

УДК 556.55:556.5.06+502.51(285):33

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СИСТЕМЫ «ОЗЕРО – ВОДОСБОР» КАК ПРИРОДНОГО КАПИТАЛА

Н. Н. Филатов^{*1}, Ю. Н. Лукина¹, Н. Е. Галахина¹, Н. М. Калинкина¹,
Е. В. Теканова¹, Я. П. Молчанова²

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
^{*}nfilatov@rambler.ru

² Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева
(Миусская пл., 9, Москва, Россия, 125047)

Статья касается вопросов рассмотрения природных ресурсов озер как природного капитала и ключевого компонента устойчивого социально-экономического развития регионов. Дается представление о принятых как в РФ, так и за рубежом подходах к оценке мониторинга водных объектов, методах оценки качества вод, трофического статуса озер, анализируются достоинства и недостатки подходов. Получены оценки ассимиляционной емкости экосистемы Онежского озера. Обосновываются наиболее значимые показатели, характеризующие состояние качества вод, трофический статус экосистем больших озер. Предложен возможный набор основных показателей и моделей, с помощью которых можно оценивать состояние системы «озеро – водосбор» и прогнозировать ее изменения. Дан пример комплексного рассмотрения состояния природной среды для Онежского озера и водосбора. Представлены результаты системного подхода для диагноза и прогнозирования изменений этой системы до 2050 г. при разных климатических сценариях RCP и развитии экономики региона. Разработаны подходы для дальнейшей оценки экосистемных услуг.

Ключевые слова: экосистемы; озера; водосбор; эвтрофирование; ресурсы; ассимиляционный потенциал; модели; прогнозы; природный капитал; экосистемные услуги

Для цитирования: Филатов Н. Н., Лукина Ю. Н., Галахина Н. Е., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Молчанова Я. П. К вопросу оценки состояния и прогнозирования изменений системы «озеро – водосбор» как природного капитала // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 131–150. doi: 10.17076/lim2233

Финансирование. Работа выполнена по договору № E261949-1 ФГАУ «НИИ «ЦЭПП».

**N. N. Filatov^{1*}, Yu. N. Lukina¹, N. E. Galakhina¹, N. M. Kalinkina¹,
E. V. Tekanova¹, Ya. P. Molchanova². ON THE QUESTION OF ASSESSING
THE CURRENT STATE AND PREDICTING CHANGES IN THE LAKE-
CATCHMENT SYSTEM AS A NATURAL ASSET**

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *nfilatov@rambler.ru

²D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (9 Miusskaya Sq., 125047 Moscow, Russia)

The article substantiates the importance of taking account of the natural resources of lakes as a component of the natural capital and a key factor for sustainable socio-economic development of regions. An example of a comprehensive review of the state of the natural environment is presented through the case of Lake Onego and its catchment area. An overview of the approaches adopted both in the Russian Federation and abroad to assessing and monitoring water bodies, evaluating the water quality and the trophic status of lakes is provided, with a discussion of the strengths and weaknesses of these approaches. The assimilation capacity of Lake Onego ecosystem is estimated. The most significant indicators of water quality and the trophic status of large lake ecosystems are substantiated. A possible set of key indicators and models for assessing the state of the lake-catchment system and predicting its changes is proposed. The results of a systems approach to diagnosing and forecasting changes in the Onego lake-catchment system up to 2050 under different RCP climate and economic development scenarios are presented. Approaches for further assessment of ecosystem services and natural units of Lake Onego and its catchment area have been developed.

Keywords: ecosystems; lakes; catchment; eutrophication; resources; assimilation potential; models; forecasts; natural capital; ecosystem services

For citation: Filatov N. N., Lukina Yu. N., Galakhina N. E., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Molchanova Ya. P. On the question of assessing the current state and predicting changes in the lake-catchment system as a natural asset. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 131–150. doi: 10.17076/lim2233

Funding. The work was implemented under contract #E261949-1 with Environmental Industrial Policy Center.

Введение

Практика хозяйственной деятельности сталкивается с трудноразрешимым противоречием между экономическими и экологическими приоритетами. Для разрешения противоречий между ними требуется найти возможности изменения системы хозяйствования таким образом, чтобы сохранение и восстановление природы не воспринималось как неизбежные издержки, а стало целью и смыслом экономической деятельности [Скобелев, 2025]. Важнейшие природные экосистемы, в том числе водные, которые являются источниками для жизнедеятельности человека, могут рассматриваться как экологические доноры. Понятие «услуги окружающей среды», впервые предложенное в 1970 г., в 1987 г. было заменено на «экосистемные услуги» (ЭУ), которое более точно отразило значимость экосистемного подхода к природопользованию. В основу этого понятия заложена идея

экономической мотивации ограничения эксплуатации природных экосистем, при этом их сохранение должно стать важным и выгодным. В работе [Constanza, Daly, 1987] введено представление о натуральном капитале в сопоставлении его с банковским, промышленным и информационным капиталами. Согласно данному определению услуги экосистемы представляют собой потоки вещества, энергии и информации от естественных природных капиталов, которые объединяются с услугами производственного и человеческого капиталов, определяя благосостояние человечества. В работах [Costanza et al., 1997; Faber et al., 2006] сформулирована такая область исследования, как «экологическая экономика», ориентированная на решение проблем устойчивого развития и определяющая пути интеграции экологических и экономических теоретико-методологических подходов.

На Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде в г. Дублине

в 1992 г. провозглашен принцип экономической ценности воды и признания ее экономическим благом. В ряд экосистемных услуг водных объектов входят: водоснабжение, рыболовство, использование в целях аквакультуры, рекреации, водного туризма, транспорта, энергетики и пр. При этом позиция экономической науки, постулирующей «затратный» характер оценки экосистемных услуг (например, затраты, связанные с научными исследованиями и мониторингом состояния экосистем, очисткой сточных вод и др.), приводит к недооценке их реальной ценности и является одной из основных причин невыгодной для человечества деградации экосистем [Бобылев, 2025]. Необходимо различать природный капитал, дающий выгоды (доходы), связанные с эксплуатацией (или сохранением) природных благ, и экосистемный капитал [Экосистемные..., 2016], который не учитывает ресурсы полезных ископаемых и абиотические факторы. Экосистемные услуги понимаются как польза, которую человек получает от функционирования природных экосистем. С экономической точки зрения разрушение экосистем и их функций следует рассматривать как потерю основных ресурсных активов. Для сохранения этих активов в мировой практике природопользования внедрялась система платежей, которая заключается не в погашении негативного воздействия потенциальным загрязнителем в соответствии с известным принципом «загрязнитель платит», а в стимулировании улучшения окружающей среды потенциальным загрязнителем, что можно описать словосочетанием «пользователь платит» [Бобылев, 2025].

Ярким примером недооценки значимости экосистемных услуг, природных ресурсов (природного капитала) водоемов является попытка принятия Закона об охране Ладожского и Онежского озер, по примеру уже принятого в 1999 г. Закона об охране озера Байкал. Представленный в 2016 г. на рассмотрение в Госдуму РФ проект Закона об охране озер не был поддержан, так как имел недостаточное экономическое обоснование и мог быть «слишком затратным». Например, вложения средств в виде двух федеральных целевых программ для обеспечения Закона об охране озера Байкал не привели к намеченным целям. В случае, если озера будут продолжать эвтрофироваться, загрязняться, их ресурсы могут в конечном итоге обесцениться и экономические потери на порядки превысят затраты на реализацию правовых актов и целевых программ.

Современное состояние крупных озер свидетельствует о продолжающейся деградации их экосистем во всем мире [Дмитриев и др.,

2010; Jenny et al., 2020]. Причины деградации озер обусловлены возрастающей антропогенной нагрузкой при росте населения, глобальным потеплением климата, несовершенной системой хозяйствования и недостатками управления водным хозяйством.

В современных условиях требуются подходы для объективной оценки состояния и прогноза изменений природных систем с целью их рационального использования и сохранения для будущих поколений. Необходимо обосновать набор показателей для объективной оценки состояния, предложить подходы по усовершенствованию и гармонизации системы наблюдений, мониторинга, выполняемых разными ведомствами, а также совершенствовать методы прогноза изменений водных систем для поддержки принятия управленческих решений. Цель настоящей статьи – представить методы, критерии оценивания состояния и прогнозирования изменений хорошо изученной, контролируемой как государственными органами, так и исследовательскими организациями водной системы «Онежское озеро – водосбор» для дальнейшей оценки экосистемных услуг, природного капитала.

Обоснование основных показателей для оценки состояния и прогнозирования системы «озеро – водосбор»

Об экономической ценности экологических услуг озер

До недавнего времени ресурсы великих озер не имели экономической оценки и не были учтены в общем балансе национального богатства страны. Как отмечается в работе Д. О. Скобелева [2025], современные механизмы управления экономикой ошибочно перераспределяют ресурсы в сторону сектора финансовых услуг, при этом необходимо выделять природный капитал как ключевой компонент устойчивого социально-экономического развития. Авторы выделяют три составляющие методологического основания комплексной оценки стоимости экосистемных услуг: экологическую – как оценку способности экосистем выполнять свои функции; экономическую, связанную с интеграцией оценки в механизмы принятия решений, и социальную – необходимую для обеспечения согласованных решений общества и снятия противоречий [Costanza et al., 2014]. В работе Н. Л. Болотовой с соавторами [2022] впервые дана ориентировочная экономическая оценка ресурсов Ладожского озера (экосистемных услуг), которая находится в пределах 3,2–24,7 млрд долл./год.

