

УДК 556.55:004 (282.247.211)

© Н. Н. Филатов^{1*}, О. П. Савчук¹, В. Н. Баклагин¹, Н. Е. Галахина¹, М. Б. Зобков¹, А. В. Исаев^{1,2}, С. А. Кондратьев^{1,3}, Н. М. Калинкина¹, Ю. С. Новикова¹, А. М. Расулова^{1,3}, М. В. Шмакова³, 2024

¹Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 185030, Республика Карелия, Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

³Институт озероведения РАН — обособленное структурное подразделение СПб ФИЦ РАН, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9

*nfilatov@rambler.ru

ДИАГНОЗ СОСТОЯНИЯ И ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ВОДОСБОРА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию 18.01.2024, после доработки 31.05.2024, принята в печать 01.06.2024

Аннотация

Представлены результаты диагноза состояния и изменений экосистемы Онежского озера и водосбора с использованием информационно-аналитической системы «Онежское озеро-водосбор» (ИАС), состоящей из комплексной объединённой базы данных измерений Росгидромета и Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН по поступлению биогенных веществ с речным стоком за 1995–2022 гг., математической модели ILLM для оценки формирования биогенной нагрузки на озеро и 3D-математической модели SPLEM, разработанной для Онежского озера. Рассчитан вклад различных источников биогенных веществ, поступающих со стоком рек, от диффузных источников, городских сбросов и от форелевых хозяйств для озера в целом и для его основных лимнических районов. По данным натурных экспериментов за последние 30 лет и результатам расчетов на модели SPLEM с разрешением сетки 1 км показано, что экосистема озера не только не восстановилась после уменьшения антропогенной нагрузки после 1991 г., но и продолжается эвтрофирование вод в губах и заливах из-за влияния промышленных и сельскохозяйственных предприятий, форелевых хозяйств и заметного потепления климата. Разработан функционал для ИАС «Онежское озеро-водосбор» для визуализации данных контактных и дистанционных наблюдений и результатов моделирования, создан интерфейс веб-приложения ИАС.

Ключевые слова: Онежское озеро, биогенная нагрузка, первичная продукция, лимнические районы, биогеохимическая модель, информационно-аналитическая система, сезонные и многолетние изменения экосистемы

UDC 556.55:004 (282.247.211)

© N. N. Filatov¹, O. P. Savchuk¹, V. N. Baklagin¹, N. E. Galakhina¹, M. B. Zobkov¹, A. V. Isaev^{1,2}, S. A. Kondratyev^{1,3}, N. M. Kalinkina¹, I. S. Novikova¹, A. M. Rasulova^{1,3}, M. V. Shmakova³, 2024

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 50 A. Nevskogo Pr., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185030, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

³Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, 9 Sevastyanova Str., St. Petersburg, 196105, Russia

*nfilatov@rambler.ru

DIAGNOSIS OF THE STATE AND CHANGES IN THE ECOSYSTEM OF LAKE ONEGO AND WATERSHED BASED ON THE INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM

Received 18.01.2024, Revised 31.05.2024, Accepted 01.06.2024

Abstract

The results of the diagnosis of the state and changes in the ecosystem of Onegskoe Lake (Lake Onego) and the watershed are presented using the developed information and analytical system “Lake Onego-watershed” (IAS), consisting of a comprehensive database (DB), a combined database of Roshydromet and Northern water problems institute/Karelian Research

Ссылка для цитирования: Филатов Н.Н., Савчук О.П., Баклагин В.Н., Галахина Н.Е., Зобков М.Б., Исаев А.В., Кондратьев С.А., Калинкина Н.М., Новикова Ю.С., Расулова А.М., Шмакова М.В. Диагноз состояния и изменений экосистемы Онежского озера и водосбора на основе информационно-аналитической системы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 2. С. 10–24. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-2

For citation: Filatov N.N., Savchuk O.P., Baklagin V.N., Galakhina N.E., Zobkov M.B., Isaev A.V., Kondratyev S.A., Kalinkina N.M., Novikova I.S., Rasulova A.M., Shmakova M.V. Diagnosis of The State and Changes in The Ecosystem of Lake Onego and Watershed Based on The Information-Analytical System. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 2, 10–24. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-2

Center of the Russian Academy of Sciences on the nutrient load for the modern period 1995–2022, the ILLM mathematical model for assessing the removal of nutrients from the watershed and the formation of the nutrient load on the lake and the 3D-mathematical model SPLEM, developed for Lake Onego. Information was collected on the main sources of nutrient load in the Lake Onego catchment area, as well as available field observation data on the flow of nitrogen and phosphorus into the lake. The contribution of different nutrient sources coming from river runoff, diffuse sources, urban discharges and from trout farms was calculated for the lake and the main limnic areas. Based on data from field observations over the past 30 years and the results of numerical experiments using the SPLEM model with a grid resolution of 1 km it is shown that the ecosystem of the lake not only did not restored after the reduction in anthropogenic load after 1991, but eutrophication of waters in the lips and bays continues due to the influence of industrial and agricultural enterprises, trout farms and noticeable climate warming. Functional for the IAS “Lake Onego-catchment” to visualize the main modeling results on a 1 km grid was developed, and a web application interface has been created.

Keywords: Lake Onego, nutrient load, primary production, limnic areas, biogeochemical model, information and analytical system, seasonal and long-term changes of the ecosystem

1. Введение

Продолжающееся ухудшение состояния экосистем (эвтрофирование, браунификация (покоричневение), загрязнение) крупных озер мира объясняется интенсивным использованием водных, биологических, энергетических, рекреационных, транспортных и других ресурсов озер и их водосборов в условиях потепления климата [1–3]. Одной из основных проблем улучшения состояния качества вод крупных озер России является отсутствие или недостаточная разработанность систем поддержки принятия управленческих решений (water management systems), которые должны включать комплекс моделей для озер и водосборов, объединенных с базой данных и знаний в единой информационно-аналитической системе (ИАС). Без такой системы сложно количественно определять экосистемные взаимодействия, надежно оценивать роль климатических и антропогенных факторов, определять причины изменений экосистем и на этой основе выработать обоснованные предложения для лиц принимающих решения по рациональному использованию ресурсов озер [4, 5]. Такая система создается для Онежского озера и водосбора [6], прототип подобной системы разработан для Балтийского моря и водосбора — NEST [7]. Для создаваемой ИАС имеется необходимая информационная база [8], созданные ранее математические модели для озера и водосбора [9–11]. Исследования показали [12, 13], что озеро в целом остается в олиготрофном состоянии и имеет относительно высокое качество воды для питьевого и промышленного использования. Однако в последние три декады отмечаются неблагоприятные тенденции ухудшения состояния экосистемы, в особенности в заливах и губах, обусловленные как потеплением климата, так и антропогенными факторами, такими как сбросы неочищенных или недостаточно очищенных вод населенных пунктов и поступлением биогенных веществ от многочисленных форелевых хозяйств¹, расположенных в заливах и на водосборе [14]. Проведенные ранее на 3D-модели SPLEM [11] численные эксперименты по оценке функционирования экосистемы Онежского озера с использованием комплекса разрозненных экспериментальных данных за 1984–2020 гг., полученных в основном из литературных источников [8, 14, 15] показали [11], что этих данных не достаточно как для корректной калибровки и верификации моделей ILLM [9] для оценки выноса биогенных элементов с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем, так и для расчетов состояния и изменений экосистемы озера на модели SPLEM [10]. Таким образом, цель настоящей работы — реконструировать внешние биогенные нагрузки по наиболее надежным данным Росгидромета и Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) и воспроизвести изменчивость экосистемы Онежского озера в современный период 1985–2020 гг., чтобы оценить интенсивность процессов эвтрофирования озера.

2. Материалы и методы

Для целей диагноза состояния экосистемы Онежского озера была использована разработанная ИАС «Онежское озеро-водосбор». Разработанная ИАС включает в себя три основных модуля: трехмерную модель высокого разрешения SPLEM (St. Petersburg Lake Ecosystem Model) [11], модель формирования биогенной нагрузки на водосборе ILLM (Institute of Limnology Load Model) [9], базу данных контактных и дистанционных лимнологических наблюдений [16].

¹ В настоящее время Республика Карелия производит более 75 % российской форели.

Информационная система ИАС реализована в виде (клиент-серверного) веб-приложения на платформе ADONETEDM по технологии «Firstmodel»², что позволяет поддерживать высокую скорость доступа к данным, а также пользоваться базой данных на персональном компьютере без установки дополнительных приложений (типа Access), использующих только платформу NET³ [17].

