивация рудного поля (5 га) вблизи пос. Зюзелька, образовавшегося в результате работы карьера по добыче колчеданных руд и шахт медной руды.

В южный рукав водохранилища впадают р. Железянка (старое русло) и р. Железянка (новое русло). Даны рекомендации о необходимости превращения южной части (Железянский залив) в ботаническую площадку для доочистки поступающих вод от соединений металлов, фторидов, сульфатов, соединений групп азота и фосфора. В настоящее время рекомендуемые мероприятия по Северскому водохранилищу готовятся к внедрению и находятся на стадии проектирования.

Речные системы

Для определения необходимости реабилитации речных систем предложено рассматривать совокупности антропогенного и природного воздействия: спрямление речных русел; добычу гравия и песка из русла; добычу драгоценных металлов и камней из русел дражным способом; разрыв речного континуума посредством строительства гидротехнических сооружений; истощение водных ресурсов вследствие их чрезмерного изъятия; засорение русел топляком, травой, мусором, технологическими и бытовыми отходами; загрязнение реки сточными водами (в т. ч. ливневыми с территории городов и поступающими с водой притоков); загрязнение поверхностным стоком с территории водосбора; загрязнение поверхностным стоком с территории водосбора при гидравлической добыче драгоценных металлов и камней; тепловое загрязнение воды; снижение водоудерживающей способности речных бассейнов; засорение русла реки в результате естественных природных процессов (оползни, ветровал, жизнедеятельность животных и пр.); влияние накопленного экологического ущерба.

Определяется оцениваемый показатель и виды исследований, необходимые для оценки состояния и принятия решения о реабилитации, степени изменения водного объекта. На основании полученных результатов принимается решение о проведении реабилитационных работ. Пример процедуры определения необходимости реабилитационных мероприятий при одном виде воздействия на водоток представлен в табл. 3, а в табл. 4 – пример выбора перечня реабилитационных мероприятий, позволяющих улучшить состояние водотока при указанном в таб. 3 виде воздействия.

Таблица 3. Виды воздействий, оцениваемый показатель, виды исследований, степень изменения, необходимость реабилитации
 Table 3. Types of impact, an indicator to be assessed, types of research, alteration degree, and necessity for rehabilitation

Вид воздействия	Оцениваемый показатель	Исследования, необходимые для оценки состояния и принятия решения о необходимости реабилитации	Степень изменения	Необходимость в реабилитации
Спрямоленные речные русла	Изменение русловых процессов: усиление интенсивности размыва русла, увеличение количества местного твердого стока и последующее отложение наносов на нижерасположенном участке, перераспределение уклонов и изменение характера русловых деформаций.	1. Изучить на карте вид реки в плане и сравнить историческую карту с современной, определить, являются ли изменения результатом инженерных работ и т. д. 2. Оценить изменения русловых процессов: морфологических изменений русла, определение зон наносов, намыва и подмыва берегов, перереформирования дна, плановые изменения, деформации русла как по профилю, так и в плане (17). Экосистемные исследования. 3. Желательно собрать информацию о состоянии реабилитируемой реки или участка на уровне периода, предшествующего изменению водотока в результате вмешательства (гидрология, профиль и план русла, гидрохимия, состояние экосистемы). 4. Категории «основных» и «дополнительных» показателей для определения степени изменений гидроморфологических показателей состояния рек представляются в отдельном приложении (в статье не даны ввиду большого объема информации).	Усиление интенсивности размыва русла, перераспределение уклонов и изменение характера русловых деформаций от 0 до 15 % от протяженности участка включительно, увеличение местного твердого стока на участке на 15 %.	не требуется
			Усиление интенсивности размыва русла, перераспределение уклонов и изменение характера русловых деформаций от 15 % и выше протяженности участка, увеличение местного твердого стока на участке более, чем на 15 %.	требуется

Таблица 4. Виды воздействий, изменения, требующие проведения реабилитационных работ, необходимые реабилитационные мероприятия
 Table 4. Types of impact, alterations that require rehabilitation works, and the necessary rehabilitation measures

Вид воздействия	Изменения, требующие проведения реабилитационных работ	Виды реабилитационных воздействий при различных степенях изменений
Спрявление русел	<p>Усиление интенсивности размыва русла, перераспределение уклонов и изменение характера русловых деформаций от 15 % и выше протяженности участка, увеличение местного твердого стока более, чем на 15 %.</p> <p>Свыше 15 % протяженности участка реки имеют изменение плановой конфигурации, продольного и поперечного профиля участка реки.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Мероприятия, направленные на возвращение плановой конфигурации участка реки, его продольного и поперечного профиля к исходным (до спрямления) на 85 % его протяженности (уменьшение скоростей на участке за счет уменьшения уклонов, что может быть достигнуто удлинением пути воды за счет меандрирования). 2. Удаление отложившихся наносов на нижерасположенном участке до уровня естественного залегания русла. 3. Возможная очистка старого русла до уровней естественного залегания и другие русловосстановительные работы. 4. Прогноз состояния после реабилитации. Разработка системы мониторинга. Мониторинг.