Негативные процессы при антропогенном воздействии в условиях глобального потепления на водную среду снижают ценность ресурсов, изменяя экосистемные функции и создавая угрозы их потерь вследствие эвтрофирования озера, а также поступления загрязняющих веществ техногенного характера. Под влиянием антропогенных и климатических воздействий изменяется пространственная картина распределения продукционных услуг, связанная с влиянием на качество воды трофического статуса в разных частях озера (прибрежной, литоральной, центральной). Так, центральная часть акватории Ладожского озера в последние годы имела слабomezотрофный статус (при олиготрофном характере гипolimниона), северная – олиготрофный, западная – мезотрофный, а южная часть (Свирская и Волховская губы) – слабоэвтрофный [Современное..., 2021]. Похожая ситуация отмечается и для Онежского озера, когда центральная часть озера имеет олиготрофный статус, а Кондопожская губа – альфа-эвтрофный [Калинкина и др., 2023; Филатов и др., 2025]. В этом случае для великих озер России требуется учитывать пространственную неоднородность изучаемого объекта, а для моделирования экосистемы применять математические 3D-модели [Меншуткин и др., 2014]. В работе Н. Л. Болотовой с соавторами [2022] показано, что потенциальная стоимость питьевой воды Ладожского озера составляет около 690 миллиардов рублей в год, при установленном в 2021 г. размере платежа

813,96 руб. за 1,0 тыс. м³ воды [Ситкина, 2010]. Потенциальные экосистемные услуги Ладожского озера с учетом других экосистемных услуг эквивалентны сумме около 1,6 триллиона рублей. Общая стоимость некоторых уже реализуемых компонентов экосистемных услуг Ладожского озера достигает 4166,7 млн руб./год, включая потребление питьевой воды, развитие аквакультуры, туристические и транспортные услуги. Для Онежского озера такие расчеты еще предстоит сделать, но его экосистемные услуги, по экспертной оценке, могут стоить примерно в 3–4 раза меньше потенциальных экосистемных услуг Ладожского озера. Таким образом, результатом использования понятия «экосистемные услуги» стало признание возможности учета их стоимостной значимости для управленческих решений в сфере природопользования, которые невозможны без определения перечня объективных показателей, которые будут впоследствии приниматься при расчете экономических оценок.

О подходах, применяемых в оценке качества вод и состояния озер

В настоящее время подходы к оценке качества вод и последствий воздействия антропогенных факторов (эвтрофирование, токсификация) могут быть отнесены к двум категориям (рис. 1): химический контроль – идентификация и количественное определение составляющих (вещества, физические величины);



Рис. 1. Блок-схема методов оценки качества вод водоема [Моисеенко, 2017]

Fig. 1. Block diagram of methods for assessing the quality of water in a reservoir [Moiseenko, 2017]

биологический контроль – оценка воздействия на живые организмы и оценка последующих эффектов на индивидуальном, популяционном уровне и уровне сообщества, основанная на методах биотестирования (информация об относительной токсичности отдельных веществ или элементов) и биоиндикации (информация о состоянии организмов, популяций и сообществ водной экосистемы).

Химический мониторинг, проводимый лицензированными организациями, основан на анализе состава и свойств воды и сравнении с существующими нормативными значениями [Никаноров, Емельянова, 2005], как правило, со значениями предельно допустимых концентраций (ПДК). На основе сопоставления измеренных концентраций отдельных загрязняющих веществ в водном объекте со значениями ПДК принимается решение об ограничении антропогенных нагрузок. Для оценки загрязненности воды используются и относительные величины – кратность превышения ПДК и повторяемость случаев превышения ПДК. До 2002 г. наиболее широко используемым и официально признанным был расчет индекса загрязнения воды (ИЗВ). На смену индексу ИЗВ был введен удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИВЗ), который учитывает частоту и кратность превышения ПДК и может варьировать в водах различной степени загрязненности от 1 до 16. В отличие от ИЗВ расчет УКИВЗ осуществляется с учетом более широкого числа показателей, перечень которых может быть дополнен специфическими загрязняющими веществами, характерными для конкретного водного объекта. Опыт применения методик расчета ИЗВ и УКИВЗ для озер Карелии показал, что они зачастую отражают региональную специфику природных вод, а не их загрязнение [Лозовик, 2015]. На основании ПДК сложно сделать заключение об основных тенденциях антропогенных преобразований качества вод в условиях комплексных нагрузок на водосборы, включая локальные сбросы, неорганизованные стоки и аэротехногенные потоки регионального и трансграничного характера. ПДК не учитывают природные условия водного объекта и эффекты синергизма, антагонизма, суммации. Именно поэтому гидрохимические методы по критерию ПДК не гарантируют адекватного определения вреда, что затрудняет оценку состояния экосистемы и качества водной среды по одним лишь абиотическим параметрам, а нормирование разрешенных сбросов загрязняющих веществ, например, в Ладожское и Онежское озера для снижения нагрузки не является универсальным средством предотвращения

деградации экосистем озер [Современное..., 2021]. Помимо ПДК активно разрабатывались концепции и методы расчета предельно допустимых возможных воздействий (ПДВВ) и предельно допустимых сбросов (ПДС). Последние основываются на гидрологических факторах и способности водных систем к разбавлению и самоочищению до уровня ПДК по отдельным ингредиентам [Никаноров, Емельянова, 2005].

В мировой практике используется индекс качества воды WQI, разработанный национальной организацией по санитарии (США) и включающий 9 параметров: растворенный кислород, коли-индекс, pH, БПК₅, нитраты, фосфаты, температура, мутность, взвешенные вещества. В Канаде был предложен индекс качества воды CCME WQI [Canadian..., 2004], значения которого могут варьировать от 0 (низкое качество) до 100 (высокое качество). Индексы CCME WQI, рассчитанные для Онежского озера по современным данным химического состава воды, согласуются с его состоянием, оцениваемым по гидрохимическим данным [Galakhina et al., 2022].

Биологический мониторинг – это оценка загрязненности водоема или ухудшения качества воды с использованием водных организмов. Значимость биологического контроля состояния экосистемы исходит из самого понятия «экосистема» [Одум, 1975]. Главной характеристикой экосистемы является наличие устойчивых во времени потоков вещества и энергии между абиотической и биотической частями экосистемы. Поэтому биологические показатели выступают сигнальным «откликом» экосистемы на изменение абиотических условий.

Существуют два основных вида биологического контроля – биотестирование и биоиндикация. Биотестирование – это оценка пригодности природных вод для жизнедеятельности гидробионтов, в том числе при условии влияния на них техногенного фактора; достоинством его является сравнительно быстрое получение информации о токсичности вод. В основе метода – экспериментальное установление концентраций загрязняющих веществ, которые вызывают наиболее значимые и легко определяемые нарушения у водных организмов: смертность, выживаемость, физиологические или патологические нарушения. Пороговое значение, вызывающее видимые отклонения от нормы у наиболее чувствительной группы организмов, принимается как ПДК опасного вещества [Жулидов, Хоружая, 1994]. В качестве биотестов используются организмы различных систематических групп: бактерии, водоросли, беспозвоночные, рыбы.

Биоиндикация – это обнаружение и определение экологически значимых природных и антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов непосредственно в среде их обитания [Ашихмина, 2005]. Биоиндикация направлена на оценку состояния водоемов по индикаторным видам гидробионтов (количественным и функциональным показателям). Текущие изменения состояния экосистем можно отследить на планктонных сообществах (главным образом, одноклеточных организмах), поскольку они первыми реагируют на изменение состояния среды в связи с быстрым обменом веществ. Кумулятивный эффект загрязнения или эвтрофирования хорошо отражает состояние бентосных сообществ, главным образом глубоководных. Состояние ихтиоценозов отражает высокую степень трансформации экосистем, т. к. в случае воздействия токсичного фактора многолетний жизненный цикл рыб способствует аккумулярованию токсикантов. В случае эвтрофирования меняется структура ихтиоценозов с тенденцией к измельчанию, повышению продуктивности ихтиофауны. Изменяется видовой состав, возрастает доля эврибионтных видов, что снижает промысловую ценность ихтиоценозов. Подходы к оценке состояния водных экосистем на основе биоиндикации хорошо разработаны и их можно разделить на несколько категорий.

Система оценки трофического статуса. Проблемой глобального масштаба в конце XX в. стало антропогенное эвтрофирование, которое приводит к вторичному загрязнению, деградации и потере ресурсной ценности пресноводных экосистем. Исходя из определений процесса эвтрофирования, оценка трофности должна проводиться по совокупности показателей, характеризующих продукцию органического вещества в водоеме. В системе оценки трофического статуса ключевыми являются трофические шкалы и индексы. Современная концепция трофии базируется на принципе биологической продуктивности, по уровню которого приняты три основных состояния водоема – олиготрофное, мезотрофное, эвтрофное с разной степенью их детализации [Rodhe, 1967; Винберг, 1974; Бульон, 1983]. Уровень биологической продуктивности озер всегда связан с определенными лимнологическими параметрами, характером водосбора, особенностями гидрографической сети и другими компонентами, объединенными в общую систему как внутри водоема, так и в системе «водосбор – озеро». Поэтому определение трофического статуса водоема может включать использование нескольких показателей, среди которых

наиболее информативными являются *первичная продукция, хлорофилл а и общий фосфор*, на основе которых рассчитываются индексы трофического состояния.

Индексы трофического состояния поверхностных вод можно разделить на две группы. К первой группе относятся индексы, основанные на математической интерполяции коррелирующих значений традиционных биотических и абиотических показателей. Ко второй группе относятся индексы, характеризующие структуру биоценозов: индексы сравнения, видового обилия и видового разнообразия. Наиболее распространенные индексы, применяемые для озер [Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020]: *трофического состояния (TSI)*, разработанный Карлсоном [Carlson, 1977]; *оценки эвтрофирования озер (LEI)*; индекс *трофического состояния (ИТС)*, предложенный В. В. Бульоном [1983]; *трофический индекс (TRIX)* [Vollenweider et al., 1982] и ряд других. Критерии трофии являются основными при оценке водоемов в условиях биогенного загрязнения, провоцирующего эвтрофирование. Детально разработаны трофические шкалы для водоемов средних и северных широт [Китаев, 2007], а для водоемов Карелии с учетом гумусности с повышенной цветностью воды (рис. 2) [Лозовик, 2015] критерии уровня трофии развиваются и детализируются с учетом региональной специфики (рис. 2).

Система сапробности позволяет классифицировать водоем по наличию и количеству организмов-индикаторов, чувствительных к органическому загрязнению воды (ксеносапробная, олигосапробная, мезосапробная, полисапробная) [Rodhe, 1967]. Дополнительно для оценки качества воды используются микробиологические показатели: обнаружение и определение количества водных бактерий, адаптированных к потреблению легкоминерализуемого органического вещества, нефтепродуктов и фенольных соединений.