2.1. База данных

Для интеграции натуральных данных в ИАС «Онежское озеро-водосбор» было выполнено обобщение и унификация данных о химико-биологических, морфометрических и гидрологических характеристиках Онежского озера, собранных как на сети Росгидромета, так и полученных по разным проектам и грантам ИВПС КарНЦ РАН в результате экспедиционных работ. Создана единая сеть станций измерений на акватории озера с приведением данных к единому формату размерностей и сформирована база гидробиологических и гидрохимических данных по сопоставимым методикам [16]. Станции измерений были сгруппированы по лимническим районам Онежского озера для дальнейшего их использования для оценки текущего состояния Онежского озера (рис. 1).

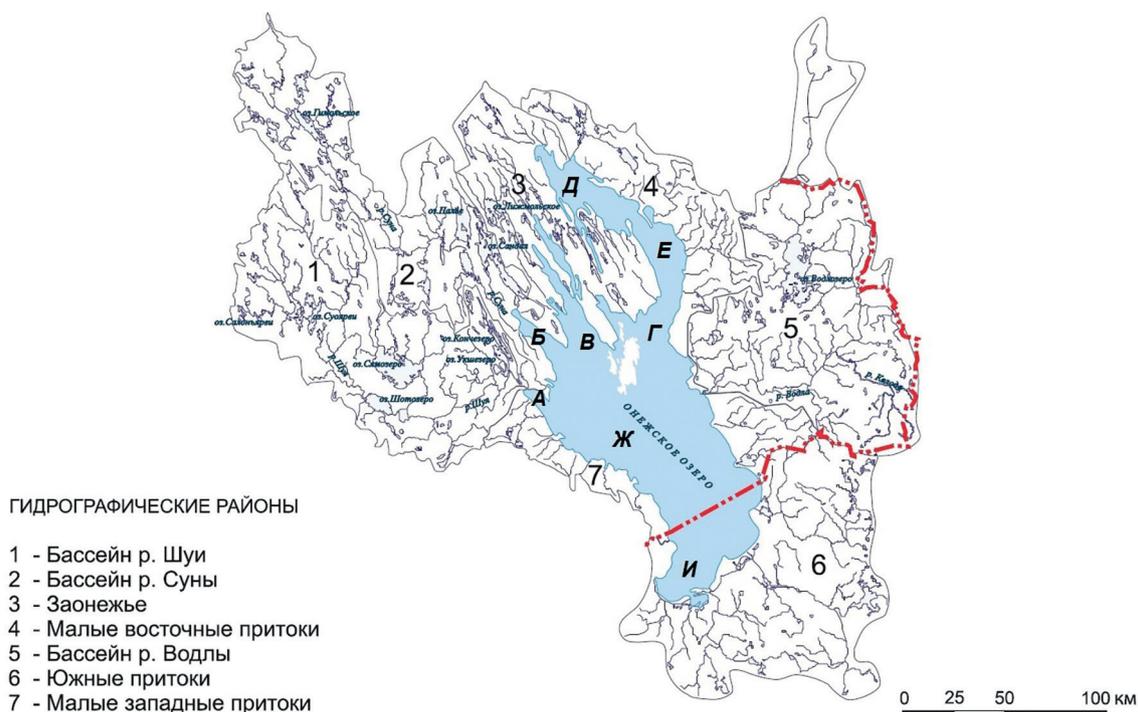


Рис. 1. Онежское озеро и водосбор. Гидрографические и лимнические районы озера: А — Петрозаводская губа, Б — Кондопожская губа, В — Большое Онего, Г — Малое Онего, Е — Заонежский залив, Д — Повенецкий залив, Ж — Центральное Онего, И — Южное Онего

Fig. 1. Lake Onega and watershed. Hydrographic and limnic areas of the lake: A — Petrozavodsk Bay, Б — Kondopoga Bay, В — Bolshoye Onego, Г — Maloe Onego, Е — Zaonezhsky Bay, Д — Povenets Bay, Ж — Central Onego, И — Southern Onego

Получены данные спутниковых наблюдений за температурой поверхности воды (ТПВ), ледяным покровом и концентрацией хлорофилла «а» за период 1998–2022 гг., представленные продуктами GlobColour службы мониторинга морской среды Copernicus и Ocean Color Climate Change Initiative (CMEMS)⁴ и Ocean Color Climate Change Initiative (OC-CCI)⁵ [18]. Для каждого года за период 1998–2022 гг. рассчитаны средне-сезонные значения хлорофилла «а» за шесть месяцев (май–октябрь) для всей акватории Онежского озера.

² <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/framework/data/adonet/ado-net-overview> (дата обращения: 31.05.2024)

³ <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/> (дата обращения: 31.05.2024)

⁴ <https://data.marine.copernicus.eu/products> (дата обращения: 31.05.2024).

⁵ <https://climate.esa.int/en/projects/ocean-colour/data/> (дата обращения: 31.05.2024).

Реконструированы данные по сопоставимым методикам по содержанию фосфора (общему и минеральному), азоту (аммонийному, нитратному, нитритному и общему) в этих двух притоках (реки Шуя и Водла), полученных на сети Росгидромета (*Карельский центр* по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, КарЦГМС) и нерегулярных наблюдений ИВПС КарНЦ РАН⁶ за разные годы на более, чем 20 реках за период 1995–2022 гг. Для сопоставления данных использованы диаграммы, изображающие временной ход химических показателей, их взаимную корреляцию, а также диаграммы Блэна и Алтмана [19].

2.2. Модель формирования биогенной нагрузки на водосборе ILLM (*Institute of Limnology Load Model*)

Модель ILLM, разработанная ранее в ИНОЗ РАН [9] с модификациями, предложенными Институтом агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [20], которые учитывают вынос биогенных элементов не только с учетом доз внесения удобрений и выноса азота и фосфора с урожаем, но и в зависимости от типов почв. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосборе, позволяет рассчитывать вынос биогенных элементов с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания этих веществ водосбором и гидрографической сетью. Модель работает с шагом по времени в 1 год и учитывает классификацию типов подстилающих поверхностей водосбора. Дифференциация земного покрова водосбора озера производилась с использованием коллекций многоспектральных спутниковых снимков. Показано, что на водосборе Онежского озера различные типы леса составляют более 80 % территории, на сельскохозяйственные угодья приходится около 1 % от площади всего водосбора; урбанизированные территории составляют менее 0,1 % площади водосбора [21].

2.3. Трехмерная модель высокого разрешения *St. Petersburg Lake Ecosystem Model (SPLEM)*

Модель экосистемы озера (SPLEM) представляет собой модификацию Санкт-Петербургской модели эвтрофикации и её дальнейшую адаптацию для моделирования экосистемы Онежского озера [10, 11]. SPLEM состоит из двух модулей — гидрофизического и биогеохимического. Гидрофизический модуль основан на модели общей циркуляции Массачусеттского Института Технологии (MITgcm) [22], адаптированной для условий больших стратифицированных пресноводных озер. Биогеохимический модуль SPLEM описывает взаимодействие круговоротов азота и фосфора в воде и донных отложениях озера. Переменные состояния в пелагической подсистеме представлены биомассами зоопланктона, двух функциональных групп фитопланктона (диатомовые и недиатомовые), концентрациями детритного азота и фосфора, растворенными органическими (лабильными и стойкими) соединениями азота и фосфора, растворенными неорганическими соединениями азота (аммоний и окисленный азот, включающий нитриты плюс нитраты) и растворенным минеральным фосфором (фосфаты), а также и «регистратором» баланса продукционно-деструкционных процессов — растворенным в воде кислородом. Подсистема донных отложений описывает динамику бентических азота и фосфора.

Биогеохимические взаимодействия между этими переменными описывают комплекс процессов, наиболее важных для функционирования экосистемы озера: первичную продукцию фитопланктона, потребляющего растворенные минеральные соединения азота и фосфора; выедание фитопланктона зоопланктоном; отмирание фитопланктона и зоопланктона, пополняющее запасы детрита, оседающего на дно; регенерацию минеральных соединений за счет экскреции продуктов катаболизма зоопланктона и в процессе минерализации детрита, а также лабильных и стойких компонентов растворенных органических соединений азота и фосфора; минерализацию донных отложений с поступлением её продуктов в водную толщу; денитрификацию в воде и донных отложениях.

2.4. Реконструирование рядов внешней биогенной нагрузки

Для целей формирования рядов биогенной нагрузки с водосбора было проведено сопоставление информации о сезонном содержании биогенных элементов в основных притоках Онежского озера — реках Шуя и Водла⁷, полученных ИВПС и КарЦГМС с 1995 по 2022 гг. При определении содержания $P_{\text{общ}}$ в воде рек Шуя и Водла в КарЦГМС и ИВПС использовался фотометрический метод, основанный на персульфатном окислении [23]. Нормативная документация по данной методике изложена в РД 52.24.387-95 [24⁸]; РД 52.24.387-2006; РД 52.24.387-2019). При этом в научных исследованиях ИВПС используют более низкий предел обнаружения фосфора общего — 2 мкг/л [23], чем в Росгидромете, где с 1997 по 2005 год использовалась методика РД 52.24.387-95, с нижним пределом определения $P_{\text{общ}}$ всего 40 мкг/л. Измерения содержания $P_{\text{общ}}$ проводились ИВПС посезонно, а в некоторые годы ежемесячно на более, чем 20 реках [15],

⁶ В дальнейшем для краткости будем упоминать ИВПС.