Реализация реабилитационных мероприятий должна сопровождаться организацией водопользования, предотвращающего негативное воздействие на водные объекты и соответствующего формированию антропогенной нагрузки, полученной при обосновании оздоровительных мероприятий. Разработанный для водного объекта комплекс мероприятий может содержать процедуры, которые необходимо проводить в самом водном объекте, на водосборе, локальных источниках поступления ингредиентов и т. д.

Практически все реабилитационные мероприятия, реализуемые на акватории, могут наносить ощутимый урон экосистемам водных объектов. Так, последствия дноочистительных работ могут привести к разрушению экосистемы водного объекта, на восстановление которой, но уже в новом качестве, требуется достаточно длительный период. Дноочистительные работы затратны,

разрушают экосистему водного объекта, поэтому их необходимо проводить в комплексе с другими реабилитационными мероприятиями, реализуемыми на водосборном бассейне. К их индивидуальной реализации рекомендуется прибегать только в случае, когда другие восстановительные мероприятия не дают необходимого результата [27, 28].

Проводимые на водосборах мероприятия должны быть направлены на устранение поступления в водный объект с рассеянным стоком нежелательных ингредиентов, что также приводит к некоторому перестроению водной экосистемы, освобождающейся от негативного воздействия. В целом формирование новой, полноценной водной экосистемы следует ожидать не ранее, чем через пять лет. Изменения водной и наземной экосистем и их стабилизация отслеживаются по результатам мониторинга, обязательного после проведения реабилитационных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ документов Счетной Палаты РФ с зафиксированным негативным результатом работы по реабилитации водных объектов по причине отсутствия единых методических документов по данному вопросу, а также ряда российских и зарубежных работ по тематике реабилитации показал, что в настоящее время не произошло заметных изменений в вопросах оздоровления водных объектов.

На базе имеющегося в ФГБУ РосНИИВХ опыта по разработке общей методологии, принципов реабилитации поверхностных водных объектов, общих действий для определения необходимости проведения реабилитационных работ, их оптимальной направленности, глубины и времени воздействия на биогеоэкосистему поверхностных водных объектов разработаны методы их реализации для каждого типа водного объекта. Для водных объектов различного типа разработаны методики определения необходимости проведения реабилитационных работ, выбора приоритетных целесообразных мероприятий. Доказана обязательность прогноза состояния водного объекта до реализации выбранных мероприятий.

Разработанные подходы направлены на достижение основной цели реабилитации – возрождения на базисе экосистемного подхода к водохозяйственной деятельности функциональной способности геоэкосистем водных объектов до состояния, при котором они смогут стабильно воспроизводить и поддерживать здоровые, экологически безопасные условия существования биоты. Реабилитация поверхностных водных объектов не является самостоятельной задачей, это составная часть комплексного использования и охраны ресурсов водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеева А.А. К вопросу экологической реабилитации водных объектов Волгоградского региона // Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса: сб. материалов Межд. научно-практ. конф. посвященной памяти академика РАН В.П. Зволинского и 30-летию создания ФГБНУ ПАФНЦ РАН, Соленое Займище, 10–12 августа 2021 г. Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, 2021. С. 722–726.