О подходах к организации и ведению мониторинга водных объектов

В Российской Федерации управленческие функции, связанные с мониторингом водных объектов, распределены между большим количеством административных органов, что делает координацию работ по реализации мониторинга разными ведомствами трудной задачей. В связи с этим для понимания процессов, происходящих в водных экосистемах, требуется организация интегрированного мониторинга водоема и водосбора, что важно для решения



Рис. 2. Распределение $P_{общ}$ по классам трофности с учетом гумусности воды [Лозовик, 2013]
 Fig. 2. Distribution of P_{total} by trophic classes taking into account the humus content of the water [Lozovik, 2013]

задач управления ресурсами озер и сохранения их экосистем. Кроме того, система мониторинга водных объектов региона существует относительно обособленно от системы мониторинга показателей социально-экономического развития территории [Данилов-Данильян, 2015]. Для системы «водоем – водосбор» должен реализовываться принцип интегрированного управления, который предусматривает применение системного подхода. С помощью автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) осуществляется обеспечение процедуры управления ресурсами озер, сохранения их экосистем и влияние на хозяйственную деятельность на водосборе.

О государственном мониторинге водных объектов

В системе Росгидромета разработан обширный арсенал средств для оценки качества воды и экологического состояния водных объектов по широкому спектру показателей. Одним из основных средств для организации и проведения МВО являются руководящие документы (РД). Отметим несколько важных для настоящей работы. Это РД 52.24.309-2016, регламентирующий состав измерений, расположение станций, частоту отбора проб и другие характеристики. В нем декларируются следующие основные принципы организации системы наблюдений: комплексность и систематичность наблюдений; согласованность сроков их проведения с характерными фазами гидрологического режима водных объектов; определение состава и свойств воды едиными или сопоставимыми методиками. РД 52.24.620-2000 представляет методику оценки уровня антропогенного эвтрофирования пресноводных

экосистем по приоритетным показателям перестройки структурной организации фитопланктонных сообществ при усилении антропогенного воздействия. РД 52.24.635-2002 включает характеристику сапробности; параметры токсичности воды и донных отложений; РД 52.24.309-2004, по которому оценивают класс качества воды по характеристикам планктонных сообществ, макрозообентоса и микробиологическим показателям, содержит характеристики состояния и параметры развития водных сообществ, характеристики трофического статуса (трофности) водного объекта (состояние фитопланктона, площадь «цветения», содержание хлорофилла а).

Специальный документ разработан с целью гармонизации Российской системы мониторинга водных объектов с мониторингом, реализуемым Директивой Европейского Союза – РД 52.24.763-2012. Европейская Рамочная директива (Water Framework Directive – WFD), принятая Европейским парламентом в 2000 г., стала существенным толчком к развитию и совершенствованию методов мониторинга [Directive..., 2000]. WFD и тесно связанная с ней информационная сеть EuroWaterNet образуют статистически стратифицированную систему унифицированных стандартов, приспособленную для решения конкретных задач охраны, использования и управления водными ресурсами. Директива определяет развитие и совершенствование систем биоиндикации в странах ЕС. Согласно WFD вводится специальная процедура создания интеркалибровочной сети объектов стран ЕС для оценки биологического состояния водных объектов каждого типа в соответствии с утвержденным реестром и тщательный выбор эталонных створов или целых водных объектов; учет региональных особенностей. Несмотря на значительное число РД в РФ,

посвященных оценке качества воды и состояния водных объектов, в них есть ряд недостатков, среди которых: отсутствие официально утвержденных региональных ПДК; отсутствие ПДК для таких важнейших биогенных веществ, как общий фосфор ($P_{\text{общ}}$) и общий азот ($N_{\text{общ}}$), определяющих процесс эвтрофирования большинства пресноводных водоемов.

К значительным недостаткам существующей системы мониторинга Росгидромета на Ладожском и Онежском озерах могут быть отнесены следующие факторы: отсутствие регулярных наблюдений за гидробиологическими и токсикологическими характеристиками воды, донных отложений; неполнота программы гидрохимического мониторинга; существенное сокращение сети станций наблюдений на озерах. Отметим, что в последние примерно 20 лет из-за отсутствия собственного флота подразделениями Росгидромета не проводятся наблюдения на акватории Онежского озера. Важным фактором является трудная сопоставимость методик наблюдений (сроков, горизонтов, створов), аналитических методов в Росгидромете и организациях Минобрнауки РФ, которые проводят исследования на озерах. В ИВПС КарНЦ РАН в 2022–2024 гг. впервые проведено сопоставление информации о сезонном содержании биогенных элементов в основных притоках Онежского озера – реках Шуя и Водла, полученных ИВПС и КарЦГМС с 1980 по 2022 гг. [Галахина, Зобков, 2024]. При этом данные за 1980–1994 гг. пришлось исключить из рассмотрения, так как они выполнялись по разным методикам. В результате корректировки и объединения данных двух организаций для Онежского озера были впервые реконструированы ряды содержания фосфора и азотсодержащих веществ в реках Шуя и Водла за 1995–2022 гг. Для оценки вклада точечных источников в формирование биогенной нагрузки на озеро используются доступные данные статистических форм 2-ТП (водхоз), которые, к сожалению, оказались ненадежными для анализа баланса поступления биогенных веществ от разных источников [Лозовик и др., 2016; Литвинова и др., 2021].

Экологический мониторинг

Теоретической основой экологического мониторинга¹ является экосистемный подход, то есть оценка структуры и функционирования экосистемы, включая круговорот веществ, пищевые и конкурентные отношения, видовое

разнообразие сообществ, динамику численности популяций [Абакумов, Сущеня, 1991]. Поэтому именно биологическим методам доступна оценка последствий загрязнения по степени нарушенности водной экосистемы [Винберг, 1974; Абакумов, Сущеня, 1991]. Известно, что не существует единого универсального критерия по отношению к оценке разнообразных антропогенных воздействий. Например, для оценки эвтрофирования водоемов наиболее информативным индикатором является фитопланктон, для определения закисления вод информативен зообентос, а для оценки токсичного загрязнения – организм рыб. Итоговая экспертная характеристика экологического состояния водного объекта основывается на общей сумме всех признаков/критериев, включая структурные (видовой состав, численность, биоразнообразие, соотношение видов различной экологической валентности, характеристики их сапробности) и функциональные характеристики водных сообществ (показатели продукции, деструкции и др.). При этом система критериев интегральной оценки экологического состояния должна отвечать следующим требованиям: отражать специфику загрязнения; включать наиболее чувствительные индикаторы; учитывать способность экосистемы к восстановлению после нарушений/«возмущений» [Моисеенко, 2017].

Гидробиологические показатели для оценки состояния экосистемы Онежского озера

Низкая минерализация, повышенная цветность воды Онежского озера, малая доступность фосфора в сочетании с низкой среднегодовой температурой воды влияют на слабую метаболическую активность и невысокий уровень развития водных сообществ и определяют слабые самоочистительные возможности водной экосистемы. В результате избыточного поступления минеральных, биогенных, органических и взвешенных веществ изменяется гидрохимический режим, прогрессируют процессы эвтрофирования, что является причиной ухудшения качества воды. Особую тревогу вызывает состояние северо-западных заливов Онежского озера (Кондопожская и Петрозаводская губы), длительное время испытывающих воздействие коммунально-промышленных центров и рыбоводных предприятий. При этом зона накопления загрязняющих и биогенных веществ расширяется, распространяясь на сопредельные глубоководные участки Большого и Центрального Онего. На современном этапе озерного генезиса экосистемы Онежского

¹ Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 26.12.2024) «Об охране окружающей среды».

озера и озерно-речных систем его водосборной территории функционируют в условиях антропогенного воздействия и климатической изменчивости, интенсивность которых определяет основные тенденции их изменений и может стать причиной снижения как природной, так и экономической ценности водоемов [Диагноз..., 2020].

Кондопожская губа представляет наиболее проблемный район Онежского озера с точки зрения комплексного воздействия от точечных источников (городские стоки), диффузного стока с водосбора, сточных вод целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) и форелевых хозяйств, которые являются поставщиками минерального фосфора, органических и взвешенных веществ, провоцирующих эвтрофирование [Крупнейшие..., 2015; Калинкина и др., 2021; Галахина, Зобков, 2024]. Воды р. Суны – дополнительный источник пополнения фосфором Кондопожской губы. Подобная интенсивная фосфорная нагрузка приводит к формированию сильного дефицита кислорода и к высоким концентрациям минерального фосфора (787 мкг/л) в придонных слоях [Галахина, Зобков, 2024]; наблюдаются процессы вторичного загрязнения водной среды фосфором из донных отложений, что определяет серьезные изменения в структуре бентосных сообществ и развитие цианобактерий. Выделим наиболее важные характеристики для определения базовых показателей и подходов для гидробиологического мониторинга состояния Онежского озера.

Фитопланктон, являясь начальным звеном трофической сети и непосредственным потребителем фосфора, первым реагирует на биогенное загрязнение. Высокая скорость оборота биомассы одноклеточных водорослей способствует быстрой реакции на изменение концентраций биогенных веществ, отражая текущую ситуацию на водоеме. *Хлорофилл а* – важнейший показатель для оперативной оценки количества фитопланктона и его функциональной активности. Первичная продукция (РР), являющаяся прямым показателем роста и активности фитопланктона, хорошо зарекомендовала себя в долгосрочных исследованиях [Бульон, 1983]. Для Онежского озера показатель хлорофилла *а* и РР успешно апробирован при моделировании продуктивности экосистемы озера [Isaev et al., 2022], и имеется возможность определения хлорофилла *а* по данным дистанционных измерений [Баклагин, 2023].

Численность цианобактерий служит важнейшим показателем текущего состояния экосистемы, поскольку среди них существуют

виды, способные к выделению цианотоксинов – сильнейших растительных ядов. В Онежском озере отмечается цветение цианобактерий в северной части большого олиготрофного озера [Теканова и др., 2023]. В условиях летней изоляции гипolimниона в глубоких озерах могут формироваться зоны «напряжения», связанные с накоплением на дне органического вещества, синтезированного в верхних слоях воды, а также органического вещества техногенного происхождения.