⁷ В настоящее время КарЦГМС проводит определение содержания биогенных элементов только на двух реках озера.

⁸ Приводим в качестве примера для краткости ссылку только на РД.

а КарЦГМС — поквартально. Мера соответствия данных измерений КарЦГМС и ИВПС оценивалась по Международной методике внешнего лабораторного сличения результатов анализа «Intercomparison 1630»⁹ [25]. Для рассматриваемого периода времени 1995–2022 гг. методики определения азотсодержащих веществ в притоках, применяемые в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС и Карельского ЦГМС, различались диапазонами определяемого содержания нитратного азота, чувствительностью. Сезонность измерений и полнота данных по содержанию форм азота была такой же, что и при определении фосфора. Результаты измерения содержания нитратов, полученные ИВПС и КарЦГМС, оказались сопоставимыми. В результате корректировки и объединения данных двух организаций с использованием вышеописанного подхода был реконструирован ряд содержания азотсодержащих веществ в реках Шуя и Водла за 1995–2022 гг. Информация по другим притокам озера была восстановлена на основе данных, полученных в ИВПС в результате объездов более 20 притоков озера в 2001–2002, 2007–2008 и 2015–2016 гг. с учетом информации о сезонном ходе содержания биогенных элементов и трендов, выявленных для основных притоков озера (рек Шуя и Водла). В результате были реконструированы ряды данных содержания $P_{\text{общ}}$ $P_{\text{мин}}$ в реках Шуя и Водла. На рис. 2 представлен пример содержания $P_{\text{общ}}$ в р.Шуя.

С учетом реконструированных данных о концентрации биогенных элементов в речном стоке, с использованием модели ILLM было рассчитано поступление биогенных элементов в Онежское озеро с водосбора, для 7 подрайонов (см. рис. 1) для периода 1985–2020 гг. Для оценки вклада точечных источников в формирование биогенной нагрузки на озеро были использованы доступные данные статистических форм 2-ТП водхоз. Значения атмосферных выпадений задавались по [26] и составляли 0,046 тN/(км² год) и 0,0013 тP/(км² год).

3. Результаты

3.1. Оценка состояния Онежского озера на основе данных натурных наблюдений

На основе ежегодных многолетних исследований вод и донных отложений Онежского озера за последние 30 лет показано, что экосистема озера не только не восстановилась после уменьшения антропогенной на-

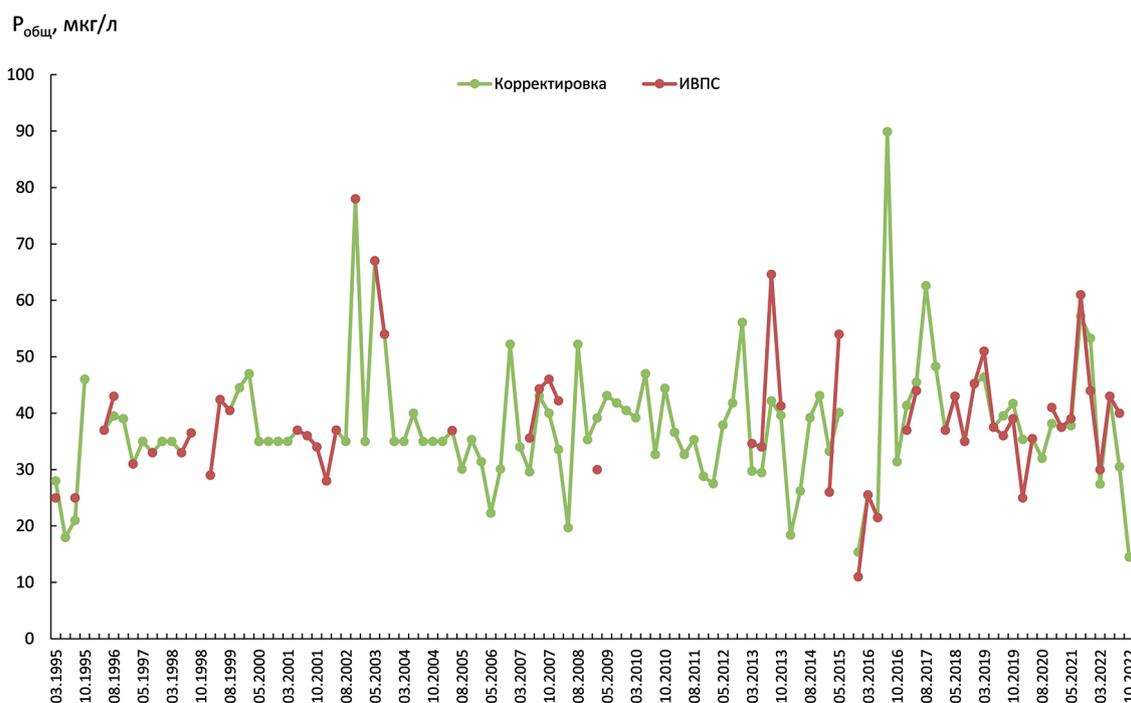


Рис. 2. Реконструированный ряд данных содержания $P_{\text{общ}}$ в р.Шуя с использованием результатов КарЦГМС и ИВПС за 1995–2022 гг.

Fig. 2. Reconstructed series of data on the content of P_{total} in the Shuya River using the results of Karelian Center of Hydrometeorology and NWPI for 1995–2022

⁹ ИВПС участвовал в международном, межлабораторном сличении гидрохимической информации и выполнял гидрохимические исследования по международным грантам, и в соответствии с положениями ХЕЛКОМ.

грузки после 1991 г., но и продолжается загрязнение и эвтрофирование вод в губах и заливах из-за влияния промышленных и сельскохозяйственных предприятий, форелевых хозяйств и заметного потепления климата в последние 30 лет [14, 27]. На водосборе озера, начиная с 1989 г., среднегодовая температура воздуха превышала климатическую норму 1961–1990 гг. на 0,9–1,2 °С, в зимний период — на 1,7–3,0 °С. При потеплении климата на водосборе в условиях мягких зим увеличился речной сток в зимнее время, повысилась цветность воды, концентрация общего железа, общего фосфора, углекислого газа и отмечается снижение рН воды, угнетение глубоководного бентоса в Петрозаводской и Кондопожской губах [28]. Результаты исследований показали, что в северной части Кондопожской губы, несмотря на современное сокращение нагрузки от сточных вод ЦБК, сохраняется дефицит кислорода в придонных слоях воды. Содержание общего фосфора в придонных слоях воды превышает его концентрации в эпилимнионе (верхнем слое озера) в 3,6 раз, концентрация углекислого газа — в 5 раз, насыщенность воды кислородом снижена до 49 %. Речные и сточные воды являются основными источниками поступления органического вещества (ОВ) и биогенных элементов (БЭ) в Кондопожскую губу Онежского озера [26, 28]. В губе располагается 11 форелевых хозяйств в основном в центральной его части, которые являются дополнительным источником ОВ и БЭ. В результате было показано, что накопление минеральных форм биогенных элементов в воде, наблюдающееся зимой, влечет интенсивное развитие фитопланктона в весенне-летний период и появление локальной зоны эвтрофирования в центральной части Кондопожской губы [29]. В настоящее время суммарная годовая фосфорная нагрузка (речной сток, сточные воды ЦБК, форелевые хозяйства) на Кондопожскую губу превышает критическую для ее экосистемы. Суммарная реальная фосфорная нагрузка (антропогенная и природная) оказалась порядка 83 тонн, в то время как по данным П.А. Лозовика и др. [26], расчетная критическая нагрузка общим фосфором на Кондопожскую губу составляет 63 тонны. Изменения химического состава воды, обнаруженные в губах озера, могут распространяться на остальную акваторию озера, а также привести к структурной или количественной трансформации планктонных и бентосных сообществ всего водоема [27, 29]. По данным инструментальных измерений с самолетов и спутников за последние 60 лет Онежское озеро зимой обычно полностью покрыто льдом, но при сильном потеплении в 2019–2020 гг. по спутниковым данным впервые отмечены аномально высокая температура воды и впервые зимой на большей части открытого плеса Онежского озера отсутствовал ледяной покров. Весенний термический бар прошел на 10–15 дней раньше среднемноголетних сроков, а ТПВ в июне 2020 г. была на 5–8 °С выше среднемноголетних значений для этого периода года [29].