2. Васильева З.Е. Реабилитация городских водных объектов // Наука и образование в XXI веке: сб. научных трудов Межд. научно-практ. конф. Тамбов, 30 сентября 2013 г. Тамбов: Консалтинговая компания Юком, 2013. С. 26–28.
3. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Соколова О.В. Экобиоинженерный подход к восстановлению и реабилитации водных объектов // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология–2017): Мат-лы XIII Межд. научно-техн. конф. Уфа, 30 апреля 2017 г. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2017. Т. II. С. 143–146.
4. Кривицкий С.В. Экологическая реабилитация водных объектов // Экология и промышленность России. 2007. № 5. С. 20–23.
5. Кривицкий С.В. К вопросу экологической реабилитации водных объектов // Проблемы, перспективы и направления инновационного развития науки: сб. статей по итогам Межд. научно-практ. конф. Омск, 24 ноября 2017 г. Омск: Агентство международных исследований, 2017. С. 149–153.
6. Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В. Обоснование экологической реабилитации водных объектов Алтайского края // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2014. № 2 (74). С. 4–12.
7. Рахметова А.Е., Кутузова Е.И. Состояние и экологическая реабилитация водных объектов Санкт-Петербурга // Наука среди нас. 2018. № 1 (5). С. 119–124.
8. Афонин В.А., Насипова Д.Р. Обоснование комплексных мероприятий по экологической реабилитации водных объектов урбанизированных территорий // Основы рационального природопользования: Мат-лы VI Национальной конф. с межд. участием, Саратов, 22–23 октября 2020 г. Саратов: Саратовский ГАУ, 2020. С. 14–20.
9. Ушакова И.В., Кульнев В.В. Биологическая реабилитация водных объектов и сточных вод методом коррекции альгоценоза // Коммунальный комплекс России. 2019. № 8 (182). С. 24–29.
10. Juan Wu, Shuiping Cheng, Zhu Li, Weijie Guo, Fei Zhong & Daqiang Yin. Case study on rehabilitation of a polluted urban water body in Yangtze River Basin // Environmental Science and Pollution Research. 2013. Vol. 20. P. 7038–7045.
11. Jha M., Markande Y., Markandey D. Restoration and Rejuvenation of Water Bodies Across Delhi-Ncr - An Overview // International Journal of Conservation Science. 2022. Vol. 13 (1). P. 233–248.
12. Xie Dong, Zhou Hengjie, Ji Haiting and AN Shuqing. Ecological Restoration of Degraded Wetlands in China // Journal of Resources and Ecology. 2013. Vol. 4. No. 1. P. 63–69.
13. Haichao Suia, Jihua Wanga, Zhen Lib, Qi Zenga, Xu Liua, Liu Rena, Chenyu Liua, Yanan Zhua, Lixin Lva, Qi Chea, Xiang Liub. Screening of ecological impact assessment indicators in urban water body restoration process // Ecological Indicators. 2020. Vol. 113.
14. Harshit Chawla, Santosh Kumar Singh, Anil Kumar Haritash. Reversing the damage: ecological restoration of polluted water bodies affected by pollutants due to anthropogenic activities // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. P. 127–143.
15. Морозова Е.Е. Развитие механизма реализации проектов экологической реабилитации водных объектов // Eurasia Green: тезисы работ участников Межд. конкурса научно-исслед. проектов молодых ученых, Екатеринбург, 16–19 апреля 2019 г. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2019. С. 57–63.
16. Шабанов В.А., Шабанова А.В. Управление качеством городской среды: два подхода к реабилитации водных объектов. DOI:10. / 23670/IRJ/2017.61.096.
17. Зацепин А.Н., Попов А.Н., Рыбина Е.А. Временные рекомендации по выбору метода восстановления и мелиорации водоема, Свердловск, 1986, 26 с.
18. Попов А.Н., Оболдина Г.А., Прохорова Н.Б. Концептуальные основы реабилитации поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 4. С. 4–17. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-4-1.
19. Зарубина Е.Ю. Воздействие режима уровня Новосибирского водохранилища на осуществление водного и берегового-водного фитоценоза. / науч. ред. А.Г. Лапилов, Д.А. Филип-

- пов, Э.В. Гарин: мат-лы VIII Всеросс. конф. с междунар. участием по водным макрофитам, пос. Борок, 16–20 октября 2015 г. Ярославль: Филигрань. С. 14–16.
20. Vollenweider R.A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerish Zeitschrift von Hydrology*, 1975. Bd. 37. P. 53–83.
 21. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
 22. Бульон В.В. Биотический поток вещества и энергии в системе «озеро и его водосбор» // *Успехи современной биологии*. 2018. Т. 138. № 5. С. 503–513.
 23. Бульон В.В. Диагностика биологической продуктивности озерных экосистем // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2019. № 3. С. 110–126. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-3-6.
 24. Håkanson L. & Boulion V.V. (2002) *The Lake Foodweb – Modelling Predation and Abiotic/Biotic Interactions*. Backhuys Publishers, Leiden.
 25. Попов А.Н., Браяловская В.А., Бердышева Г.В., Гневашев М.Г. Формирование химического и гидробиологического состава вод Волчихинского и Верхне-Макаровского водохранилищ// *Охрана природных вод России*. Екатеринбург, 1992. С. 155–176.
 26. Premazzi G., Cardoso A.C. Criteria for the identification of freshwater subject to eutrophication. *Final Report EI-JRC I-21020 Ispra ITALY*, European Commission, 2001: 66 p.
 27. Прыткова М.Я. Отечественный и зарубежный опыт производства дноуглубительных и дноочистительных работ в водоемах // *Теория и практика восстановления внутренних водоемов*. СПб, 2007. С. 280–289.
 28. Попов А.Н., Павлюк Т.Е., Мухутдинов В.Ф., Загайнова Е.В., Польшгалов А.С., Иманова В.В., Милицина О.А., Бутакова Е.А. К вопросу об апробации «Пособия по выбору приоритетных действий, направленных на экологическую реабилитацию водоёмов». Сообщение 1. Выбор методов реабилитации малопроточных водоемов (на примере озера Иртяш). *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2018. № 3. С. 50–74. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-3-4.