Бентос отражает кумулятивные эффекты загрязнения водоемов. Биогенное загрязнение, накопление органического вещества в донных отложениях и доступных кормовых ресурсов в виде осевшего фитопланктона и детрита на дне приводит к увеличению продуктивности и, в конечном итоге, к увеличению биомассы бентоса, изменению структуры бентосного сообщества. *Амфиподно-олигохетный индекс* применяется для оценки степени изменения донной системы Онежского озера в процессе эвтрофирования. Он выражается как соотношение численности основных групп бентоса: амфипод (чувствительные оксифильные реликтовые рачки *Monoporeia affinis*) и малощетинковых червей, устойчивых к загрязнению. Кроме того, *Monoporeia affinis* является основным кормовым объектом ценных видов рыб (сигов), поэтому его элиминация из состава сообщества будет оказывать влияние на структуру ихтиоценозов и уловов, снижение рыбохозяйственного значения водоема.

Рыбы – важнейшие индикаторы токсигенного загрязнения водных объектов [Моисеенко, 2017]. Для исследований рыб используются морфологические, физиологические, гистологические, гематологические, биохимические, репродуктивные и эндокринные параметры, позволяющие выявить как кратковременные эффекты, так и продолжительное действие сублетальных доз загрязняющих веществ. Патологические изменения в организме рыб позволяют определить степень токсичности водной среды, оценить кумулятивные эффекты, а также сформировать представление о потенциальной опасности веществ для человека [Livingstone, 2003].

Фенологический подход к оценке состояния экосистемы Онежского озера

Фенологический подход исследования заключается в идентификации сроков фенофаза на основе изучения сезонных сукцессий планктонного сообщества, определяемых температурным режимом озера, световым режимом и динамикой трофического ресурса.

Для Онежского озера фенологический подход впервые разработан и опробован на зоопланктоне, в сезонном развитии которого выделены четыре фенофазы, различающиеся структурой сообщества. Разработанные подходы были применены к анализу сезонного цикла первичной продукции, который показал, что ее динамика в открытом плесе озера синхронизирована с цикличностью температуры воды, хлорофилла *a* и недиатомового фитопланктона. В противофазе с этими параметрами происходит развитие диатомовых водорослей [Теканова и др., 2023].

Об ассимиляционном потенциале озер

Ассимиляционный потенциал (АП) природной среды [Гусев и др., 1997] – это самовосстановительная способность по отношению к поступлению в природную среду вещества и энергии в результате хозяйственной деятельности. АП является свойством экологических систем, в том числе и экосистем озер, «сопротивляться» внешним воздействиям. В зарубежной литературе есть термин «*carrying capacity of environment*», который переводится как «пропускная способность окружающей природной среды» [Arrow et al., 1995]. Термин был введен в связи с обсуждением проблем взаимосвязи между экономическим ростом и качеством природной среды. АП как ограниченный природный ресурс нуждается в экономической оценке. В работах [Руховец и др., 2007; Астраханцев и др., 2015] получены количественные и экономические оценки АП для Ладожского и Онежского озер в условиях влияния глобального потепления и изменений антропогенной нагрузки. В виде количественной оценки АП предложено принять систему лимитов (по ингредиентам) на объемы сброса загрязняющих веществ и биогенов (ЗВ и Б), соблюдение которых сохраняет устойчивость водных экосистем озер. В вычислительных экспериментах [Руховец и др., 2007; Руховец, Филатов, 2014] получены оценки АП по сбросу биогенов, при которых озеро сохраняет свой трофический статус: для Ладожского озера оценка АП по сбросу фосфора – 2500 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$; для Онежского – 800 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и по сбросу азота – 15 000 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$. В этих работах показано, что по крайней мере до 2010 г. изменения климата на водосборе Ладожского и Онежского озер не вносили заметных изменений в функционирование экосистем озер, и поэтому АП экосистемы сохранился. Полученные оценки могут быть использованы как начальные значения, например, для рыночного механизма распределения квот на сбросы.

К выбору показателей для интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор»

В 1999 г. представителями нескольких стран в рамках международного гранта ТАСИС был разработан Проект интегрированной программы природоохранного мониторинга для Ладожского озера, который учитывал опыт организации и проведения мониторинга и управления ресурсами озер как в России, так и в странах ЕС и Северной Америки [Вильянен и др., 1999]. Интегрированный мониторинг системы «водоем – водосбор» осуществляется путем комбинации геофизических, химических и биологических наблюдений с использованием разнообразных математических моделей для прогнозов [Дмитриев и др., 2010]. В разнообразных руководящих документах Росгидромета (РД) определены физические, химические, биологические и экотоксикологические показатели/индикаторы, которые дают возможность характеризовать качество воды, трофический статус и другие параметры водоема. В работе [Вильянен и др., 1999] специально для Ладожского озера предложен набор параметров для осуществления мониторинга, обосновано расположение станций и регулярность наблюдений как контактными, так и дистанционными методами. Для оценки состояния и изменений экосистемы, прогностических расчетов, необходимых для принятия решений, предложены разнообразные математические модели для описания озерных гидрофизических и химико-биологических процессов, а также водного стока и стока биогенных веществ с водосбора. Однако предложенные разработки интегрированного мониторинга Ладожского озера и водосбора так и не были реализованы [Современное..., 2021].

На основе опыта многолетних экспериментальных исследований экосистемы озера, проводимых подразделениями Росгидромета и ИВПС КарНЦ РАН для реализации интегрированного мониторинга озера и водосбора, решения разнообразных проблем с оценкой влияния городских стоков, форелевых хозяйств и др., предлагается оптимальный набор параметров (табл.).

Схемы станций измерений для комплексных наблюдений, мониторинга Онежского озера для разных сезонов года представлены на рис. 3. Выбор станций наблюдений мониторинга зависит также от поставленных практических задач, с учетом особенностей гидрологического режима в разные сезоны и расположения источников биогенной нагрузки.

Основные параметры для ведения интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор» с целью решения разнообразного комплекса задач

Key parameters for integrated monitoring the Lake Onego – catchment system to address a diverse range of issues

Данные Data	Параметры Parameters
Климатические метеоданные Climatic and meteorological	Т° воздуха, осадки, испарение. Данные реанализа Air t°, precipitation, evaporation. Reanalysis data
Гидрологические Hydrological	Сток рек, температура поверхности воды (ТПВ), спутниковые данные: ТПВ, Chl a, DOM River runoff, water surface temperature (WST), satellite data: WST, Chl a, DOM
Определение нагрузки (реки) Chemical load (rivers)	Р _{общ} , PO ₄ ³⁻ , растворенный Р _{общ} , растворенный Р _{неорг} , N _{общ} , pH, взвеси, цветность, бихроматная и перманганатная окисляемость, БПК ₂₀ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , электропроводность, фенолы, нефтяные углеводороды, Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cr, Cd, Zn, Hg Total phosphorus (TP), PO ₄ ³⁻ , dissolved TP, dissolved inorganic phosphorus (IP), Total nitrogen (TN), pH, suspended solids, color, COD _{Cr} , COD _{Mn} , BOD ₂₀ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , conductivity, phenols, petroleum hydrocarbons, Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cr, Cd, Zn, Hg
Определение нагрузки с водосбора от сельхозпредприятий Load from agricultural complex on the catchment	Вынос биогенных элементов с учетом доз внесения удобрений и выноса азота и фосфора с урожая и в зависимости от типов почв на территории водосбора сельхозпредприятий Removal of nutrients taking into account the rates of fertilizers application and the removal of nitrogen and phosphorus with the harvest and depending on the soil types in the catchment area of agricultural enterprises
Характеристика подстилающей поверхности, формирующей рассредоточенный вынос БЭ с водосбора Characteristics of the underlying surface causing dispersed discharge of nutrients from the catchment	Спутниковые данные – коллекция CGLS-LC100, основана на спутниковых данных PROBA-V, Sentinel-2, Landsat 7, 8 Satellite data collection CGLS-LC100 is based on satellite data PROBA-V, Sentinel-2, Landsat 7, 8
Определение нагрузки от точечных (2-ТП (водхоз)) и рассеянных (форелевые хозяйства) источников Load from the point sources (waste water) and diffuse sources (trout farms)	Биогенные элементы (P-PO ₄ , Р _{общ} , N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃ , N _{общ}). Расчетная нагрузка биогенных веществ и легкоминерализуемого органического вещества на основе данных о мощности (количестве продукции) хозяйств аквакультуры на водосборе и в Онежском озере (т/год) Nutrients (P-PO ₄ , TP, N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃ , TN). Estimated load of nutrients and organic matter is based on the data on the capacity (quantity of production) of aquaculture farms on Lake Onego and its catchment area (in tons per year)
Атмосферная нагрузка Atmospheric load	P-PO ₄ , N-NH ₄ , N-NO ₃ , Р _{общ} , N _{общ} , Cu, Zn, Pb и др. тяжелые металлы. Толщина и плотность снегового покрова для вычисления его водного эквивалента P-PO ₄ , N-NH ₄ , N-NO ₃ , TP, TN, Cu, Zn, Pb and other heavy metals. Thickness and density of snow cover for calculating its water equivalent
Внутренняя нагрузка. Донные отложения Internal load from sediments	Влажные седименты: t°, pH, содержание воды, пористость и удельный вес сухого остатка, гранулометрический состав: твердая фаза – потери при прокаливании, Р _{общ} , P-PO ₄ , N _{общ} , металлы; поровые воды: растворенный Р _{общ} , растворенный Р _{неорг} , NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , N _{общ} , металлы; придонная вода: t°, O ₂ , pH, растворенный Р _{общ} , растворенный Р _{неорг} , NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , N _{общ} , металлы Wet sediments: t°, pH, water content, porosity and specific gravity of dry residue, particle size distribution; solid phase: loss on ignition, TP, P-PO ₄ , TN, metals; pore water: dissolved TP, dissolved IP, N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃ , TN, metals; bottom water: t°, O ₂ , pH, dissolved TP, dissolved IP, N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃ , TN, metals
Гидрохимические данные (вода) Hydrochemical data (water)	pH, O ₂ , цветность, электропроводность, взвеси (общая мутность и органические компоненты), SiO ₂ , общие (Р _{общ} и N _{общ}) и растворенные (Р _{общ} растворенный, P-PO ₄ , N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃) биогены, органическое вещество (бихроматная и перманганатная окисляемость, БПК ₅ и БПК ₂₀), основные ионы (Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻), металлы (Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn, Hg), фенолы, нефтяные углеводороды, H ₂ O ₂ pH, O ₂ , color, conductivity, total suspended solids (total turbidity and organic components), SiO ₂ , total (TP and TN) and dissolved (TP, P-PO ₄ , N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃) nutrients, organic matter (COD _{Cr} , COD _{Mn} , BOD ₅ and BOD ₂₀), main ions (Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻), metals (Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn, Hg), phenols, petroleum hydrocarbons
Бактериопланктон Bacterioplankton	Общая численность бактерий и бактерий, растущих на РПА; бактериальная продукция, деструкция Total bacteria abundance, saprophytic bacteria, bacterial production, destruction of organic matter by bacteria
Фитопланктон Phytoplankton	Численность, биомасса, видовой состав, структура сообществ, доля цианобактерий в общей численности фитопланктона, концентрация Chl a, первичная продукция Abundance, biomass, species composition, community structure of phytoplankton, proportion of cyanobacteria in total phytoplankton abundance, Chl a concentration, primary production