Результаты сравнения спутниковых данных с имеющимися опубликованными натурными данными, полученными в результате экспедиционных исследований ИВПС показали, что данные GlobColour в большей степени согласуются с натурными данными, собранными с исследовательских судов [30]. Оказалось, что за период наблюдений 1998–2022 гг. в поверхностном слое Онежского озера отсутствует статистически значимый тренд в концентрации хлорофилла «а», а сама величина концентрации в поверхностных водах озера не претерпела значительных изменений за последние 20 лет.

В открытом плесе озера в 2020 г. наблюдалось смещение фенологических фаз развития. Летний состав фитопланктона, сезонный максимум хлорофилла «а» и первичной продукции сформировались на месяц раньше среднемноголетнего срока. Концентрация хлорофилла «а» в июне 2020 г. в заливах и пелагической части превышала величины июня за последние 20 лет. В течение 2017–2023 гг., в разные сезоны экспедиционных исследований Кондопожской губы, содержание хлорофилла «а» в районе расположения форелевых ферм в 3–4 раза превышало концентрацию этого пигмента в прилегающих районах озера. По содержанию хлорофилла «а» трофический статус губы оценивается как α -эвтрофный [31]. Одним из значимых аспектов влияния форелевых хозяйств на озеро является загрязнение производственными отходами, основным источником которых являются корма (часть их остаются неиспользованными), а также продукты жизнедеятельности рыб. В результате функционирования форелевых хозяйств серьезные изменения могут происходить во всех гидробиологических сообществах — фитопланктоне, зоопланктоне, бентосе и иктитофауне водоемов. С учетом того, что к 2025 г. в Республике Карелия имеются планы значительного увеличения товарного производства радужной форели более 30 тыс. тонн в год (<http://kareliatrout.ru/novosti/akvakul-tura-v-karelii>, дата обращения 31.05.2024), важной задачей становится описание процессов в узких заливах и губах озера для корректной оценки т. н. «допустимой» биогенной нагрузки на озеро и отдельные его районы.

3.2. Поступление внешней биогенной нагрузки

Оценка поступления биогенных элементов (азота и фосфора) с водосбора в озерную экосистему для рассматриваемого периода проводилось по результатам моделирования формирования внешней нагрузки модели ILLM. Предварительно модель была откалибрована по данным реконструированных рядов натуральных наблюдений в створах основных притоков озера — реках Шуя, Водла. По результатам моделирования

дана оценка долевого вклада выноса фосфора и азота с подбассейнов в суммарную биогенную нагрузку на Онежское озеро в год средней водности. Показано, что основными поставщиками биогенных элементов в озеро являются южные притоки озера, а также реки Шуя и Суна (рис. 3).

После детальной оценки сельскохозяйственной составляющей внешней биогенной нагрузки на отдельные подбассейны и водосбор Онего в целом проведен расчет поступления азота и фосфора в озеро с учетом вклада других компонентов нагрузки, а также удержания биогенных элементов водосбором и первичными звеньями его гидрографической сети. Согласно расчетам, проделанным по модели ILLM, нагрузка на озеро со всего водосбора в 2021 году составляла 572,2 тР/год и 10615,7 тN/год. Оценки биогенной нагрузки на озеро при производстве форели на озере и водосборе получена путем обобщения информации из доступных источников [32, 33], с сайта Ассоциации форелеводов Карелии¹⁰ (<http://kareliatrout.ru/novosti/akvakul-tura-v-karelii>, дата обращения 31.05.2024). А сведения об объемах товарной продукции рыбоводства в Карелии получены при обобщении данных из указанных выше литературных источников и предоставленных Министерством сельского и рыбного хозяйства РК по запросу ИВПС. Объемы производства форели на акватории озера и на водосборе в 1984–2023 гг. по этим данным представлены на рис. 4.

На рис. 4 отмечается значительный экспоненциальный рост темпов производства форели с 1994 по 2023 гг. как на водосборе, так и на акватории Онежского озера. По данным сайта форелеводов Карелии наибольший процент выращивания форели приходится на Кондопожскую губу — 37 %, Большое Онего — 11 %, Малое Онего — 15 %, Заонежье — 5 %, Повенецкий залив — 12 %, Уницкую губу — 5 %, Лижемскую губу — 15 %. По данным [34] от 1 т товарной продукции рыбоводства в водные объекты поступает 8 кг $P_{\text{общ}}$ /год и 50 кг $N_{\text{общ}}$ /год. Собранная информация позволила установить тренды возрастания рыбопродукции и соответствующей биогенной нагрузки на водные объекты за последние годы, как на всем водосборе, так и на трех основных рыбопроизводящих подбассейнах: Заонежье и водосборах рек Суны и Шуи.

В результате проведенных оценок поступления внешней биогенной нагрузки были получены ряды, отражающие межгодовую изменчивость. На рис. 5 представлены составляющие реконструированной фосфорной нагрузки, которая использовалась в качестве граничных условий при проведении диагностического расчета современного состояния экосистемы озера на трехмерной высокоразрешающей эко-гидродинамической модели. Онежское озеро является фосфор лимитированным водоемом, поэтому представим анализ изменчивости внешней фосфорной нагрузки из различных источников для озера в целом и в особенности Кондопожской губы, которая является наиболее эвтрофированной акваторией Онежского озера, в акваторию которой поступают стоки Кондопожского ЦБК (рис. 5, б).

Анализ рис. 5 показывает, что в исследуемый период, реконструированная фосфорная нагрузка на озеро за 1985 по 2020 гг. в целом не имеет явно выраженного тренда и в среднем для этого периода составляет 780 тонн общего фосфора в год. При этом можно отметить увеличение поступления фосфора с речным стоком и за счет

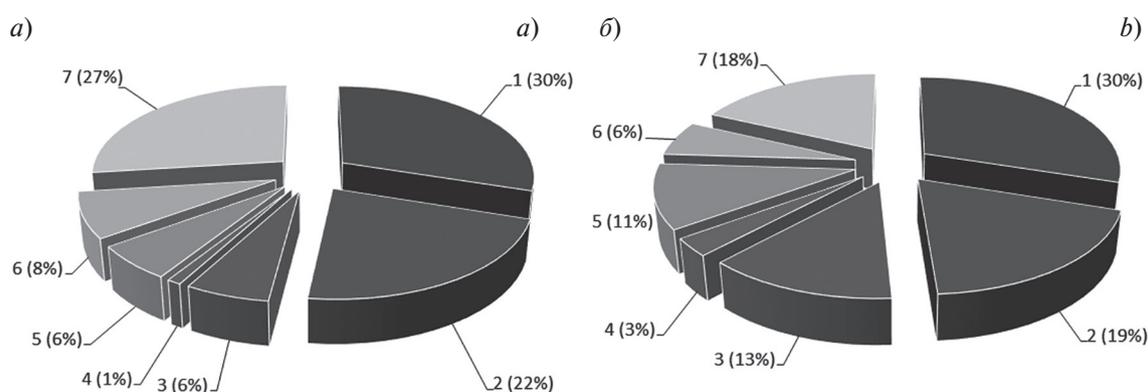


Рис. 3. Долевой вклад выноса фосфора (а) и азота (б) с изучаемых подбассейнов в суммарную нагрузку на Онежское озеро в 2021 г. (год средней водности): 1 — р. Шуя, 2 — р. Суна, 3 — Заонежье, 4 — восточные притоки, 5 — р. Водла, 6 — южные притоки 7 — западные притоки[21]

Fig. 3. Share contribution of phosphorus (a) and nitrogen (b) removal from the studied sub-basins to the total load on Lake Onego in 2021 (year of average water content): 1 — r. Shuya, 2 — r. Suna, 3 — Zaonezhye, 4 — eastern tributaries, 5 — r. Vodla, 6 — southern tributaries 7 — western tributaries [21]

¹⁰ <http://kareliatrout.ru/novosti/akvakul-tura-v-karelii> (дата обращения: 31.05.2025).