REFERENCES

1. Matveyeva A.A. On the issue of ecological rehabilitation of the Volgograd region water bodies. *Nauchnoye obespecheniye ustoychivogo razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: sb. materialov Mezhd. nauchno-prakt. konf., Solyonoye Zaymishche [Scientific support of agrarian sector sustainable development: proceedings of international scientific/practical conference, Solyonoye Zaymishche, August 10–12, 2021]*. RAS Caspian Agrarian Federal Scientific Center, 2021. p. 722–726.
2. Vasilyeva Z.E. Rehabilitation of urban water bodies. *Nauka i obrazovaniye v XXI veke: sb. Nauchnykh trudov Mezhd. nauchno-prakt. konf., [Science and education in XXI century: proceedings of international scientific/practical conference, Tambov. September 30, 2013]* Tambov: Yukom Consulting Company, 2013. PC. 26–28.
3. Krasnogorskaya N.N., Nafikova E.V., Sokolova O.V. Eco/bio/engineering approach to the water bodies' restoration and rehabilitation. *Nauka, obrazovaniye, proizvodstvo v resheniyi ekologicheskikh problem (Ekologia-2017). Mat-ly XIII Mezhd. nauchno-prakt. konf., Ufa. [Science, education and production in solving ecological problems (Ecology-2017). Proceedings of XIII of international scientific/practical conference, Ufa, April 30, 2017: Ufa State Aviation Technical University]*, 2017. Vol. II. P. 143–146.
4. Krivitskiy S.V. Ecological rehabilitation of water bodies. *Ekolgia i promyshlennost Rossiya [Ecology and industry of Russia]*. 2007. No. 5. P. 20–23.
5. Krivitskiy S.V. On the issue of ecological rehabilitation of water bodies. *Problemy, perspektivy i napravleniya innovatsionnogo razvitiya nauki; Sb. staey po itogam Mezhd. nauchno-prakt. konf., Omsk, 24 noyabrya, 2017 [Problems, prospects and directions of the science innovation development: proceedings of international scientific/practical conference, Omsk, November 24, 2017]* Omsk: Agency of International Studies, 2017. P. 149–153.

6. Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V. Justification of the Alay Kray water bodies ecological rehabilitation. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye [Water purification. Water treatment. Water supply]*. 2014. No. 2 (74). P. 4–12.
7. Rakhmetova A.E., Kutuzova E.I. The St. Petersburg water bodies status and ecological rehabilitation. *Nauka sredi nas [Science around us]*. 2018. No. 1 (5). P. 119–124.
8. Afonin V.A., Nasipova D.R. Substantiation of integrated measures on ecological rehabilitation of urbanized territories' water bodies. *Osnovy ratsionalnogo prirodopolzovaniya: Mat-ly VI Natsionalnoy conf. s mezhd. uchastiyem, Saratov, 22-23 oktyabry 2020 [Foundations of rational nature use: Proceedings of VI international scientific conference, Saratov, October 22023, 2020]* Saratov: Saratov GAU, 2020. P. 14–20.
9. Ushakova I.V., Kulnev V.V. Biological rehabilitation of water bodies and waste waters with algocenosis correction. *Kommunalniy kompleks Rossiyi [Municipal sector of Russia]*. 2019. No. 8 (182). P. 24–29.
10. Juan Wu, Shuiping Cheng, Zhu Li, Weijie Guo, Fei Zhong & Daqiang Yin. Case study on rehabilitation of a polluted urban water body in Yangtze River Basin. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. Vol. 20. P. 7038–7045.
11. Jha M., Markande Y., Markandey D. Restoration and Rejuvenation of Water Bodies Across Delhi-Ncr - An Overview. *International Journal of Conservation Science*. 2022. Vol. 13 (1). P. 233–248.
12. Xie Dong, Zhou Hengjie, Ji Haiting and AN Shuqing. Ecological Restoration of Degraded Wetlands in China. *Journal of Resources and Ecology*. 2013. Vol. 4. No. 1. P. 63–69.
13. Haichao Suia, Jihua Wang, Zhen Lib, Qi Zenga, Xu Liua, Liu Rena, Chenyu Liua, Yanan Zhua, Lixin Lva, Qi Chea, Xiang Liub. Screening of ecological impact assessment indicators in urban water body restoration process title. *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 113.
14. Harshit Chawla, Santosh Kumar Singh, Anil Kumar Haritash. Reversing the damage: ecological restoration of polluted water bodies' affected by pollutants due to anthropogenic activities. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. P. 127–143.
15. Morozova E.E. Development of the mechanism of the water bodies rehabilitation projects' implementation. *Eurasia Green: abstracts of proceedings of international contest of young researchers' projects, Ekaterinburg, April 16–19, 2019. Ekaterinburg: Ural State Economic University, 2019. P. 57–63.*
16. Shabanov V.A., Shabanova A.V. Management of the urban environment quality: two approaches to the water bodies' rehabilitation. DOI:10. / 23670/IRJ/2017.61.096.
17. Zatsepin A.N., Krivitskiy S.V., Rybina E.L. Provisional recommendations on the selection of a water body restoration and reclamation method, Sverdlovsk, 1986, 26 p.
18. Popov A.N., Oboldina G.A., Prokhorova N.B. Conceptual foundations of the surface water bodies' rehabilitation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2017. № 4. P. 4–17. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-4-1.
19. Zarubina E.Y. Impact of the Novosibirsk Reservoir level regime on the water and bank-water phytocenosis production. Edited by A.G. Lapirov, D.A. Filippov, E.V. Garin: materialy VIII Vseross. konf. s mezhdunar. uchastiyem po vodnym makrofitam [*proceedings of VII all-Russian conference with international participation devoted to aquatic macrophytes*], Borok, October 16-20, 2015. Yaroslavl: Filigran. P. 14-16 (In Russ.).
20. Vollenweider R.A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerish Zeitschrift von Hydrology*, 1975. Bd. 37. P. 53–83.
21. Alimov A.F. Elements of the theory of aquatic ecosystems functioning. St. Petersburg: Nauka, 2000. 147 p.
22. Boulion V.V. Biotic flow of matter and energy in the "lake and its catchment" system. *Uspekhi sovremennoy biologiyi [Achievement of contemporary biology]*. 2018. Vol. 138. No. 5. P. 503–513.
23. Boulion V.V. Diagnostics of the lake ecosystems biological productivity. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. No. 3. P. 110–126. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-3-6.
24. Håkanson L. & Boulion V.V. (2002) The Lake Foodweb – Modelling Predation and Abiotic/Biotic Interactions. Backhuys Publishers, Leiden.

25. Popov A.N., Brayalovskaya V.L., Berdysheva G.V., Gnevashev M.G. Formation of the Volchihka and Verkhne-Makarovo reservoirs water chemical and hydro/biological composition. *Okhrana prirodnykh vod Rossii* [*Protection of natural waters of Russia*]. Ekaterinburg, 1992. P. 155–176.
26. Premazzi G., Cardoso A.C. Criteria for the identification of freshwater subject to eutrophication. Final Report EI-JRC I-21020 Ispra ITALY, European Commission, 2001: 66 p.
27. Prytkova M.Y. Domestic and foreign experience in the water bodies bottom deepening and cleaning. *Teoriya i praktika vosstanovleniya vnutrennikh vodoyemov* [Theory and practice of the inner water bodies' restoration]. Saint-Petersburg. 2007. P. 280–289.
28. Popov A.N., Pavluk T.E., Mukhutdinov V.F., Zagaynova E.V., Polygalov A.S., Imanova V.V., Militina O.A., Butakova E.A. On the issue of approval of the “Manual on the choosing of the priority actions aimed at the water bodies ecological rehabilitation” Communication 1. Choosing of the rehabilitation methods for low-running water bodies (the Lake Irtyash as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. No. 3, 2018. P. 50–74.

Сведения об авторе:

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

About the author:

Aleksandr N. Popov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head, Department of scientific/methodical support of water bodies' restoration and protection, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Ural Branch, ul. Mira, 23, Ekaterinburg, Russia; e-mail: wrm@wrm.ru