Окончание табл.
Table (continued)

Данные Data	Параметры Parameters
Зоопланктон Zooplankton	Численность и биомасса, видовой состав, структура сообщества Abundance and biomass, species composition, community structure of zooplankton
Макро- и мейобентос Macro- and meiobenthos	Численность и биомасса, видовой состав и структура биоценозов, амфиподно-олигохетный индекс, доля реликтовых ракообразных в общей численности глубоководного макрозообентоса Abundance and biomass, species composition and community structure of deep-water macrozoobenthos, amphipoda- oligochaeta index, proportion of relict crustaceans in the total abundance of deep-water macrozoobenthos
Макрофиты Macrophytes	Видовой состав, структура сообществ (высота, ярусность, плотность, процент покрытия), фенологическая фаза, жизненность, выедание животными, площади растительных ассоциаций, биомасса и продукция макрофитов Species composition, community structure (height, layering, density, percent cover), phenological phase, vitality, grazing by animals, area of plant associations, biomass and production of macrophytes
Перифитон Periphyton	Видовой состав, численность клеток, биомасса, концентрация Chl a, первичная продукция Species composition of periphyton, cell number, biomass, Chl a concentration, primary production
Палеолимнология и химия донных отложений Paleolimnology and bottom sediments chemistry	1) Определение редокс-потенциала, pH, электропроводности, пористости, размера зерен, сухой вес, содержание органического вещества; 2) датировки по Pb-210 стратиграфии; 3) химический стратиграфический анализ: P, Si, N, тяжелые металлы, органические загрязнители; 4) биостратиграфический анализ диатомовых и головных капсул хирономид 1) determination of redox potential, pH, electrical conductivity, porosity, grain size, dry weight, and organic matter content; 2) stratigraphic dating using Pb-210; 3) chemical stratigraphic analysis: P, Si, N, heavy metals, and organic pollutants; 4) biostratigraphic analysis of diatoms and chironomid head capsules
Экотоксикология Ecotoxicology	Биотестирование токсичности сточных вод, природных вод и донных отложений. Тест-объекты (ветвистоусые ракообразные, простейшие) Biotesting of wastewater, natural water, and bottom sediment toxicity. Test organisms (cladocerans, protozoa)
Ихтиопатология Ichthyopathology	Гематологические показатели (лейкоцитарная формула), биохимические показатели (малоновый диальдегид, супероксиддисмутаза, глутатион S-трансфераза, окислительная модификация белков), гистопатологические индикаторы (печень, жабры, почка) Hematological parameters (white blood cell count), biochemical parameters (malondialdehyde, superoxide dismutase, glutathione S-transferase, oxidative modification of proteins), histopathological indicators (liver, gills, kidney)

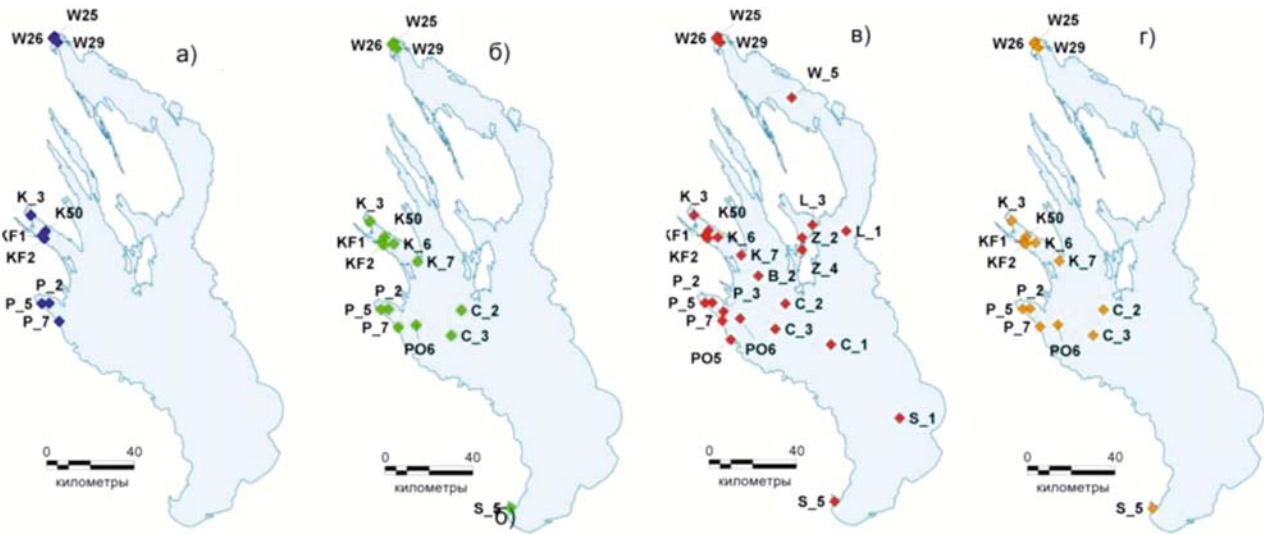


Рис. 3. Схемы станций комплексных наблюдений, мониторинга Онежского озера для разных сезонов года: а) зима, б) весна, в) лето, г) осень

Fig. 3. Layouts of the integrated observation stations for monitoring Lake Onega for different seasons: а) winter, б) spring, в) summer, г) autumn

О разработке интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор»

Для управления ресурсами крупных водоемов России и сохранения их экосистем необходимо количественно оценить происходящие процессы в озере и на водосборе, предложить прогнозы изменений экосистемы озера и водосбора при разных сценариях изменений климата и антропогенных воздействий. Для этого на примере Онежского озера был фактически реализован так называемый «интегрированный мониторинг» Онежского озера и водосбора. Он включал в себя создание информационно-аналитической системы (ИАС), разработку моделей для оценки поступления водного и биогенного стока с водосбора [Кондратьев и др., 2024], создание 3D-моделей экосистемы озера высокого разрешения с пространственным шагом 1 км для «разрешения» гидрофизических и химико-биологических процессов, происходящих в достаточно узких губах, заливах [Isaev et al., 2022]. Разработанная система интегрированного мониторинга необходима для поддержки принятия управленческих решений [Филатов и др., 2024]. Был использован опыт разработки таких систем для озер России [Меншуткин и др., 2014], Балтийского моря и водосбора [Wulff et al., 2013], а также Великих Американских озер и их водосборов. Для совершенствования системы поддержки принятия управленческих решений для Великих Американских озер разрабатывается интегрированный мониторинг с применением так называемого адаптивного управления [Arhonditsis et al., 2019]. Концепция адаптивного управления разработана из-за признания ограничений возможностей математических моделей при прогнозировании поведения экосистем, на основе которых предпринимаются практические действия по управлению ресурсами и экосистемой озера Эри [Stow et al., 2022]. Интегрированный мониторинг и адаптивное управление обычно включают установление соответствующих показателей и шкал для обнаружения изменений в экологических системах, совершенствование программ мониторинга. Таким образом, устраняются пробелы в знаниях, что позволяет планировать будущие исследования на основе растущего понимания экосистемных процессов. В рамках данного подхода необходимо применять математические модели, соответствующие сложности изучаемой системы «водоем – водосбор». В работе [Stow et al., 2022] показано, что использование не соответствующих сложности экосистемы математических моде-

лей может привести к ошибочным выводам при принятии управленческих решений. Например, в статье [Hellweger et al., 2022] представлены результаты, которые были сделаны с использованием простой боксовой модели для такого крупного водоема, как озеро Эри. На этой основе получены ошибочные выводы, противоречащие расчетам на сложном комплексе верифицированных моделей экосистемы озера.

Интегрированный подход применен в ИВПС КарНЦ РАН на примере системы «Онежское озеро – водосбор» с учетом бассейнового принципа¹ [Филатов и др., 2025]. По результатам многолетних наблюдений создана база данных, оценен комплекс антропогенных и природных факторов с учетом их совместного кумулятивного эффекта как в сезонном, так и в многолетнем масштабе времени и разработаны прогнозы изменения водного и биогенного стока с водосбора в озеро при двух сценариях изменений климата и нескольких сценариях антропогенной нагрузки [Кондратьев и др., 2024; Филатов и др., 2025]. Для оценки антропогенной нагрузки на водосбор и озера рассмотрена социально-экономическая ситуация в шести регионах, входящих в водосбор Онежского озера [Онежское..., 2010; Дружинин, 2023]. Получены оценки возможных изменений экономики и социальной сферы по двум сценариям развития регионов до 2050 г. – «инерционного» и «ускоренного» развития, которые отразятся на особенностях влияния экономики на окружающую среду [Дружинин, 2023]. Выполнены расчеты возможной биогенной нагрузки от точечных и распределенных источников, под влиянием изменений климата и антропогенных воздействий (социально-экономической ситуации) на водосборе озера [Кондратьев и др., 2024]. Установлено, что речной биогенный сток является одним из основных факторов, воздействующих на биопродукционный потенциал водоема и определяющих его трофический статус. Для уменьшения поступления соединений фосфора, азота, взвешенных веществ, биологически окисляемых органических соединений и химически окисляемых органических соединений может быть полезным внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) на расположенных на водосборе озера предприятиях ресурсоемких отраслей, с разработкой и реализацией программ повышения экологической эффективности (ППЭЭ) [Скобелев, 2022]. В качестве примера отметим внедрение

¹ Государственный экологический мониторинг (государственный мониторинг окружающей среды) (в ред. Федерального закона от 21.11.2011 № 331-ФЗ).