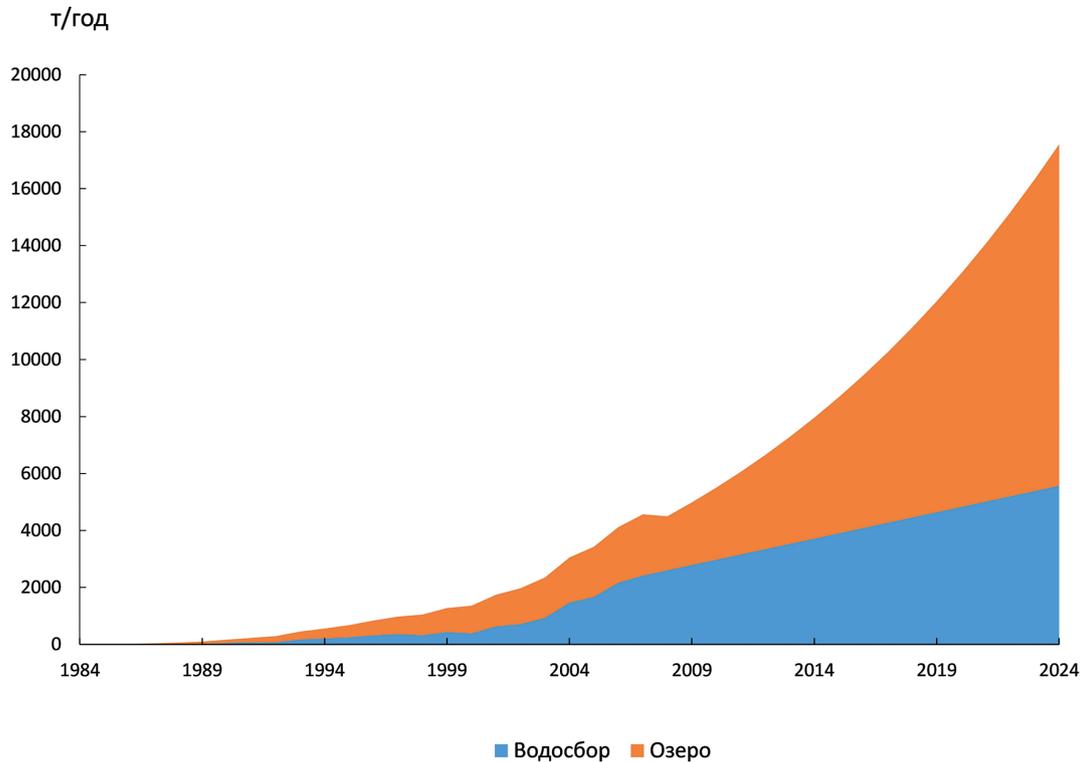


Рис. 4. Объем производства форели на акватории Онежского озера и на его водосборе в 1984–2023 гг.

Fig. 4. Volume of trout production in the waters of Lake Onego and its catchment in 1984–2023

деятельности хозяйств по выращиванию форели и уменьшение поступления из точечных источников, связанное с уменьшением общего водопотребления на хозяйственные нужды и проведением работ по модернизации очистных сооружений. Рассматривая нагрузку, поступающую в акваторию Кондопожской губы (рис. 5, б), важно отметить снижение общей нагрузки фосфором в период с 2005 по 2020 годы, по сравнению с периодом

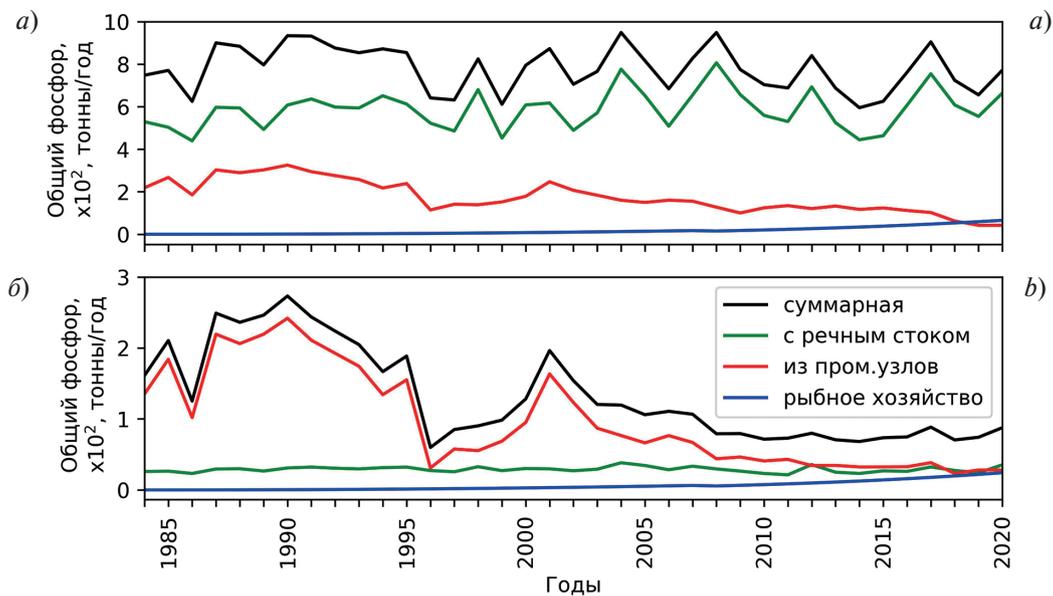


Рис. 5. Внешняя фосфорная нагрузка из различных источников для Онежского озера в целом (а) и Кондопожскую губу (б).

Fig. 5. External phosphorus load from various sources for Lake Onego as a whole (a) and Kondopoga Bay (b)

с 1985 по 2004 годы в среднем с 170 тонн в год до 82 тонн в год. При этом наблюдаются разнонаправленные тренды в поступлении фосфора из различных источников антропогенной нагрузки, а именно уменьшение поступления фосфора со стоком ЦБК и рост нагрузки, связанной с деятельностью форелевых хозяйств.

3.3. Результаты моделирования экосистемы Онежского озера на модели SPLEM

С использованием модели SPLEM были выполнены расчеты по оценке межгодовой изменчивости состояния экосистемы озера для периода с 1985 по 2020 год с разрешением 1 км. При расчетах, в качестве внешней биогенной нагрузки, задавались реконструированные поступления азота и фосфора с речным стоком, точечных источников (сбросы Петрозаводского, Кондопожского и Медвежьегорского промышленных узлов), атмосферные выпадения и поступления, связанные с деятельностью форелевых хозяйств. С учетом описанных выше особенностей реконструированной фосфорной нагрузки были выполнены численные эксперименты, отражающие современное состояние экосистемы всего Онежского озера. На рис. 6 и 7 представлена межгодовая изменчивость концентрации средневзвешенного по объему общего фосфора в период максимального зимнего накопления (апрель) и осредненного за вегетативный период (май–октябрь), а также годовая первичная продукция, для открытых районов озера (рис. 6) и для Петрозаводской и Кондопожской губ (рис. 7).

Анализ межгодовой изменчивости содержания фосфора в водах озера показывает, что экосистема озера адекватно реагирует на изменения внешней биогенной нагрузки. Так в ответ на увеличение нагрузки, поступающей с речным стоком, наблюдается увеличение концентрации общего фосфора (рис. 6, а) в период максимального накопления с 10–11 мг/м³ до 12–13 мг/м³. В изменчивости концентрации фосфора в Петрозаводской губе (рис. 7, а) не наблюдается ярко выраженных трендов, при колебаниях концентрации в преде-

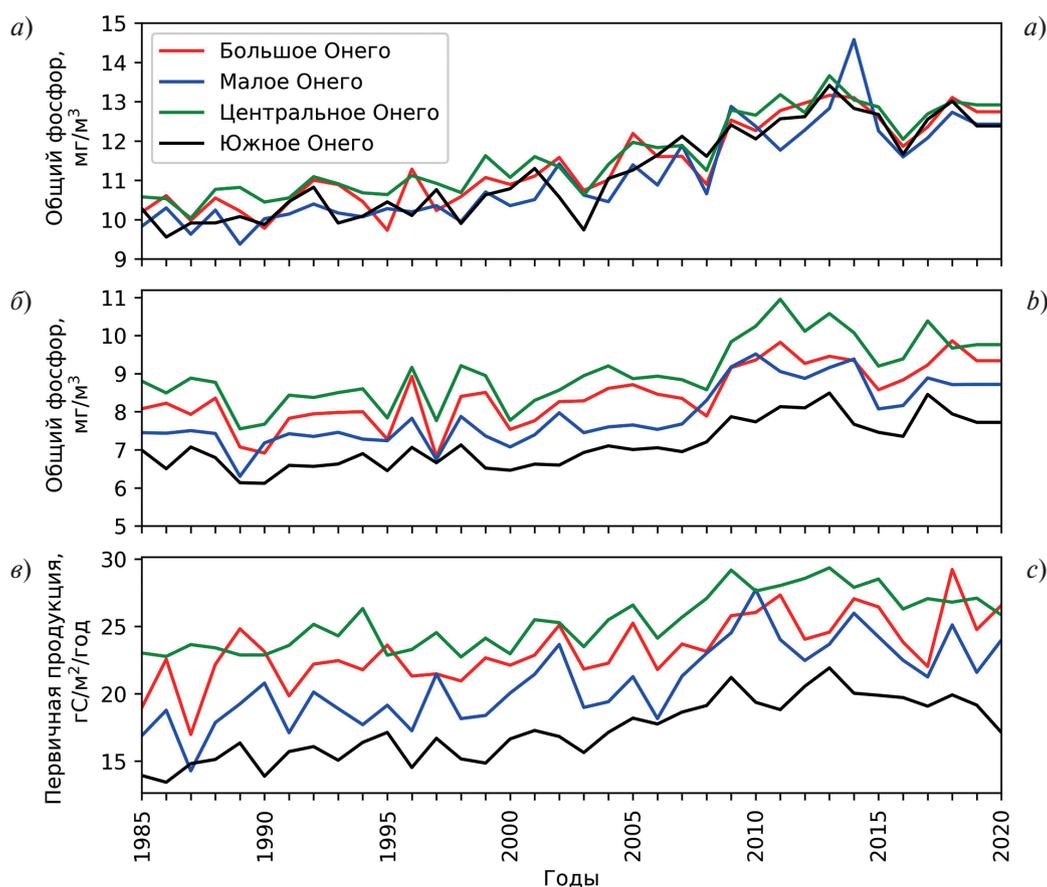


Рис. 6. Межгодовая изменчивость концентрации средневзвешенного по объему общего фосфора в период максимального накопления (апрель) (а), за вегетативный период (май–октябрь) (б) и годовой первичной продукции (в) для открытых лимнических районов Онежского озера

Fig. 6. Interannual variability of the concentration of volume-weighted average total phosphorus during the period of maximum accumulation (April) (a), during the growing season (May–October) (b) and annual primary production (c) for open limnic areas of Lake Onega

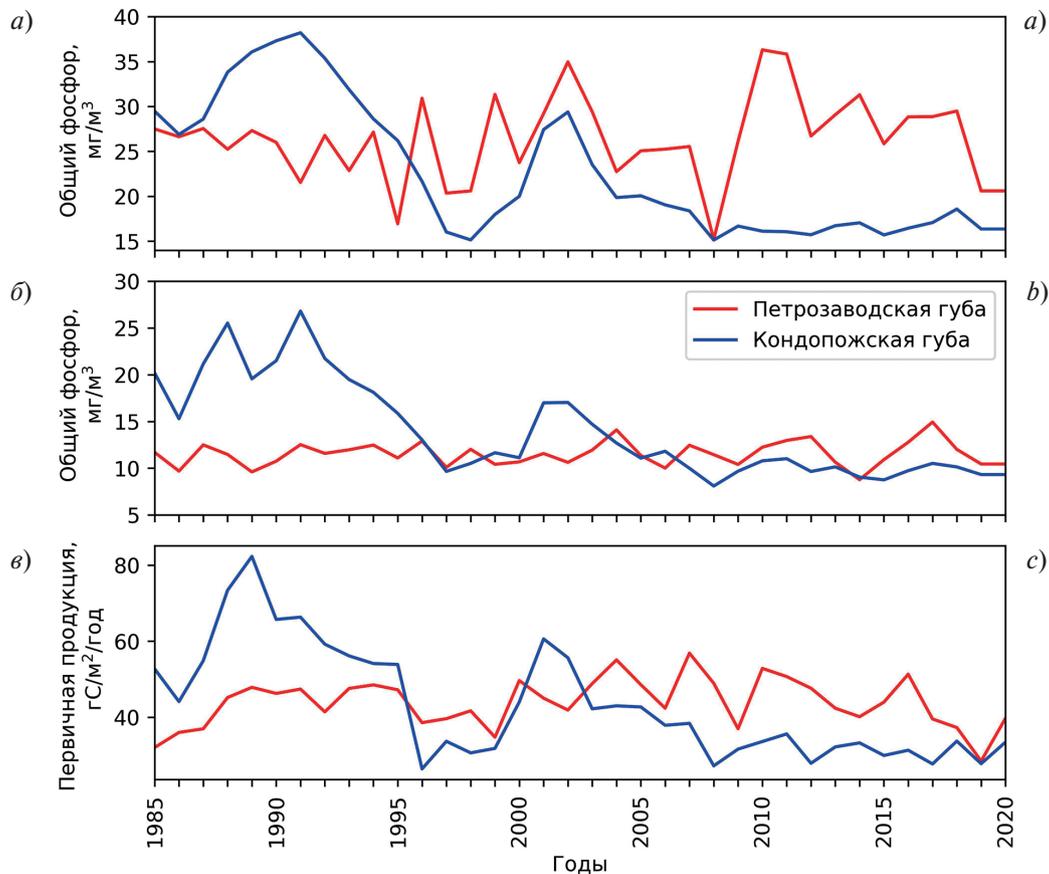


Рис. 7. Межгодовая изменчивость концентрации средневзвешенного по объему общего фосфора в период максимального накопления (апрель) (а), за вегетативный период (май–октябрь) (б) и годовой первичной продукции (в) в Петрозаводской и Кондопожской губах Онежского озера

Fig. 7. Interannual variability of the concentration of volume-weighted average total phosphorus during the period of maximum accumulation (April) (a), during the growing season (May–October) (b) and annual primary production (c) in Petrozavodsk and Kondopoga bays of Lake Onego

лах от 20 до 30 мг/м³. В Кондопожской губе наблюдается уменьшение концентрации фосфора с 25–30 мг/м³ до 15–17 мг/м³, что связано с падением задаваемой при расчетах внешней биогенной нагрузки. В период с мая по октябрь (рис. 6, б и рис. 7, б) наблюдается общее снижение содержания концентрации фосфора в водах озера, связанное с жизнедеятельностью фитопланктона, который переводит растворенный биодоступный фосфор во взвешенное органическое вещество и при отмирании в виде детрита выпадает на дно. В среднем, снижение содержания фосфора в водной среде в вегетативный период по сравнению с зимними условиями составляет 1,2–1,4 раза. При этом, отмеченные для зимнего периода особенности межгодовой изменчивости сохраняются и для вегетативного периода.

Анализ воспроизведенной на модели годовой первичной продукции (рис. 6, в) показывает, что в исследуемый период в открытых районах Онежского озера в целом наблюдается ее увеличение. Наибольшее увеличение средней за 1985–1989 гг. (по сравнению с аналогичным осреднением за 2016–2020 гг.) годовой первичной продукции отмечается в Малом и Южном Онего на 18 и 20 %, соответственно. В Большом и Центральном Онего увеличение от начала периода исследований к его окончанию 2020 г. составляет 11 %. Основной вклад в увеличение первичной продукции вносит увеличение содержания фосфора в водах озера, увеличение которого, как было показано выше, вызвано увеличением его поступления с речным стоком, особенно в зимний период.

В Петрозаводской губе (рис. 7, в) выраженного тренда в межгодовой изменчивости первичной продукции не наблюдается. В то же время отмечается некоторое снижение с 38,4 гС/м²/год в среднем за период с 1985 по 1989 года до 32,6 гС/м²/год за период 2016–2020 гг. первичной продукции фитопланктона. Аналогичная, но более выраженная, картина снижения первичной продукции наблюдается и в Кондопожской губе, но здесь наблюдаемое снижение первичной продукции составляет 46 % в 2016–2020 гг. по сравнению

с 1985–1989 гг. Однако анализ многолетних данных по структуре и количеству фитопланктона в Кондопожской губе показал значительное увеличение в этом заливе численности (в 4 раза) и биомассы фитопланктона (в 3 раза) в 2019–2020 гг. Кроме того, в последние годы в состав субдоминантов постоянно входят наиболее продуктивные зеленые водоросли, а также цианобактерии [31]. Таким образом, отмечается явное противоречие между результатами моделирования и анализом состояния Кондопожской губы на основе данных натурных наблюдений. При этом результаты моделирования не противоречат представлениям о реакции акватории на значительное снижение лимитирующего биогенного элемента, поступающего из внешних источников (см. рис. 7, в). Данное противоречие может свидетельствовать о том, что доступные для реконструкции внешней нагрузки данные об антропогенном воздействии на Кондопожскую губу требуют проверки и уточнения, особенно это касается данных о поступлении биогенных веществ от точечных источников.

4. Заключение и выводы

В результате проведенных исследований с использованием разработанной ИАС были выполнены оценки современного состояния Онежского озера и его отдельных заливов по данным натурных наблюдений. Проведены исследования, на основе которых были получены ряды межгодовой изменчивости поступления биогенных элементов с водосбора на акваторию озера, а также проведены численные эксперименты с использованием 3-мерной математической модели по оценке межгодовой изменчивости экосистемы в период с 1985 по 2020 годы. Анализ полученных результатов показал, что по данным измерений за последние 30 лет экосистема озера не только не восстановилась после уменьшения антропогенной нагрузки после 1991 г., но и продолжается эвтрофирование вод в губах и заливах из-за влияния промышленных и сельскохозяйственных предприятий, форелевых хозяйств и заметного потепления климата. Рассчитанная с использованием модели ILLM биогенная нагрузка с водосбора имеет тенденцию к увеличению в рассматриваемый период и в среднем для этого периода составляет 780 тонн общего фосфора в год. Численные эксперименты с моделью SPLEM с разрешением 1 км для периода 1985–2020 гг. показывают, что в открытых районах наблюдается увеличение первичной продукции фитопланктона как реакция на увеличение внешнего воздействия, связанного с поступлением биогенных элементов с водосбора и их выходом из донных отложений. Для Петрозаводской и, в большей степени, Кондопожской губ результаты моделирования первичной продукции расходятся с оценками, полученными на основе данных натурных наблюдений. Данное противоречие скорее всего является результатом задания данных о поступлении фосфора из точечных источников, не соответствующих действительности. Поэтому, для совершенствования воспроизведения состояния экосистемы Онежского озера в целом, а также губ и заливов на 3D модели экосистемы, требуется получение адекватных нагрузок биогенными элементами, поступающими из точечных источников.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование разработанной ИАС «Онежское озеро-водосбор» является инструментом для совместного анализа состояния экосистемы озера как по данным натурных наблюдений, так и с использованием методов математического моделирования, что при дальнейшем усовершенствовании системы позволит ее применение как средства поддержки принятия управленческих решений.

Финансирование

Работы выполнены по гранту РФФ 22-17-00193.

Funding

The work was performed under the RNF grant 22-17-00193.

Литература

1. Jenny J.-Ph., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes // Journal Great Lakes Research. 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 686–702. doi:10.1016/j.jglr.2020.05.0068
2. Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России // под ред. Н.Н. Филатова: Коллективная монография. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2020. 255 с.
3. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake One-go, Russia? // Journal of Great Lakes Research. 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 850–861. doi:10.1016/j.jglr.2020.02.008

4. Никитин В.М., Абасов Н.В., Бычков И.В., Осипчук Е.Н. Уровенный режим озера Байкал: проблемы и противоречия // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 74–83. doi:10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(74-83)
5. Зоркальцев В.И., Калихман А.Д., Калихман Т.П., Синюкович В.Н. Проблема регулирования уровня озера Байкал // ЭКО. 2022. № 8. С. 24–43. doi:10.30680/ЕСО0131-7652-2022-8-24-43
6. Филатов Н.Н., Баклагин В.Н., Исаев А.В., Кондратьев С.А., Савчук О.П. Разработка информационно-аналитической системы «озеро — водосбор» как метода фундаментальных исследований и инструмента обоснования управленческих решений (на примере Онежского озера) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 161–172. doi:10.17076/lim1683
7. Wulf F., Sokolov A., Savchuk O.P. Nest — a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual // Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre, Technical Report No. 10. 2013.
8. Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
9. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор — водоток — водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
10. Исаев А.В., Савчук О.П., Филатов Н.Н. Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть I: Межгодовая изменчивость и пространственное распределение // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 76–97. doi:10.59887/fpg/e1m2-63b5-rhvg
11. Савчук О.П., Исаев А.В., Филатов Н.Н. Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть II: Сезонная динамика и пространственные особенности; интегральные потоки // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 98–109. doi:10.59887/fpg/9mg5-run6-4zr8
12. Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4–18. doi:10.35567/19994508201711
13. Галахина Н.Е., Зобков М.Б. Гидрохимические исследования в районе расположения форелевых хозяйств в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 года // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 76–87. doi:10.17076/lim1599
14. 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
15. Сабылина А.В., Лозовик П.А., Зобков М.Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.
16. Баклагин В.Н. Формирование структуры единой базы данных гидробиологических и гидрохимических измерений Онежского озера // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Девятая международная научная конференция-школа молодых ученых; 18–20 октября 2023 г., Москва: Материалы конференции. М.: ИПМех РАН, С. 38–41.
17. Швецова А.А., Звягинцева А.В. Информационно-аналитическая система поддержки принятия решений для стратегического планирования развития регионов и городов // Мягкие измерения и вычисления. 2020. Т. 36, № 11. С. 55–66. doi:10.36871/26189976.2020.11.005
18. Volpe G., Colella S., Brando V., Forneris V., LaPadula F., DiCicco A., Sammartino M., Bracaglia M., Artuso F., Santoleri R. The Mediterranean Ocean Colour Level 3 Operational Multi-Sensor Processing // Ocean Science. 2019. Vol. 15, iss. 1. P. 127–146. doi:10.5194/os-15-127-2019
19. Bland, J.M., Altman, D.G. Applying the Right Statistics: Analyses of Measurement Studies // Ultrasound Obstetrics & Gynecology. 2003. Vol. 22, iss. 1. P. 85–93. doi:10.1002/uog.122
20. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Огуздин А.С., Субботин И.А. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175–183.
21. Kondrat'ev S.A., Bryukhanov A. Yu., Shmakova M.V., Rasulova A.M. Assessment of Possible Changes in the Biogenic Load onto Lake Onego under the Effect of Anthropogenic and Climatic Factors // Water Resources. 2024. Vol. 51, No. 3, pp. 241–251. doi:10.1134/S0097807824700751
22. Marshall J., Hill C., Perelman L., et al. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102(C3). P. 5733–5752. doi:10.1029/96JC02776
23. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике // Под. ред. Лозовика П.А., Н.Е. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
24. РД 52.24.382–2019 Массовая концентрация фосфатного фосфора в водах. Методика измерений фотометрическим методом // Сост. Ю.А. Андреев, Е.С. Килейнова, И.А. Рязанцева, А.А. Назарова. Ростов-на-Дону.: Росгидромет, Изд-во Гидрохимического института, 2019. 24 с.

25. Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn. Oslo (Norway): Norwegian Institute for Water Research. 2016. Report N. 7081 // ICP Waters report 129/2016. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546>
26. 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 натуральных наблюдений. // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi:10.17076/lim303
27. Назарова Л.Е., Исакова К.В., Калинин Н.М., Балаганский А.Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия Русского географического общества. 2022. Т. 154, № 1. С. 28–36. doi:10.31857/S0869607122010086
28. 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 // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2022. Vol. 17. P. 100619. doi:10.1016/j.enmm.2021.100619
29. Калинин 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. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899. doi:10.31857/S2587556621060078
30. Баклагин В.Н., Новикова Ю.С. Динамика концентрации хлорофилла *a* в поверхностных водах Онежского озера по спутниковым наблюдениям за 1998–2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 289–302. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-6-289-302
31. Смирнова В.С., Теканова Е.В., Калинин Н.М. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях садкового выращивания форели // Трансформация экосистем. 2024. Т. 7, № 1 (24). С. 177–195. doi:10.23859/estr-220822
32. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 г. // Под ред. А.Н. Громцева. Петрозаводск: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия, 2021. 277 с.
33. Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Кучко Я.А., Комулайнен С.Ф., Савосин Е.С., Барышев И.А. Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2018. 127 с.
34. Китаев С.П., Ильмаст Н.В., Стелигова О.П. Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 40 с.

References

1. Jenny J.-Ph., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. *Journal Great Lakes Research*. 2020, 46, 4, 686–702. doi:10.1016/j.jglr.2020.05.0068
2. Filatov N.N. (Editor): Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the Great Lakes of Russia. *Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Petrozavodsk*, 2020. 255 p. (In Russian).
3. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *Journal of Great Lakes Research*. 2020, 46, 4, 850–861. doi:10.1016/j.jglr.2020.02.008
4. Nikitin V.M., Abasov N.V., Bychkov I.V., Osipchuk E.N. Level regime of Lake Baikal: problems and contradictions. *Geography and Natural resources*. 4, 2019, 353–361. doi:10.1134/S1875372819040073
5. Zorkaltsev V.I., Kalikhman A.D., Kalikhman T.P., Sinyukovich V.N. The problem of regulating the level of Lake Baikal. *ECO*. 2022, 8, 24–43. doi:10.30680/ECO0131-7652-2022-8-24-43 (In Russian)
6. Filatov N.N., Baklagin V.N., Isaev A.V., Kondratiev S.A., Savchuk O.P. Development of an information and analytical system “lake — watershed” as a method of fundamental research and a tool for substantiating management decisions (on the example of Lake Onego). *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022, 6, 161–172. doi:10.17076/lim1683 (In Russian).
7. Wulf F., Sokolov A., Savchuk O.P. Nest — a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual. *Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre, Technical Report No. 10*. 2013.
8. Lake Onegskoe. Atlas. *Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010, 151 p. (In Russian).
9. Kondratiev S.A., Shmakova M.V. Mathematical modeling of mass transfer in the watershed — watercourse — reservoir system. *St. Petersburg, Nestor-Istoriya*, 2019. 246 p. (In Russian).
10. 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
11. Savchuk O.P., Isaev A.V., Filatov N.N. Three-Dimensional Hindcast of Nitrogen and Phosphorus Biogeochemical Dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015 Part II. Seasonal Dynamics and Spatial Features; Integral Fluxes. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 2, 98–109. doi:10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8

Диагноз состояния и изменений экосистемы Онежского озера и водосбора на основе информационно-аналитической системы
Diagnosis of the state and changes in the ecosystem of Lake Onego and watershed based on the information-analytical system

12. Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Syarki M.T. Ecosystem of Lake Onega: response of aquatic communities to anthropogenic factors and climate change. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2017, 1, 4–18. doi:10.35567/19994508201711 (In Russian).
13. Galakhina N.E., Zobkov M.B. Hydrochemical studies in the area of trout farms in Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Trudy Karel'skogo Nauchnogo Centra RAS*. 2022, 6, 76–87. doi:10.17076/lim1599 (In Russian).
14. Tekanova E.V., Kalinkina N.M., Makarova E.M., Smirnova V.S. Current trophic state and water quality of Lake Onego. *Biology of Inland Waters*. 2023, 6, 740–746. doi:10.31857/S0320965223060335 (In Russian).
15. Sabylina A.V., Lozovik P.A., Zobkov M.B. Chemical composition of water in Lake Onego and its tributaries. *Water Resources*. 2010, 37, 6, 717–729 (In Russian).
16. Baklagin V.N. Formation of the structure of a unified database of hydrobiological and hydrochemical measurements of Lake Onego. *Physical and Mathematical Modeling of Processes in Geological Environments: Ninth International Scientific Conference-School of Young Scientists; October 18–20, 2023, Moscow, Conference materials. M., IPMechanics RAS*, 38–41 (In Russian).
17. Shvetsova A.A., Zvyagintseva A.V. Information and analytical decision support system for strategic planning of the development of regions and cities. *Soft Measurements and Calculations*. 2020, 36, 11, 55–66. doi:10.36871/26189976.2020.11.005 (In Russian).
18. Volpe G., Colella S., Brando V., Forneris V., LaPadula F., DiCicco A., Sammartino M., Bracaglia M., Artuso F., Santoleri R. The Mediterranean Ocean Colour Level 3 Operational Multi-Sensor Processing. *Ocean Science*. 2019, 15, 1, 127–146. doi:10.5194/os-15-127-2019
19. Bland J.M., Altman D.G. Applying the Right Statistics: Analyses of Measurement Studies. *Ultrasound Obstetrics & Gynecology*. 2003, 22, 1, 85–93. doi:10.1002/uog.122
20. Bryukhanov A. Yu., Kondratyev S.A., Oblomkova N.S., Oguzdin A.S., Subbotin I.A. Methodology for determining the nutrient load of agricultural production on water bodies. *Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop Products and Livestock Farming*. 2016, 89, 175–183 (in Russian).
21. Kondrat'ev S.A., Bryukhanov A. Yu., Shmakova M.V., Rasulova A.M. Assessment of Possible Changes in the Biogenic Load onto Lake Onego under the Effect of Anthropogenic and Climatic Factors. *Water Resources*. 2024, 51, 3, 241–251. doi:10.1134/S0097807824700751
22. Marshall J., Hill C., Perelman L., et al. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997, 102(C3), 5733–5752. doi:10.1029/96JC02776
23. Lozovik P.A., Efremenko N.E. (Eds). Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical practice. *St. Petersburg, Nestor-Istoria*, 2017. 272 p. (In Russian).
24. Andreev Yu.A., Kileinova E.S., Ryazantseva I.A., Nazarova A.A. RD52.24.382–2019. Mass concentration of phosphate phosphorus in waters. Measurement technique using the photometric method. *Comp. Rostov-on-Don., Roshydromet, Publishing House of the Hydrochemical Institute*, 2019. 24 p. (In Russian).
25. Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn. Oslo (Norway): Norwegian Institute for Water Research. 2016. Report N. 7081. ICP Waters report 129/2016. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546>
26. Lozovik P.A., Borodulina G.S., Karpechko Yu.V., Kondratiev S.A., Litvinenko A.V., Litvinova I.A. Nutrient load on Lake Onego according to field observations. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Trudy Karel'skogo Nauchnogo Centra RAS*. 2016, 5, 35–52. doi:10.17076/lim303 (In Russian).
27. Nazarova L.E., Isakova K.V., Kalinkina N.M., Balagansky A.F. The influence of climate warming on the winter runoff of the Shuya River and the consequences for the zoobenthos of Lake Onego. *News of the Russian Geographical Society*. 2022, 154, 1, 28–36. doi:10.31857/S0869607122010086 (In Russian).
28. 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. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022, 17, 100619. doi:10.1016/j.enmm.2021.100619
29. Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Efremova T.V., Palshin N.I., Nazarova L.E., Baklagin V.N., Zdrovennov R.E., Smirnova V.S. Response of Lake Onego ecosystems of in the spring-summer period to the abnormally high air temperature of winter 2019/2020. *Izvestia RAS. Geographical Series*. 2021, 85, 6, 888–899. doi:10.31857/S2587556621060078 (In Russian).
30. Baklagin V.N., Novikova Yu.S. Dynamics of chlorophyll a concentration in the surface waters of Lake Onego according to satellite observations for 1998–2022. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2023, 20, 6, 289–302. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-6-289-302 (In Russian).
31. Smirnova V.S., Tekanova E.V., Kalinkina N.M. Phytoplankton as an indicator of the state of the ecosystem of the Kondopoga Bay of Lake Onego in conditions of trout cage farming. *Transformation of Ecosystems*. 2024, 7, 1 (24), 177–195. doi:10.23859/estr-220822 (In Russian).

32. Gromtsev A.N. (Ed). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2020. Petrozavodsk, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Karelia, 2021. 277 p. (In Russian).
33. Sterligova O.P., Ilmast N.V., Kuchko Ya.A., Komulainen S.F., Savosin E.S., Baryshev I.A. The state of freshwater bodies of Karelia with commercial cultivation of rainbow trout in cages. *Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018. 127 p. (In Russian).
34. Kitaev S.P. Ilmast N.V., Steligova O.P. Methods for assessing the nutrient load from trout farms on aquatic ecosystems. *Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*, 2006. 40 p. (In Russian).

Об авторах

ФИЛАТОВ Николай Николаевич, главный научный сотрудник, член-корреспондент РАН, профессор, ORCID: 0000-0002-3280-4375, Scopus Author ID: 7005879364, SPIN-код: 5378-8040, e-mail: nfilatov@rambler.ru

САВЧУК Олег Павлович, старший научный сотрудник, кандидат географических наук, ORCID: 0000-0002-3873-4662

БАКЛАГИН Вячеслав Николаевич, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-0060-1653, e-mail: slava.baklagin@mail.ru

ГАЛАХИНА Наталия Евгеньевна, старший научный сотрудник, кандидат химических наук, ORCID: 0000-0003-4435-6095, SPIN-код: 2023-1470, Scopus ID: 55620886300, WoS Research ID: AAE-2153-2020, e-mail: kulakovanata@mail.ru

ЗОБКОВ Михаил Борисович, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории гидрохимии и гидрогеологии, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0003-3859-3991, WoS ResearcherID: M-4057-2013, Scopus Author ID: 16204620300, SPIN-код: 7913-6642, e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

ИСАЕВ Алексей Владимирович, старший научный сотрудник, кандидат географических наук, ORCID: 0000-0003-2005-4949, WoS ResearcherID C-1370-2014, Scopus Author ID 25641182000, SPIN-код: 4059-6017, e-mail: isaev1975@gmail.com

КОНДРАТЬЕВ Сергей Алексеевич, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-1451-8428, WoS ResearcherID: AAN-9826-2020, Scopus Author ID: 55929551100, SPIN-код: 1145-3646, e-mail: kondratyev@limno.org.ru

КАЛИНКИНА Наталия Михайловна, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории гидро-биологии, доктор биологических наук, ORCID: 0000-0001-6363-0470, WoS ResearcherID: U-1473-2017, Scopus Author ID: 6602225317, SPIN-код: 8999-2115, e-mail: cerioda@mail.ru

НОВИКОВА Юлия Сергеевна, инженер-исследователь, ORCID: 0000-0002-3330-6861, WoS ResearcherID: JXM-4004-2024, Scopus Author ID: 58564691800, SPIN-код: 7332-3911, e-mail: NovYuliana@gmail.com

РАСУЛОВА Анна Мурадовна, научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-4400-2000, WoS ResearcherID: R-8815-2016, Scopus Author ID: 55347712100, SPIN-код: 3888-6462, e-mail: arasulova@limno.ru

ШМАКОВА Марина Валентиновна, ведущий научный сотрудник, доктор географических наук, ORCID: 0000-0002-2393-0070, Scopus Author ID: 15064845100, SPIN-код: 9076-9784, e-mail: m-shmakova@yandex.ru