на Петрозаводском водоканале ППЭЭ, направленной на снижение концентраций биогенных элементов и достижение соответствия требованиям НДТ [Волков и др., 2020].

Водный сток с водосбора оценен с использованием модели ILLM и выноса растворенных химических веществ с водосбора по модели ILLM [Кондратьев и др., 2024]. Последняя модель была модифицирована блоком для учета типов почв на водосборе и особенностей внесения удобрений от сельскохозяйственной деятельности. Показано, что изменения сельскохозяйственной нагрузки за счет внедрения НДТ мало скажутся на экологическом состоянии Онежского озера, но будут полезны для сохранения состояния качества вод малых рек на водосборе. Даны прогностические оценки возможного изменения поступления азота и фосфора в озеро к середине XXI века в результате изменения стока с водосбора при условии реализации двух RCP-сценариев: RCP 2.6 и RCP 8.5. Реализация сценария антропогенного воздействия на окружающую среду (RCP 2.6) на всех объектах может привести к повсеместному снижению биогенной нагрузки на озеро, а при реализации экологически неблагоприятного сценария (RCP 8.5) можно ожидать увеличения водного стока и соответствующего увеличения выноса фосфора на 2,3–16,6 % и азота на 14,0–22,5 %. Расчеты показали, что при возможном увеличении на 30 % темпов роста продукции форели к 2050 г. по сравнению с 2021 г. может также примерно на 30 % увеличиться биогенная нагрузка на озеро.

С помощью 3D-модели SPLEM¹ А. В. Исаевым [Isaev et al., 2022] показаны возможные последствия изменения экосистем озера до 2050 г. [Филатов и др., 2025] по данным анализа изменчивости биогенных веществ (фосфора и азота), первичной продукции фитопланктона, как наиболее значимых показателей, характеризующих степень эвтрофирования водоема. Получены количественные оценки ассимиляционного потенциала (АП), которые для Онежского озера в целом составили примерно 780 т Р/год и 15 000 т N/год, при этом пелагиаль озера должна сохранять свой олиготрофный статус, что позволяет принять эти величины в качестве оценок по сбросу фосфора и азота в озеро. С использованием модели SPLEM была оценена интегральная нагрузка по биогенным веществам как на все озеро, так и для отдельных его

районов и рассчитаны значения годовой первичной продукции (г С/м²/год) для основных лимнических районов Онежского озера. При реализации принятого сценария изменений климата RCP 8.5 средняя многолетняя температура поверхности воды в вегетационный период может увеличиться с 9,8 °С (в 1991–2020 гг.) до 12,2 °С (2021–2050 гг.). При биогенной нагрузке, близкой к АП (поступление фосфора 801 т/год, азота – 11 861 т/год), и при линейном росте производства форели с 2020 до 2050 г. в Петрозаводской и Кондопожской губах будет наблюдаться основной рост первичной продукции фитопланктона, которая может составить 56,7 и 44,5 г С/м²/год соответственно, что больше современного на 15–20 %. Такие высокие показатели ПП являются опасными не только в губах и заливах озера, но и для центральной его части из-за интенсивного перемешивания, циркуляции вод озера, что в конечном итоге может повлиять на изменение трофического статуса озера и его эвтрофирование.

Результаты и выводы

Представлены результаты оценки состояния и прогнозирования изменений водосбора и экосистемы Онежского озера, трофического статуса, которые необходимы для оценки природного капитала и экосистемных услуг системы «озеро – водосбор». Предложены базовые показатели для оценки состояния и прогнозирования динамики системы. Контроль процесса эвтрофирования озера предполагает следующие основные этапы: 1) определение качества воды по предложенным химическим и биологическим показателям (табл.); 2) сравнение текущих величин биологических показателей с биологическими критериями трофического состояния экосистемы; 3) определение ассимиляционного потенциала водной экосистемы; 4) оценку состояния экосистемы озера по результатам применения комплекса моделей; 5) рекомендации по снижению антропогенной фосфорной нагрузки на водоем для лиц, принимающих решения.

С учетом известных недостатков отчетности 2-ТП (водхоз) следует рекомендовать предприятиям водосбора Онежского озера разработать и реализовать программы повышения экологической эффективности для предоставления информации о реальных сбросах биогенных элементов, взвешенных веществ, биологически и химически окисляемых веществ в Онежское озеро.

Важный аспект выполненной работы заключается в системном подходе для реализации

¹ SPLEM – Saint-Petersburg Limnological Model of Ecosystem – трехмерная модель экосистемы озера, разработанная в Санкт-Петербурге.

интегрированного мониторинга с применением данных мониторинга, дистанционных наблюдений, созданных баз данных и баз знаний, комплекса математических моделей для экосистемы не только Онежского озера, но и водосборной территории.

Предлагается общая схема реализации интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор» (рис. 4).



Рис. 4. Общая схема реализации интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор» [по: Меншуткин и др., 2014 с изменениями]

Fig. 4. General implementation scheme for integrated monitoring the Lake Onego – catchment system [after Menshutkin et al., 2014 with changes]

Необходимо дальнейшее совершенствование созданной системы интегрированного мониторинга Онежского озера и водосбора с использованием адаптивного подхода. На основе предложенных разработок требуется выполнить оценку экосистемных услуг, природного капитала Онежского озера и водосбора.

Литература

Абакумов В. А., Сушеня Л. М. Гидробиологический мониторинг пресных вод и пути его совершенствования // Экологические модификации и критерии экологического нормирования: Труды междунар. симпоз. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 41–51.

Астраханцев Г. П., Меншуткин В. В., Минина Т. Р. Использование моделей экосистем больших озер для получения оценок их ассимиляционного потенциала // Управление большими системами. Вып. 55. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 17–34.

Ашихмина Т. Я. Биоиндикация и биотестирование: методы познания экологического состояния окружающей среды. Киров: ВятГУ, 2005. Вып. 4. Ч. 3. 51 с.

Баклагин В. Н. Формирование структуры единой базы данных гидробиологических и гидрохимических измерений Онежского озера // Физическое и математическое моделирование процессов в гео-средах: Мат-лы 9-й Междунар. конф.-школы молодых ученых. М., 2023. С. 38–41.

Болотова Н. Л., Мухин И. А., Лопичева О. Г. Подходы к оценке экосистемных услуг Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 173–187. doi: 10.17076/lim1632

Бобылев С. Н., Барабошкина А. В., Курдин А. А., Яковлева Е. Ю., Бубнов А. С. Национальные цели развития России и ключевые индикаторы устойчивости // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. 2025. Т. 60(1). С. 40–59. doi: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-1-3

Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.

Вильянен М., Ниинийоа Р., Драбкова В. Г. и др. Разработка и реализация интегрированной программы природоохранного мониторинга Ладожского озера: охрана и устойчивое использование водных ресурсов / Проект Tacis DIMPLA. Йоэнсуу, 1999. 24 с.

Винберг Г. Г. Эвтрофирование и охрана вод // Гидробиологический журнал. 1974. Т. 10, № 2. С. 129–135.

Волков С. Н., Рублевская О. Н., Тихонова И. О., Гусева Т. В., Иикканен М. Опыт развития объектов водоотведения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»: этапы перехода к наилучшим доступным технологиям // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 6. С. 104–120. doi: 10.35567/1999-4508-2020-6-6

Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Современная биогенная нагрузка на Онежское озеро от крупнейших его притоков // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 53–62. doi: 10.17076/lim1925

Гусев А. А. Ассимиляционный потенциал окружающей среды в системе прав собственности на природные ресурсы // Экономика и математические методы. 1997. Т. 33, № 3. С. 5–15.

Данилов-Данильян В. И. Структура стоимости и структура экономики в век глобализации // Век глобализации. 2015. № 1. С. 3–20.

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 251 с.

Дмитриев В. В., Огурцов А. Н., Васильев В. Ю. Интегральная оценка экологического состояния водных объектов, трофности и качества воды, экологической напряженности рек, озер и морских акваторий. СПб.: Арт-Экспресс, 2010. С. 143–153.

Дружинин П. В. Развитие экономики регионов Северо-Западного федерального округа в условиях миграции в Санкт-Петербургскую агломерацию // Балтийский регион. 2023. Т. 15, № 3. С. 100–116. doi: 10.5922/2079-8555-2023-3-6

Жулидов А. В., Хоружая Т. А. Рекомендации. Методы токсикологической оценки загрязнения экосистем. М., 1994. 124 с.

Интегрированное управление водными ресурсами: математические модели и информационные технологии. Препринт / Под ред. Л. А. Руховца. СПб.: СПб ЭМИ РАН, 2007. 65 с.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Известия РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899. doi: 10.31857/S2587556621060078

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Георгиев А. П., Исакова К. В., Толстяков А. В., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла а, продукция фитопланктона. Свидетельство о госрегистрации базы данных RU 2023621189. Правообладатель: КарНЦ РАН. Номер заявки: 2023620710. Дата регистрации: 20.03.2023. Дата публикации: 12.04.2023.

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Кондратьев С. А., Брюханов А. Ю., Шмакова М. В., Расулова А. М., Галахина Н. Е., Зобков М. Б., Васильев Э. В., Обломкова Н. С. Оценка возможных изменений биогенной нагрузки на Онежское озеро под воздействием антропогенных и климатических факторов // Водные ресурсы. 2024. Т. 51, № 3. С. 285–296. doi: 10.31857/S0321059624030056

Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменение экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Литвинова И. А., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Макарова Е. М., Ефимова А. Н. Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Свидетельство о госрегистрации базы данных RU 2021620975. Правообладатель: КарНЦ РАН. Номер заявки: 2021620861. Дата регистрации: 28.04.2021. Дата публикации: 17.05.2021.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научно-го центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Лозовик П. А. Оценка ассимиляционной способности к фосфорной и органической нагрузкам и нормирование допустимого антропогенного воздействия на водные объекты по кинетической и гидрогеохимической моделям // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 88–95.

Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер // Водное хозяйство России. 2014. № 3. С. 100–108.

Моисеенко Т. И. Оценка качества вод и «здоровья» экосистем с позиций экологической парадигмы // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 104–124. doi: 10.35567/1999-4508-2017-3-7

Неверова-Дзиопак Е. В., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.

Никаноров А. М., Емельянова В. П. Комплексная оценка качества поверхностных вод суши // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 1. С. 61–69.

Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.

Онежское озеро. Атлас / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Озера и климат: модели и методы // Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы / Под ред. В. П. Дымникова, В. Н. Лыкосова, Е. П. Гордова. Томск: Изд. дом ТГУ, 2014. С. 256–326.

Руховец Л. А., Гусева В. Н., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н. Использование рыночных механизмов сохранения водных ресурсов великих озер Европы // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. VI. СПб.: Нестор-История, 2007. С. 294–309.

Ситкина К. С. Эколого-экономическая оценка природных территорий // Экономика природопользования. 2010. № 1. С. 8–54.

Скобелев Д. О., Бобылев С. Н., Белозеров Г. А., Кузьмина Е. В. Экологическое благополучие и капитализация природных ресурсов // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. № 1. С. 354–361.

Скобелев Д. О. Очередной этап развития системы эколого-технологического регулирования промышленности в России // Экономика устойчивого развития. 2022. № 1(49). С. 83–89. doi: 10.52531/1682-1696-2022-22-4-49-59

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев и др. М.: РАН, 2021. 637 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3

Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Макарова Е. М., Смирнова В. С. Современное трофическое состояние и качество воды Онежского озера // Биология внутренних вод. 2023. № 6. С. 740–746. doi: 10.31857/S0320965223060335

Филатов Н. Н., Дружинин П. В., Исаев А. В. и др. Обоснование возможной биогенной нагрузки на Онежское озеро и прогностические оценки изменения его экосистемы при разных климатических и социально-экономических сценариях // Водные ресурсы. 2025. Т. 52, № 4. С. 724–737.

Филатов Н. Н., Савчук О. П., Баклагин В. Н., Галахина Н. Е., Зобков М. Б., Исаев А. В., Кондра-
тьев С. А., Калинин Н. М., Новикова Ю. С., Расу-
лова А. М., Шмакова М. В. Диагноз состояния и
изменений экосистемы Онежского озера и во-
досбора на основе информационно-аналитиче-
ской системы // *Фундаментальная и приклад-
ная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 2. С. 10–24. doi:
10.59887/2073-6673.2024.17(2)-2

Экосистемные услуги России: Прототип нацио-
нального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем
/ Ред.-сост.: Е. Н. Букварева, Д. Г. Замолотчиков. М.:
Изд-во ЦОДП, 2016. 148 с.

Arhonditsis G. B., Neumann A., Shimoda Y.,
Kim D.-K., Dong F., Onandia G., Yang C., Javed A.,
Brady M., Visha A., Ni F., Cheng V. Castles built on sand
or predictive limnology in action? Part A: Evaluation of an
integrated modelling framework to guide adaptive mana-
gement implementation in Lake Erie. *Ecol. Inform.* 2019.
Vol. 53. Art. 100968. doi: 10.1016/j.ecoinf.2019.05.014

Arrow K., Bolin B., Costanza R., Dasgupta P.,
Folke C., Holling C. S., Jansson B.-O., Levin S.,
Mäler K.-G., Perrings Ch., Pimentel D. Economic growth,
carrying capacity, and the environment // *Science*.
1995. Vol. 268, iss. 5210. P. 520–521. doi: 10.1126/
science.268.5210.52

Canadian water quality guidelines for the protection
of aquatic life / Canadian Council of Ministers of the En-
vironment. Ottawa, 2004. 76 p.

Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnol.*
Oceanogr. 1977. Vol. 22(2). P. 361–369. doi: 10.4319/
lo.1977.22.2.0361

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S.,
Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S.,
O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P.,
van den Belt M. The value of the world's ecosystem
services and natural capital // *Nature*. 1997. Vol. 387.
P. 253–260.

Costanza R., Daly H. E. Toward an ecological eco-
nomics // *Ecological Modelling*. 1987. Vol. 38. P. 1–7.
doi: 10.1016/0304-3800(87)90041-X

Costanza R., de Groot R., Sutton P. Changes in
the global value of ecosystem services // *Glob. Envi-
ron. Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158. doi: 10.1016/
j.gloenvcha.2014.04.002

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and
of the Council of 23 October 2000 establishing a frame-
work for Community action in the field of water policy
// Official J. Europ. Communities. 2000. L. 327/1. 118 p.

Faber S., Costanza R., Childers D. L., Erickson J.,
Gross K., Grove M., Hopkinson C. S., Kahn J., Pin-
cetl S., Troy A., Warren P., Wilson M. Linking ecology and
economics for ecosystem management // *Biosci.* 2006.
Vol. 56, no. 2. P. 121–133. doi: 10.1641/0006-3568(2006)
056[0121:LEAEFE]2.0.CO;2

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current
chemistry of Lake Onego and its spatial and tempo-
ral changes for the last three decades with special
reference to nutrient concentrations // *Environ. Nano-
technol. Monit. Manag.* 2022. Vol. 17. Art. 100619. doi:
10.1016/j.enmm.2021.100619

Hellweger F. L., Martin R. M., Eigemann F. Models
predict planned phosphorus load reduction will make

Lake Erie more toxic // *Science*. 2022. Vol. 376,
no. 6596. P. 1001–1005. doi: 10.1126/science.abm6791

Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N. Three-
dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus bio-
geochemical dynamics in Lake Onego ecosystem,
1985–2015. Part I: Long-Term Dynamics and Spatial
Distribution // *Fundamental and Applied Hydrophys-
ics*. 2022. Vol. 15(2). P. 76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-
63b5-rhvg

Jenny J. P., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists'
warning to humanity: rapid degradation of large lakes
// *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46. P. 686–702. doi:
10.1016/j.jglr.2020.05.006

Livingstone D. R. Oxidative stress in aquatic orga-
nisms in relation to pollution and aquaculture // *Rev*
Me'd Ve't. 2003. Vol. 154. P. 427–430.

Newman M. C., Jagoe Ch. H. (eds.). *Ecotoxicology:
a hierarchical treatment*. New-York: Levis Publ. Ltd., 1996.
411 p.

Rodhe W. Crystallization of eutrophication concepts
in Northern Europe // *Scr. Limnol. Upsal. Coll.* 3A. 1967.
No. 144. P. 1–37.

Stow C. A., Stumpf R. P., Rowe M. D., Johnson L. T.,
Carrick H. J., Yerubandi R. Model assumptions limit im-
plications for nitrogen and phosphorus management
// *J. Great Lakes Res.* 2022. Vol. 48, Iss. 6. P. 1735–
1737. doi: 10.1016/j.jglr.2022.09.003

Vollenweider R. A., Kerekes J. J. (eds.). *Eutrophica-
tion of waters: monitoring, assessment and control*.
Paris: OECD, 1982. 154 p.

Wulff F., Sokolov A., Savchuk O. P. Nest – a decision
support system for management of the Baltic Sea. A user
manual. Technical Report No. 10 / Baltic Nest Institute,
Stockholm University Baltic Sea Centre. 2013. 69 p.

References

Abakumov V. A., Sushchenya L. M. Hydrobiologi-
cal monitoring of freshwater and ways to improve it.
*Ekologicheskie modifikatsii i kriterii ekologicheskogo
normirovaniya: Trudy mezhdunar. simpoz. = Ecological
modifications and criteria for environmental standar-
dization: Proceedings of the int. symposium*. Leningrad:
Gidrometeoizdat; 1991. P. 41–51. (In Russ.)

Arhonditsis G. B., Neumann A., Shimoda Y.,
Kim D.-K., Dong F., Onandia G., Yang C., Javed A.,
Brady M., Visha A., Ni F., Cheng V. Castles built on sand
or predictive limnology in action? Part A: Evaluation of
an integrated modelling framework to guide adaptive
management implementation in Lake Erie. *Ecol. Inform.*
2019;53:100968. doi: 10.1016/j.ecoinf.2019.05.014

Arrow K., Bolin B., Costanza R., Dasgupta P., Folke C.,
Holling C. S., Jansson B.-O., Levin S., Mäler K.-G.,
Perrings Ch., Pimentel D. Economic growth, carrying ca-
pacity, and the environment. *Science*. 1995;268(5210):
520–521. doi: 10.1126/science.268.5210.52

Astrakhantsev G. P., Menshutkin V. V., Minina T. R.
Using large lake ecosystem models to estimate their
assimilation potential. *Upravlenie bol'shimi sistemami
= Large Systems Management*. Iss. 55. Moscow: IPU
RAN; 2015. P. 17–34. (In Russ.)

Ashikhmina T. Ya. Bioindication and biotesting:
methods for understanding the ecological state of the

environment. Iss. 4. Part. 3. Kirov: VyatGU; 2005. 51 p. (In Russ.)

Baklagin V. N. Formation of the structure of a unified database of hydrobiological and hydrochemical measurements of Lake Onego. *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie protsessov v geosredakh: Mat-ly 9-i Mezhdunar. konf.-shkoly molodykh uchenykh = Physical and mathematical modeling of processes in geoenvironments: Proceedings of the 9th int. conference-school of young scientists*. Moscow; 2023. P. 38–41. (In Russ.)

Bobylev S. N., Baraboshkina A. V., Kurdin A. A., Yakovleva E. Yu., Bubnov A. S. National development goals of Russia and key sustainability indicators. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika = Bulletin of Moscow University. Series 6. Economics*. 2025;60(1):40–59. (In Russ.). doi: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-1-3

Bolotova N. L., Mukhin I. A., Lopicheva O. G. Approaches to assessing ecosystem services of Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;6:173–187. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1632

Boulion V. V. Primary production of plankton in inland waters. Leningrad: Nauka; 1983. 150 p. (In Russ.)

Bukhareva E. N., Zamolodchikov D. G. (ed.-comp.). Ecosystem services of Russia: prototypical national report. Vol. 1. Terrestrial ecosystem services. Moscow: TsODP; 2016. 148 p. (In Russ.)

Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life. Canadian Council of Ministers of the Environment. Ottawa; 2004. 76 p.

Carlson R. E. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1977;22(2):361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farberk S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997;387:253–260.

Costanza R., Daly H. E. Toward an ecological economics. *Ecological Modelling*. 1987;38:1–7. doi: 10.1016/0304-3800(87)90041-X

Costanza R., de Groot R., Sutton P. Changes in the global value of ecosystem services. *Glob. Environ. Change*. 2014;26:152–158. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

Danilov-Danil'yan V. I. Value structure and economic structure in the age of globalization. *Vek globalizatsii = Age of Globalization*. 2015;1:3–20. (In Russ.)

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official J. Europ. Communities*. 2000. L. 327/1. 118 p.

Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N., Vasil'ev V. Yu. Integral assessment of the ecological state of water bodies, trophic status and water quality, and ecological stress in rivers, lakes, and marine areas. St. Petersburg: Art-Ekspress; 2010. P. 143–153. (In Russ.)

Druzhinin P. V. Economic development of Russia's north-western regions and migration to the St. Petersburg agglomeration. *Baltiiskii region = Baltic Re-*

gion. 2023;15(3):100–116. (In Russ.). doi: 10.5922/2079-8555-2023-3-6

Galakhina N. E., Zobkov M. B. Current nutrient load on Lake Onego from its largest tributaries. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024;5:53–62. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1925

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Gusev A. A. Assimilation potential of the environment in the system of property rights to natural resources. *Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods*. 1997;33(3):5–15. (In Russ.)

Faber S., Costanza R., Childers D. L., Erickson J., Gross K., Grove M., Hopkinson C. S., Kahn J., Pincetl S., Troy A., Warren P., Wilson M. Linking ecology and economics for ecosystem management. *Biosci.* 2006;56(2):121–133. doi: 10.1641/0006-3568(2006)056[0121:LEAEFE]2.0.CO;2

Filatov N. N. (ed.). Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 251 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Druzhinin P. V., Isaev A. V. et al. Justification of the possible biogenic load on Lake Onega and prognostic assessments of changes in its ecosystem under different climatic and socioeconomic scenarios. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2025;52(4):724–737. (In Russ.)

Filatov N. N., Savchuk O. P., Baklagin V. N., Galakhina N. E., Zobkov M. B., Isaev A. V., Kondrat'ev S. A., Kalinkina N. M., Novikova Yu. S., Rasulova A. M., Shmakova M. V. Diagnosis of the state and changes in the ecosystem of Lake Onego and its catchment based on the information-analytical system. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(2):10–24. (In Russ.). doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-2

Hellweger F. L., Martin R. M., Eigemann F. Models predict planned phosphorus load reduction will make Lake Erie more toxic. *Science*. 2022;376(6596):1001–1005. doi: 10.1126/science.abm6791

Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part I: Long-Term Dynamics and Spatial Distribution. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg

Jenny J. P., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: rapid degradation of large lakes. *J. Great Lakes Res.* 2020;46:686–702. doi: 10.1016/j.jglr.2020.05.006

- Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Response of Lake Onego ecosystem in the spring–summer period to anomaly high air temperature in winter 2019/2020. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = Izvestiya RAS. Geographical Series*. 2021;85(6):888–899. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556621060078
- Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Syarki M. T., Georgiev A. P., Isakova K. V., Tolstyakov A. V., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Limnological indicators of Lake Onega and the Vygozerskoye Reservoir: water temperature, chlorophyll *a* concentration, and phytoplankton production. State registration certificate RU 2023621189. Copyright holder: KarRC RAS. Application number: 2023620710. Registration date: March 20, 2023. Publication date: April 12, 2023. (In Russ.)
- Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Bryukhanov A. Yu., Shmakova M. V., Rasulova A. M., Galakhina N. E., Zobkov M. B., Vasil'ev E. V., Oblomkova N. S. Assessment of possible changes in the biogenic load on Lake Onega under the influence of anthropogenic and climatic factors. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2024;51(3):285–296. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059624030056
- Kondrat'ev S. A. et al. (eds). Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate. Moscow: RAN; 2021. 637 p. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- List of fishery standards for maximum permissible concentrations (MPC) and approximate safe impact levels (OSIL) of harmful substances for the water of water bodies of fishery importance. Moscow: VNIRO; 1999. 304 p. (In Russ.)
- Litvinova I. A., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Makarova E. M., Efimova A. N. Anthropogenic load and bioindication of the state of Lake Onega (Upper Svir Reservoir). State registration certificate RU 2021620975. Copyright holder: KarRC RAS. Application number: 2021620861. Registration date: April 28, 2021. Publication date: May 17, 2021. (In Russ.)
- Livingstone D. R. Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture. *Rev Me'd Ve't*. 2003;154:427–430.
- Lozovik P. A. Assessment of assimilation capacity for phosphorus and organic loads and standardization of permissible anthropogenic impact on water bodies using kinetic and hydrogeochemical models. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii = The largest lake-reservoirs of the Northwest of European Russia*. Petrozavodsk; 2015. P. 88–95. (In Russ.)
- Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondratyev S., Litvinenko A., Litvinova I. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim303
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Mathematical models of aquatic ecosystems in lake resource management problems. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2014;3:100–108. (In Russ.)
- Moiseenko T. I. Assessment of water quality and ecosystem 'health' from the standpoint of the ecological paradigm. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2017;3:104–124. (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2017-3-7
- Neverova-Dziopak E. V., Tsvetkova L. I. Assessment of the trophic state of surface waters. St. Petersburg: SPbGASU; 2020. 176 p. (In Russ.)
- Newman M. C., Jagoe Ch. H. (eds.). *Ecotoxicology: a hierarchical treatment*. New-York: Levis Publ. Ltd.; 1996. 411 p.
- Nikanorov A. M., Emel'yanova V. P. Comprehensive assessment of the quality of surface waters on land. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2005;32(1):61–69. (In Russ.)
- Odum Yu. Fundamentals of ecology. Moscow: Mir; 1975. 740 p. (In Russ.)
- Rodhe W. Crystallization of eutrophication concepts in Northern Europe. *Scr. Limnol. Upsal. Coll.* 3A. 1967;144:1–37.
- Rukhovets L. A., Filatov N. N. Lakes and climate: models and methods. *Modeli i metody v probleme vzaimodeistviya atmosfery i gidrosfery = Models and methods in the problem of atmosphere-hydrosphere interaction*. Tomsk: TGU; 2014. P. 256–326. (In Russ.)
- Rukhovets L. A., Guseva V. N., Astrakhan-tsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N. Using market mechanisms to conserve water resources in European Great Lakes. *Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii = Economic and mathematical studies: Math: models and information technologies*. VI. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2007. P. 294–309. (In Russ.)
- Rukhovets L. A. (ed.). Integrated water resources management: mathematical models and information technologies. Preprint. St. Petersburg: SPb EMI RAN; 2007. 65 p. (In Russ.)
- Sitkina K. S. Ecological-economic assessment of natural areas. *Ekonomika prirodopol'zovaniya = Economics of natural resources*. 2010;1:8–54.
- Skobelev D. O., Bobylev S. N., Belozarov G. A., Kuz'mina E. V. Environmental well-being and capitalization of natural resources. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya = Natural Sciences and Humanities*. 2025;1:354–361. (In Russ.)
- Skobelev D. O. The next stage in the development of the system of environmental and technological regulation of industry in Russia. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya = Economics of Sustainable Development*. 2022;1(49):83–89. (In Russ.). doi: 10.52531/1682-1696-2022-22-4-49-59
- Stow C. A., Stumpf R. P., Rowe M. D., Johnson L. T., Carrick H. J., Yerubandi R. Model assumptions limit implications for nitrogen and phosphorus management. *J. Great Lakes Res.* 2022;48(6):1735–1737. doi: 10.1016/j.jglr.2022.09.003
- Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Makarova E. M., Smirnova V. S. Current trophic state and water quality of Lake Onega. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2023;6:740–746. (In Russ.). doi: 10.31857/S0320965223060335

Vil'yanen M., Niinioja R., Drabkova V. G. et al. Development and implementation of an integrated environmental monitoring program for Lake Ladoga: protection and sustainable use of water resources. Project. Taxis DIMPLA. Joensuu; 1999. 24 p. (In Russ.)

Vinberg G. G. Eutrophication and water protection. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal*. 1974;10(2):129–135. (In Russ.)

Volkov S. N., Rublevskaya O. N., Tikhonova I. O., Guseva T. V., Iikkanen M. Experience of the SUE 'Vodokanal of St. Petersburg' in developing water disposal facilities as the steps towards transition to the best available techniques. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy,*

tekhnologii, upravlenie = Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management. 2020;6:104–120. (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2020-6-6

Vollenweider R. A., Kerekes J. J. (eds.). Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control. Paris: OECD; 1982. 154 p.

Wulff F., Sokolov A. Savchuk O. P. Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual. Technical Report No. 10. Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre; 2013. 69 p.

Zhulidov A. V., Khoruzhaya T. A. Recommendations. Methods of toxicological assessment of ecosystem pollution. Moscow; 1994. 124 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 07.10.2025; принята к публикации / accepted: 13.10.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор,
главный научный сотрудник

e-mail: nfilatov@rambler.ru

Лукина Юлия Николаевна

д-р биол. наук, и. о. директора

e-mail: jlukina@list.ru

Галахина Наталия Евгеньевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрохимии
и гидрогеологии

e-mail: kulakovanata@mail.ru

Калинкина Наталия Михайловна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: cerioda@mail.ru

Теканова Елена Валентиновна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: etekanova@mail.ru

Молчанова Яна Павловна

канд. техн. наук, доцент кафедры ЮНЕСКО
«Зеленая химия для устойчивого развития»

e-mail: molchanova.i.p@muctr.ru

CONTRIBUTORS:

Filatov, Nikolai

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,
Chief Researcher

Lukina, Yulia

Dr. Sci. (Biol.), Acting Director

Galakhina, Natalia

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher,
Head of Laboratory

Kalinkina, Natalia

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Tekanova, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Molchanova, Yana

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor