

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504.4.062.2

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ЭКОСИСТЕМ КРУПНЫХ ОЗЕР

Н. Н. Филатов¹, А. В. Исаев², О. П. Савчук^{3,4}

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³ Институт наук о земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

⁴ Институт Балтик Нест, Центр Балтийского моря Стокгольмского университета, Швеция

Изменения гидрологического режима и экосистем Ладожского и Онежского озер исследовались по данным натуральных наблюдений и моделирования биогеохимических потоков вещества. Разработана модель экосистемы озера в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации с учетом динамики биогенов в донных отложениях. Выполнены диагностические (1996–2015 гг.) и прогностические (2016–2040 гг.) оценки возможных изменений термогидродинамики и экосистемы Ладожского озера. Начальные и граничные условия для численных экспериментов задавались по данным натуральных наблюдений. Сравнение результатов моделирования с наблюдениями показало удовлетворительное соответствие пространственно-временной динамики гидрофизических и биогеохимических характеристик. Показаны возможные изменения гидрофизических процессов, первичной продукции и биогеохимических потоков вещества в Ладожском озере до 2040 г. при изменении климата по сценарию А1В. Модель может быть использована для исследования экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в экосистемах крупных стратифицированных озер в условиях изменения климата и антропогенных воздействий.

Ключевые слова: крупные озера; современное состояние; математическое моделирование; экосистема; будущие изменения.

N. N. Filatov, A. V. Isaev, O. P. Savchuk. ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE AND FORECASTING OF CHANGES IN THE HYDROLOGICAL REGIME AND ECOSYSTEMS OF LARGE LAKES

Changes in the hydrological regimes and ecosystems of lakes Ladoga and Onego were studied using *in situ* data and simulations of biogeochemical nutrient fluxes. A lake ecosystem model has been developed, representing the biogeochemical cycling matter by transport and transformation processes, taking into account the dynamics of nutrients

in bottom sediments. Diagnostic (1996–2015) and prognostic (2016–2040) assessments of possible changes in the hydrodynamic conditions and ecosystem of Ladoga Lake were carried out. The initial and boundary conditions for the numerical experiments were set according to field observations. The comparison of simulated and observed results showed a satisfactory match of the spatial-temporal dynamics of hydrophysical and biogeochemical characteristics. Possible changes in the hydrophysical processes, primary production, and biogeochemical nutrient fluxes in Lake Ladoga until 2040 under climate change scenario A1B are shown. The model can be used to study processes in the ecosystem and the biogeochemical cycles occurring in ecosystems of large stratified lakes under climate change and human impact.

Keywords: large lakes; current state; mathematical modeling; ecosystem; future changes.

Введение

Одна из важных проблем современной лимнологии – диагноз состояния и долгосрочное прогнозирование состояния водных экосистем крупных озер для планирования экономической деятельности, рационального использования и охраны внутренних водоемов. При наличии многих пользователей ресурсов крупных озер, таких как энергетика, водный транспорт, питьевое и промышленное водоснабжение, биоресурсы, рекреация, требуется разработать соответствующие интегрированные системы управления. При отсутствии таких систем, включающих необходимые математические модели, возникают серьезные проблемы рационального использования ресурсов водоемов, как это имело место для озера Байкал в 2015–2017 гг. в условиях маловодья [Синюкович, Чернышев, 2018].

Для создания систем управления для крупнейших озер России, таких как Байкал, Каспий, Ладожское и Онежское, требуются данные, знания об объектах управления, а также соответствующие математические модели. Для Ладожского и Онежского озер (далее – Ладога и Онего) такие модели были созданы более 10 лет назад в СПб ЭМИ РАН с использованием экспериментальных данных и знаний, полученных в ИНОЗ РАН и ИВПС КарНЦ РАН [Rukhovets, Filatov, 2010; Руховец и др., 2011; Ладога, 2013]. Разработка и последующее развитие трехмерных моделей термогидродинамики и функционирования экосистем Ладоги и Онего позволили воспроизвести процесс антропогенного эвтрофирования, определить ассимиляционный потенциал и предельные допустимые значения поступления фосфора и азота для сохранения и восстановления трофического статуса этих озер извне [Руховец и др., 2011; Меншуткин и др., 2013]. Однако в моделях, разработанных в СПб ЭМИ РАН, недостаточно корректно задавались атмосферные воздействия, слабо описывался ледовый режим, не рассмат-

ривались механизмы пространственно-временных изменений концентраций и биомасс компонентов экосистем, воспроизводимых моделью в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации. Появилась потребность разработать трехмерные модели термогидродинамики и экосистем озер, лишенные указанных выше недостатков.

Важной проблемой лимнологии является оценка вклада антропогенных и природных, в том числе и климатических, факторов в изменение экосистем озер. Однако сделать это только с использованием анализа данных натуральных экспериментов не представляется возможным, поскольку экосистема озера в природных условиях не является полностью наблюдаемой системой, в то время как математическому моделированию в принципе доступны все элементы экосистемы озер. При создании моделей экосистем крупнейших озер России важно было учесть последовательность обнаруженных стадий деструктивных сукцессий, закономерности реакции биоты на определенные уровни воздействия на экосистемы, которые были получены по данным многолетних натуральных наблюдений.

Диагноз гидрологического режима экосистем по натурным наблюдениям

Экспериментальные исследования ИНОЗ РАН [Петрова и др., 2005, 2010] и ИВПС КарНЦ РАН [Филатов и др., 2015] показали, что процесс трансформации экосистем Ладожского и Онежского озер представляет собой последовательность этапов, в течение которых менялся вклад внешних антропогенных и климатических факторов, изменилась роль внутриводоемных процессов.

Увеличение фосфорной нагрузки на Ладожское озеро с начала 1960-х годов привело к эвтрофированию водоема [Петрова и др.,

2010]. Последующее резкое снижение фосфорной нагрузки в 90-х годах XX века не привело к быстрому возвращению озера к мезо- и олиготрофному состоянию. Основной причиной этого было ускорение процесса регенерации биогенных элементов, описанного по данным натуральных наблюдений и воспроизведенного на математической модели [Ладога, 2013; Филатов и др., 2015]. Натурные экспериментальные исследования позволили предположить, что в результате активизации микробиологических процессов, включая разложение органического вещества водными грибами, произошло вовлечение в оборот ранее накопленных в озере биогенов [Иофина, 1992; Филатов и др., 2015]. Как отмечают Н. А. Петрова с соавторами [2010], «Резкое снижение поступления фосфора в озеро в 90-х гг. XX в. увеличило дисбаланс экосистемы... В последние годы отмечается принципиально новый этап функционирования экосистем озера при преобладании деструкционных процессов над продукционными... Экосистемы Ладожского озера пережили период быстрых изменений и вступили в новую фазу некоторой стабилизации внутриводоемных процессов в новых условиях уменьшения антропогенной нагрузки и потеплений климата».

Исследования Онежского озера показали, что изменение гидрологического режима из-за регулирования уровня воды озера в конце 50-х годов XX века Верхне-Свирской ГЭС составляет всего несколько десятков сантиметров и они мало повлияли на экосистему озера. Напротив, увеличение биогенной нагрузки и сброс загрязнений в 1960–1990 гг. привели к эвтрофированию и загрязнению водоема. Натурные исследования показали, например, что в разные годы в Онежском озере процесс антропогенного эвтрофирования проходил по разному типу: гетеротрофному или автотрофному [Филатов и др., 2015]. Увеличение уровня трофии ряда губ (Петрозаводской, Кондопожской) Онежского озера сопровождалось снижением стабильности фитопланктона и перестройкой его структуры, направленной на изменение соотношения крупно- и мелкоклеточных видов в сторону увеличения доли последних, имеющих более широкие возможности адаптации к меняющимся условиям окружающей среды [Калинкина и др., 2018]. Сообщество зоопланктона в центральных олиготрофных районах Онежского озера находилось в динамическом равновесии и было устойчиво. При резком уменьшении антропогенной нагрузки после 1991 г. экосистема Онежского озера, как и Ладожского, медленно восстанавливается. Современное состояние биоценозов Онежского озера в целом отражает

последовательные изменения под воздействием антропогенных факторов – от первоначального повышения продуктивности до заметной трансформации их структуры.

Таким образом, экосистемы этих водоемов пережили период быстрых изменений и в 1990–2000 гг. вступили в новую фазу некоторой стабилизации внутриводоемных процессов [Меншуткин и др., 2015; Филатов и др., 2015].

Ранее по данным математического моделирования и натуральных наблюдений [Петрова и др., 2010; Rukhovets, Filatov, 2010; Ладога, 2013] отмечалось, что основной вклад в эвтрофирование Ладожского и Онежского озер вносили антропогенные факторы. При потеплении климата изменения в развитии фитопланктона были заметны только в осенний период, а неоднородности в развитии зоопланктона не превосходили величин, объясняемых изменениями биогенной нагрузки [Rukhovets, Filatov, 2010]. Однако в последние три декады при потеплении заметно возросла роль климата в изменениях водных экосистем по сравнению с антропогенными [Калинкина и др., 2018; Filatov et al., 2018]. В настоящее время при потеплении климата на водосборе отмечается рост температуры поверхностного слоя воды Ладожского и Онежского озер, изменение сроков вегетационного периода [Filatov et al., 2018]. На водосборе Ладожского и Онежского озер за период 1951–2016 гг. отмечено повышение годовой температуры воздуха на 1,2 °С, суммарного испарения – на 70–80 мм, сумм атмосферных осадков – на 60–90 мм. В качестве климатической нормы использовалось среднее многолетнее значение за 1961–1990 гг. На водосборе озер с конца 80-х годов XX века наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой температуры воздуха, а наиболее значимые ее изменения характерны для зимних месяцев [Назарова, 2010]. В изменчивости температуры воздуха отмечаются квазициклические колебания с временными масштабами от более 30 до нескольких лет. Также за период 1990–2015 гг. отмечается заметный положительный тренд в температуре приповерхностного слоя воды (ТПВ) Ладоги и Онего. Для Ладожского озера увеличение ТПВ составляло для июня–октября от 1,5 до 4,0 °С, а для Онего – от 1,5 до 2,4 °С [Filatov et al., 2018]. За 100 лет наблюдений в среднем на две недели увеличилось число дней, когда поверхность озер свободна ото льда.

При значительной межгодовой изменчивости суммарного речного притока и стока из озер за период 1955–2016 гг. тренды за 60 лет отсутствуют (рис. 1, а), рост годовых сумм осадков компенсируется ростом суммарного испарения (рис. 1,

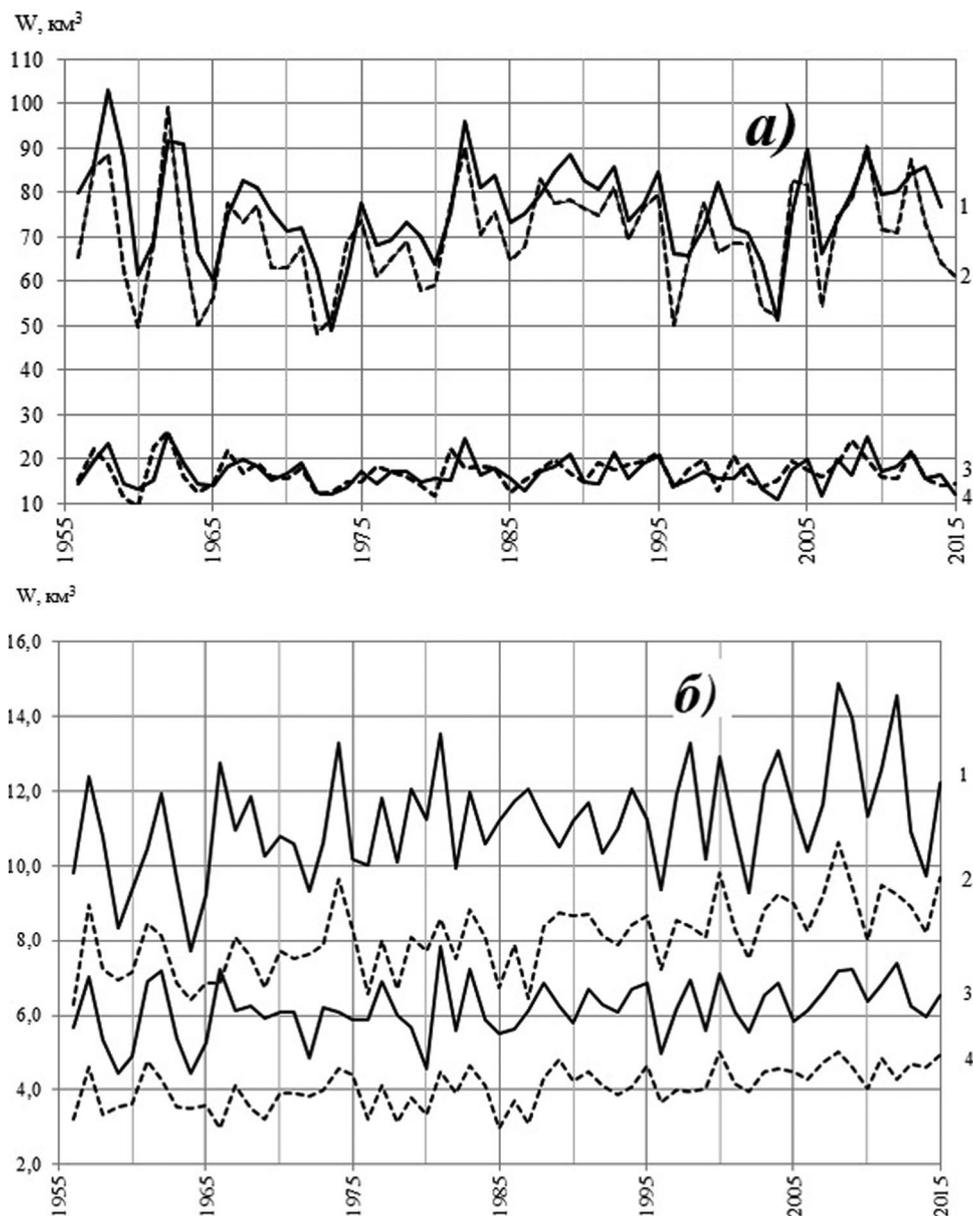


Рис. 1. Изменчивость элементов водного баланса Ладожского и Онежского озер 1955–2016 гг.:

а) 1 – сток реки Невы, 2 – интегральный речной сток в Ладожское озеро; 3 – сток из Онежского озера с рекой Свирь, 4 – интегральный речной сток в Онежское озеро; б) 1 – осадки на зеркало Ладожского озера, 2 – испарение с зеркала Ладожского озера, 3 – осадки на зеркало Онежского озера, 4 – испарение с зеркала Онежского озера

Fig. 1. Variability of water balance elements of Lakes Ladoga and Onego in 1955–2016:

а) 1 – Neva river runoff, 2 – integral river runoff to Lake Ladoga; 3 – runoff from Lake Onego with the Svir River, 4 – integral river runoff to Lake Onego; б) 1 – precipitations on the surface of Lake Ladoga, 2 – evaporation from the surface of Lake Ladoga, 3 – precipitations on the surface of Lake Onego, 4 – evaporation from the surface of Lake Onego

б). Но при потеплении климата и увеличении стока с водосбора в зимний период происходят изменения в формировании гидрохимического режима озер, которые отражаются на увеличении цветности воды, содержании железа и фосфора в гумусовых комплексах, обилии и структуре водных сообществ [Калинкина и др., 2018].

Постановка задачи и результаты прогнозирования экосистем Ладожского озера при возможном изменении климата

Демонстрация возможностей современных моделей биогеохимического круговорота вещества для исследования современного со-



Рис. 2. Схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества [по: Владимирова и др., 2018]

Fig. 2. Scheme of the model variables and matter streams interaction [after: Vladimirova et al., 2018]

стояния и прогнозирования будущего состояния озера выполнена на примере Ладожского озера, поскольку для этого водоема имеется многолетний опыт моделирования экосистем [Меншуткин и др., 2015]. К тому же Ладога, по сравнению с Онега, имеет менее сложную морфометрию и конфигурацию береговой зоны, лучше обеспечена данными по биогенной нагрузке, сведениями о первичной продукции фитопланктона. Разработанную на примере Ладоги трехмерную модель в дальнейшем предполагается использовать для Онежского и других крупных озер России с учетом специфики их экосистем.

Принципиально важной задачей было описать механизмы изменений в экосистемах, воспроизводимые моделью в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации с учетом динамики биогенов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенов. На указанных принципах авторами в рамках гранта РФФИ № 14–17–00740 впервые для Ладожского озе-

ра была применена трехмерная модель биогеохимических круговоротов вещества. При этом была использована и адаптирована для пресного водоема – Ладожского озера – отечественная модель эвтрофикации (SPBEM) [Savchuk, 2002; Рябченко, 2016], которая успешно применялась ранее для оценки современного состояния и прогноза изменений экосистемы Балтийского моря в целом и Финского залива в частности [Рябченко, 2016; Isaev, 2017; Владимирова и др., 2018].

В настоящей работе кратко представим постановку задачи моделирования биогеохимических круговоротов в Ладожском озере и прогностические оценки изменения экосистемы озера при потеплении климата до 2040 г., как пример возможности использования подобного класса моделей для климатических прогнозов пресноводных экосистем.

Отечественная Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM) основана на анализе биогеохимических потоков вещества, которыми и определяется динамика интегральных запасов биогенных элементов в отдельных частях и компонентах экосистемы, включая донные отложения (рис. 2).

Описание модели биогеохимического круговорота Ладожского озера

Основное внимание уделено биогеохимическим круговоротам биогенных элементов и растворенного кислорода, а также функционированию фито- и зоопланктона. Используется модель биогеохимических циклов, разработанная О. П. Савчуком [Savchuk, 2002; Gustafsson et al., 2017]. Схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества представлена в работе [Владимирова и др., 2018]. На рис. 2 показаны процессы переноса вещества между компонентами в результате химико-биологических взаимодействий, формирующих соответствующие потоки азота и фосфора в гомогенном объеме воды и прилегающих к нему донных отложениях.

В модели гетеротрофы питаются автотрофами и взвешенным органическим веществом. Часть извлеченной из воды пищи усваивается, а неусвоенная часть пополняет запасы детрита. Биомасса гетеротрофов уменьшается за счет естественной смертности и выделения в воду продуктов обмена веществ.

Биомасса автотрофов увеличивается в результате фотосинтеза за счет утилизации минеральных соединений азота и фосфора и вследствие азотфиксации и уменьшается за счет естественной смертности, гравитационного оседания, а также выедания гетеротрофами. Концентрация взвешенного органического вещества (детрита) увеличивается благодаря процессам, перечисленным выше, и уменьшается в результате деструкции взвешенного органического вещества до растворенного и гравитационного оседания детрита.

Изменения во времени лабильного растворенного органического азота и фосфора определяются поступлением за счет деструкции детрита, трансформации стойкого растворенного органического вещества до лабильного, за счет процесса фототрансформации, а также части экскреции гетеротрофов. Расходуется лабильное органическое вещество в процессе минерализации. Стойкое органическое растворенное вещество пополняет запасы за счет небольшой части экскреции гетеротрофов и расходуется в результате фототрансформации.

Запасы питательных соединений пополняются за счет минерализации растворенного органического вещества, экскреции гетеротрофов и в результате обмена с донными отложениями, а потребляются автотрофами, в том числе, в случае фосфатов, расходуются и на азотфиксацию сине-зелеными водорослями. Аммоний нитрифицируется до нитратов,

а последние в гипоксических условиях денитрифицируются до молекулярного азота. Растворенный кислород вырабатывается в результате фотосинтеза и расходуется в ходе биохимических процессов окисления: дыхания гетеротрофов, минерализации органического вещества в воде и в донных отложениях, нитрификации. Использование кислорода нитратов в ходе денитрификации при окислении органического вещества рассматривается как процесс, возмещающий соответствующие затраты растворенного кислорода. Запасы азота и фосфора в бентали увеличиваются вследствие оседания автотрофов и органического вещества под воздействием силы тяжести и расходуются при минерализации. При этом в зависимости от окислительно-восстановительных условий большая или меньшая часть фосфора удерживается в донных отложениях, а определенная часть азота покидает систему в виде адсорбированных ионов аммония и в результате денитрификации. Некоторая часть биогенов выводится из моделируемой области в результате захоронения.

Для воспроизведения экосистемы Ладожского озера модель биогеохимических циклов была сопряжена с моделью гидротермодинамики MITgcm (<http://mitgcm.org>), разработанной в Массачусетском технологическом университете. Модульная система комплекса позволяет собрать необходимую конфигурацию для исследуемого объекта. Выбор модели гидротермодинамики объясняется успешностью ее применения для воспроизведения гидротермодинамики больших стратифицированных озер [Bennington и др., 2010; Dorostkar и др., 2010], а также возможностью свободного доступа к исходному коду модели.

Для воспроизведения гидротермодинамики Ладожского озера использовалась следующая конфигурация модели: основной набор пакетов, отвечающий за численное решение уравнений гидротермодинамики; схема замыкания вертикальной турбулентности TKE [Gaspar et al., 1990] (пакет GGL90); уравнение состояния TEOS2010; пакет Sealce (моделирование льда), для условий Ладожского озера задавалась нулевая соленость льда; коэффициенты горизонтального турбулентного обмена задавались константами.

Задача решалась в сферической системе координат с горизонтальным разрешением 2 морские мили, по вертикали задавалось 42 уровня, первые 30 метров через 3 метра, далее шаг по глубине составлял 5 метров.

Необходимые для решения задачи поля – атмосферного давления, температуры воздуха,

компонентов скорости ветра, потоков коротковолновой и длинноволновой приходящей радиации, осадков и влажности воздуха – для современного периода (1996–2015 гг.) брались из архива ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int>). Для задания атмосферного воздействия в будущем климате (2018–2040 гг.) использовались данные, полученные на основе расчетов по региональной климатической модели Центра Росси Шведского метеорологического и гидрологического института RCAO [Döscher, 2002], а на боковых границах для модели RCAO были использованы результаты восстановления атмосферных характеристик на основе двух глобальных моделей климата: ECHAM5/MPI-OM Института метеорологии им. Макса Планка, Гамбург, Германия [Jungclaus, 2006; Roeckner, 2006]. Воспроизведение состояния озера в будущем климате основывалось на сценарии эмиссии парниковых газов A1B [Solomon, 2007].

Граничные условия

В качестве граничных условий в современный период задавались данные о речном стоке и нагрузках азотом и фосфором по: [Ладога, 2013]. При расчетах в будущем климате речной сток и биогенные нагрузки задавались как средние за последние 5 лет современного периода.

Начальные условия

В качестве начальных условий использовались 3D-поля температуры, минеральных и органических форм азота, фосфора и кремния, которые были получены в результате «разгонного» расчета на модели в течение 12 лет, что соответствует условному периоду водообмена Ладожского озера [Филатов, 1991], с повторяющимися полями атмосферного воздействия и при биогенных нагрузках, которые соответствовали условиям 1996 года.

Период расчетов

В литературе, посвященной исследованию Ладожского озера, детально описан процесс трансформации экосистемы Ладожского озера. В этих исследованиях показано, что, несмотря на снижение фосфорной нагрузки, снижения первичной продукции водоема не наблюдается. Объяснение данному явлению дано Петровой с соавторами [2005, 2010]. В этих работах на основе данных наблюдений показано, что в период повышенной фосфорной нагрузки (1976–1991 гг.) в акватории озера увеличи-

лась численность бактериопланктона и водных грибов, что было параметризовано в модели как увеличение скорости внутриводоемного оборота фосфора [Руховец и др., 2010, 2011]. Анализ литературных источников показывает, что к 1996 году экосистема Ладожского озера уже адаптировалась к увеличению численности деструкторов органического вещества. Поэтому расчет современного состояния экосистемы озера выполнялся для периода 1996–2015 гг. Кроме вышесказанного выбор периода связан с доступностью данных по нагрузкам биогенами. Будущий климат рассчитывался для периода 2015–2040 гг.

Сравнение результатов моделирования в современный период с данными натурных наблюдений

Наиболее значимой гидрофизической характеристикой, определяющей внутригодовую эволюцию экосистемы озера, является температура воды. На рис. 3 представлено сравнение годового хода температуры, осредненного с 1999 по 2011 г., с данными натурных измерений [Ладога, 2013]. Период осреднения модели выбран исходя из соображений близости к используемому в [Ладога, 2013] данным натурных наблюдений, на основе которых был получен средний сезонный ход температуры воды озера.

Анализ рис. 3 показывает, что модель корректно воспроизводит основные особенности термического режима озера, а именно время наступления весенней и осенней изотермии, период максимального прогрева, толщину перемешанного слоя. Недостаточное проникновение вод с температурой около 2 °C и менее в глубину в зимний период можно объяснить тем, что используемое горизонтальное разрешение модели не позволяет воспроизводить склоновую конвекцию, которой объясняется проникновение холодных вод на глубины 100–120 метров.

Поскольку продуктивность экосистемы Ладожского озера лимитирована фосфором, то в первую очередь при настройке модели необходимо исследовать способность модели к воспроизведению динамики круговорота фосфора. На рис. 4 представлено сравнение результатов моделирования с данными наблюдений [Ладога, 2013] средних за период открытой воды концентраций общего фосфора и фосфатов. Из рисунка видно, что модель хорошо воспроизводит межгодовую динамику содержания фосфора в водной среде озера.

Опубликованные в работе [Летанская, 2012] данные о биомассе фитопланктона за период

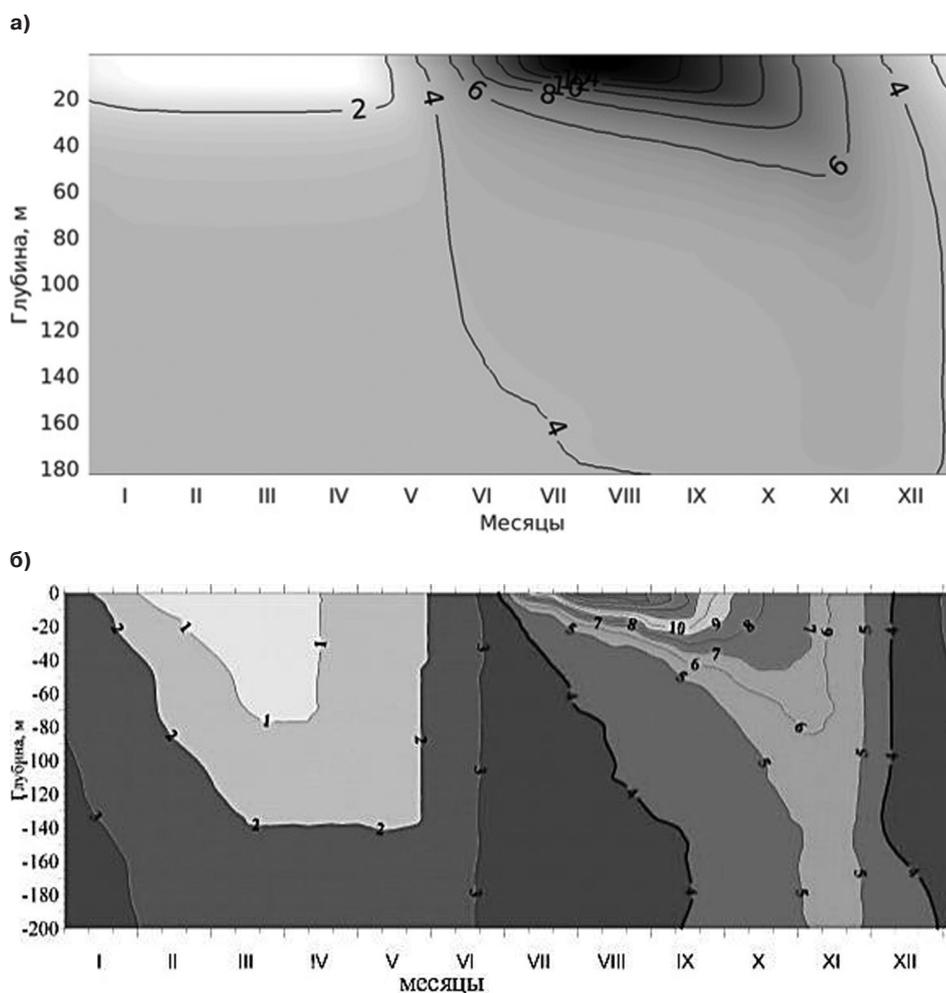


Рис. 3. Годовой ход температуры воды по результатам моделирования (а) и данным натурных измерений (б) [Ладога, 2013]

Fig. 3. Annual water temperature curve according to the modeling results (a) and field measurement data (b) [Ladoga, 2013]

1996–2009 гг. составляют $1,66 \text{ г/м}^3$ при стандартном отклонении $0,3 \text{ г/м}^3$. В модели биомасса выражена в азотных единицах. Для сравнения с данными наблюдений пересчет модельных результатов из азотных единиц в сырую биомассу осуществлялся в соответствии с методологией, предложенной в работе [Savchuk, 2002]. Смоделированные значения биомассы, пересчитанные в сырой вес, за тот же период составляют $1,27 \text{ г/м}^3$ при стандартном отклонении $0,24 \text{ г/м}^3$.

Доступные опубликованные данные о величине первичной продукции [Ладога, 2013] показывают, что среднее значение первичной продукции в летний период с 1993 по 2003 годы составляла $400 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$, модельные значения первичной продукции, осредненные за летний период с 1996 по 2003 гг., составляли $350 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ при стандартном отклонении $120 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$.

По оценочным данным выход фосфора из донных отложений составляет 875 тонн в год [Игнатъева, 1997], по результатам моделирования среднее значение выхода фосфора за современный период составляет 604 тонны в год. Средний вынос фосфора с рекой Невой, осредненный за период с 1999 по 2011 гг., составляет 1249 тонн в год. В работе [Руховец и др., 2011] вынос фосфора с Невой по данным наблюдений для периода 1996–2000 гг. составляет 1320 тонн в год, в работе [Ершова, 2013] – 1000 тонн в год для 2009 года.

К сожалению, более подробных данных, позволяющих детальнее провести верификацию модели, авторам найти не удалось, поскольку в 1991–2006 гг. из-за недостатка финансирования наблюдения на озере были ограничены, а в 2007–2011 гг. выполнялись один раз в период навигации на 16 станциях [Ипатова, 2017]. Однако проведенное сравнение с опубликованными данными

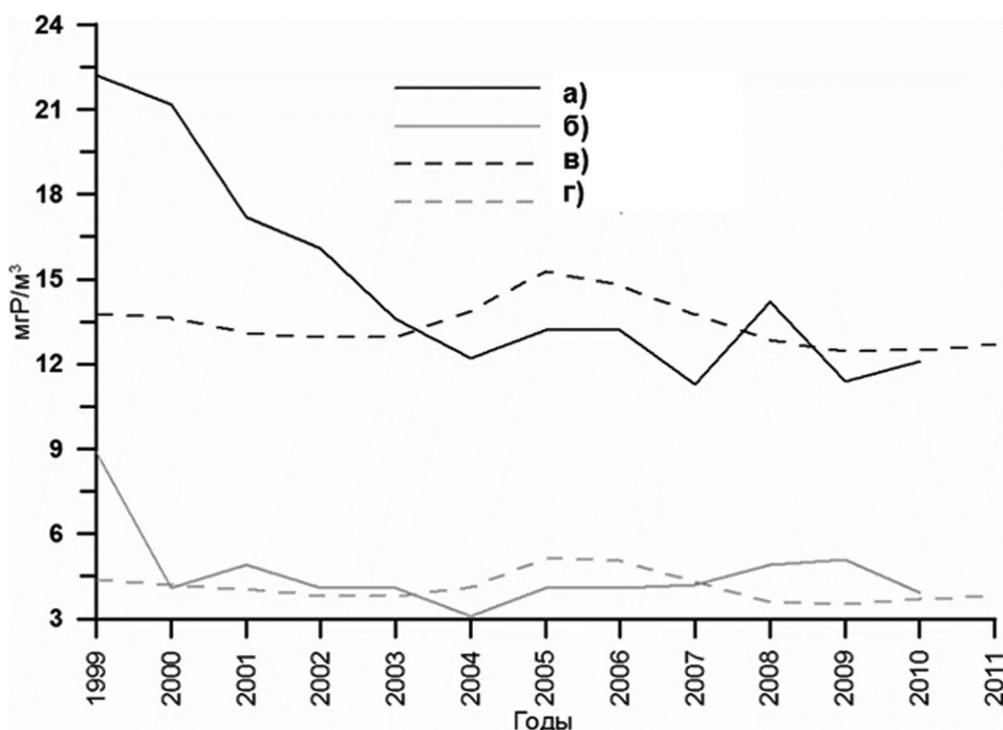


Рис. 4. Сравнение тенденций средних за период открытой воды концентраций общего фосфора (TP) и фосфатов (P-PO₄), наблюдаемых (а, в) и рассчитанных на модели (б, г)

Fig. 4. Comparison of average open-water period concentrations of total phosphorous (TP) and phosphates (P-PO₄), observed (a, в) and calculated as per the model (б, г)

ликованными данными, отражающими состояние Ладожского озера в современный период, позволяет сделать вывод, что предлагаемая модель может быть использована для исследования экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в экосистеме Ладожского озера в условиях изменения климата и антропогенного воздействия.

Сравнительный анализ современного состояния и будущих изменений экосистемы Ладожского озера

В соответствии с условиями проведения численных экспериментов внешняя нагрузка биогенными элементами на Ладожское озеро в будущем оставалась постоянной. Поэтому основным механизмом, влияющим на изменчивость компонентов экосистемы в будущем климате, является атмосферное воздействие.

Одним из основных гидрофизических параметров, влияющим на функционирование пресноводной экосистемы, является температура воды. Поэтому сначала выполним сравнительную оценку изменчивости температуры воды в современном и будущем климате. На рис. 5 представлена межгодовая изменчивость температуры в период с 1996 по 2040 годы.

Из рисунка 5 видно, что температура озера будет повышаться, вследствие повышения температуры воздуха. Однако, рассматривая различные периоды и области осреднения, можно отметить, что наиболее сильное повышение температур воды будет наблюдаться в вегетационный период (апрель–октябрь) в поверхностном слое воды. Сравнение среднегодовых значений температуры, осредненных за периоды 1996–2015 и 2021–2040 гг., показывает в будущем увеличение температуры в целом по озеру на 0,4 °С, а в поверхностном слое на 0,7 °С. При этом увеличение средней температуры в вегетационный период (апрель–октябрь) составит в целом для озера также 0,4 °С, а для поверхностного слоя 0,8 °С.

Одним из основных критериев, характеризующих трофическое состояние озера, является первичная продукция фитопланктона. На рис. 6 показана межгодовая изменчивость первичной продукции за период с 1996 по 2040 годы. Из рисунка видно, что в современный период с 1996 по 2015 год не наблюдается ярко выраженного тренда, несмотря на значительную межгодовую изменчивость. Этот результат хорошо согласуется с оценкой современного состояния фитопланктона Ладожского озера в современный период [Летанская, Протопопо-

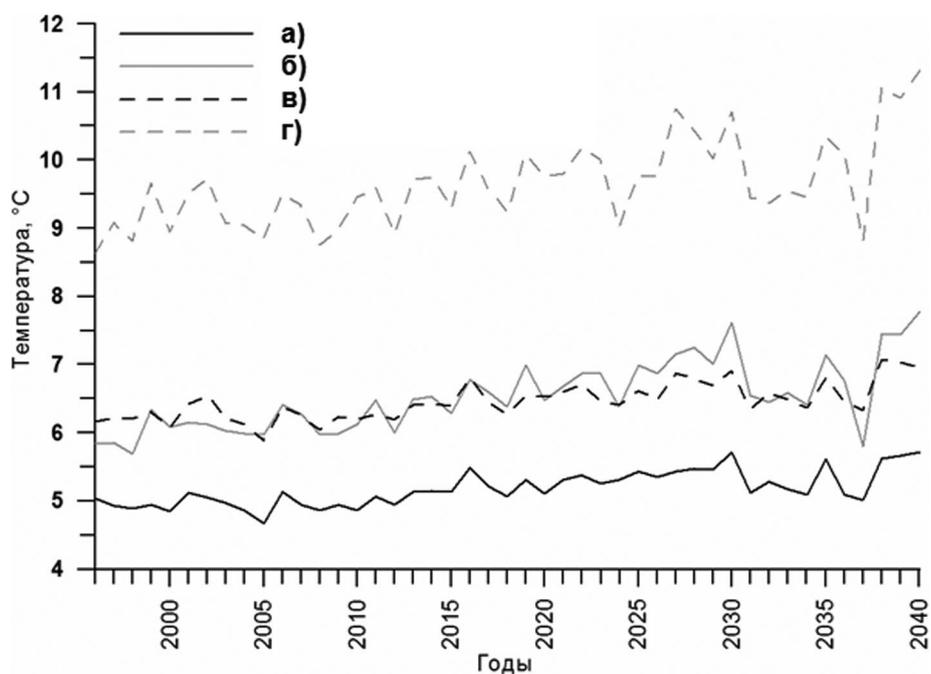


Рис. 5. Межгодовая изменчивость осредненной температуры воды: а) среднегодовая по всей толще озера, б) среднегодовая по поверхности, в) средняя по всей толще озера за апрель–октябрь, г) средняя по поверхности за апрель–октябрь

Fig. 5. Interannual variability of averaged water temperature: а) average annual along the whole water column of the lake, б) average annual at the surface, в) average annual along the whole water column of the lake in April-October, г) average annual at the surface in April-October

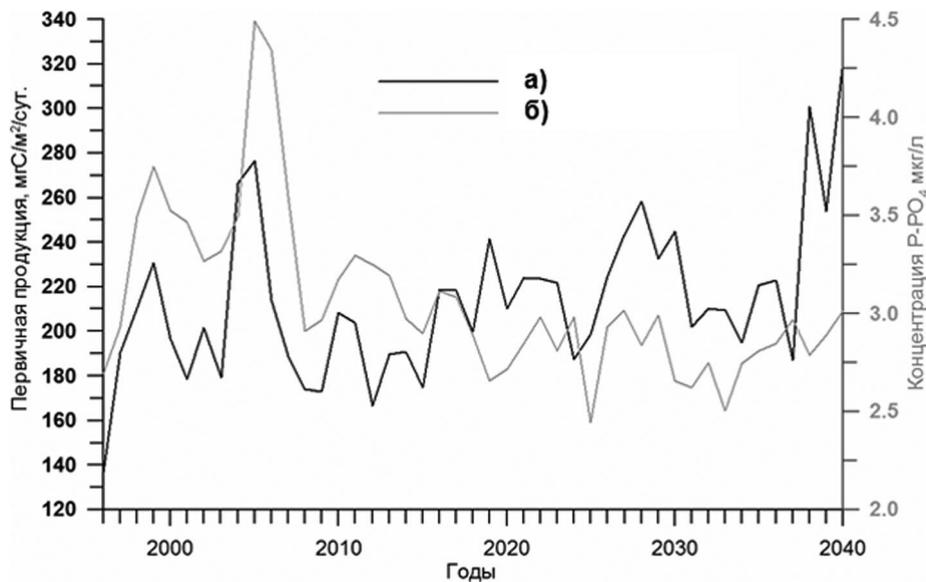


Рис. 6. Межгодовая изменчивость средней за вегетативный период первичной продукции (а) и концентрации фосфатов (б) по результатам моделирования

Fig. 6. Interannual variability of the average primary production during the vegetative period (а) and phosphates concentration (б) according to the modeling results

ва, 2012]. В указанной работе на основе данных натуральных наблюдений продемонстрировано, что структурно-функциональная организация фитопланктона Ладожского озера стабильна.

Особо отмечено, что не наблюдается трендов в биомассе фитопланктона.

Рассматривая изменчивость первичной продукции в будущем, можно отметить, что

Основные потоки фосфора, осредненные за современный период (1996–2015) и в будущем (2021–2040) по результатам моделирования

Main streams of phosphorous averaged for the modern period (1996–2015) and in future (2021–2040) according to the modeling results

| | Среднее 1996–2015 Average | Среднее 2021–2040 Average | Изменения по отношению к современному периоду, % Changes relative to the modern period, % |
|---|---------------------------------|---------------------------------|--|
| Внешняя нагрузка, т в год External load, t/year | 3093 | 2784 | –10 |
| Выход из донных отложений, т в год Release from bottom sediments, t/year | 793 | 1020 | 29 |
| Седиментация, т в год Sedimentation, t/year | 2610 | 2534 | –3 |
| Вынос с р. Нева, т в год Export by the Neva, t/year | 1238 | 1180 | –5 |
| Потребление, т в год Consumption, t/year | 10046 | 11803 | 17 |
| Минерализация, т в год Mineralization, t/year | 3027 | 3304 | 9 |
| Экскреция, т в год Excretion, t/year | 3381 | 4897 | 45 |

начиная с 2020 года и до конца рассматриваемого периода наблюдается увеличение первичной продукции. Среднее за вегетативный период значение первичной продукции, осредненной за период 1996–2015 гг., составляет 197 мгС/м²/сут. В будущем (2021–2040 гг.) значение первичной продукции возрастет до значения 229 мгС/м²/сут. При этом необходимо отметить, что средняя концентрация минеральной формы фосфора в вегетативный период остается стабильной и не имеет трендов. Основной вклад в межгодовую изменчивость содержания фосфора вносит внешняя нагрузка. Поскольку эксперименты по воспроизведению экосистемы Ладожского озера в будущем климате проводились при постоянной внешней нагрузке, то следствием такой постановки задачи является постоянство концентрации фосфатов в водах озера.

Объяснение реакции экосистемы на климатические изменения можно найти, рассмотрев основные потоки фосфора. В таблице представлены осредненные на периоды 1996–2015 и 2021–2040 гг. потоки, формирующие баланс фосфора. Анализ таблицы показывает, что увеличение первичной продукции фитопланктона связано с увеличением потребления минерального фосфора, хотя его концентрация в будущем остается постоянной. Рассматривая биогеохимические потоки, влияющие на первичную продукцию, можно заметить, что в будущем наблюдается увеличение потоков, отвечающих за увеличение поступления минеральной формы фосфора в систему. А именно – минерализация органического вещества

и экскреция гетеротрофов увеличиваются на 9 и 45 % соответственно. Таким образом, можно сказать, что увеличение первичной продукции является следствием усиления регенерации минерального фосфора как реакция системы на повышение температуры воды в фотическом слое в вегетационный период.

Наименьшие изменения в будущем претерпевают потоки седиментации и выноса фосфора со стоком реки Невы. Увеличение потока выхода из донных отложений также связано с увеличением температуры воды, поскольку выход из донных отложений зависит от скорости минерализации донных отложений, которая, в свою очередь, есть функция температуры.

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что за период 1951–2016 гг. при потеплении климата на водосборе озер с конца 80-х годов XX века наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой температуры воздуха, а наиболее значимые ее изменения характерны для зимних месяцев. При потеплении климата и значительной межгодовой изменчивости суммарного речного притока и стока из озер за период 1955–2016 гг. тренды за 60 лет отсутствуют, рост годовых сумм осадков компенсируется ростом суммарного испарения. Процесс трансформации гидрологического и химико-биологического режимов Ладожского и Онежского озер представляет собой последовательность этапов, в течение которых менялись вклад внешних антропогенных и климатических

факторов, а также роль внутриводоемных процессов.

Для Ладожского озера создана модель, которая использована для исследования термогидродинамики, экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в озере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий. По результатам расчетов современного и будущего состояния экосистемы Ладожского озера можно сделать следующие выводы:

– В будущем климате до 2040 гг. прогнозируется увеличение температуры воды в целом по озеру на 0,4 °С, а в поверхностном слое – на 0,7 °С. При этом увеличение средней температуры в вегетативный период (апрель–октябрь) составит в целом для озера также 0,4 °С, а для поверхностного слоя 0,8 °С.

– Реакция экосистемы на повышение температуры воды будет выражаться в увеличении первичной продукции фитопланктона за счет усиления процесса регенерации минерального фосфора, при сохранении средних значений его концентрации на стабильном уровне. Учитывая условия проведения численных экспериментов, а именно то, что в будущем климате поступление биогенов с водосбора остается постоянным, выявленная реакция экосистемы Ладожского озера является реакцией исключительно на изменения климата, без учета возможных изменений антропогенных поступлений азота и фосфора в акваторию озера.

– Разработанная модель экосистемы Ладожского озера может быть положена на основу создания моделей экосистем других крупных стратифицированных озер, таких как Онежское, Байкал, Телецкое, а также для разработки систем поддержки принятия управленческих решений.

Работа Н. Н. Филатова выполнена в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН), А. В. Исаева – в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (тема № 0149-2019-0015).

Авторы благодарят А. Ф. Балаганского за подготовку данных по водному балансу озер.

Литература

Владимирова О. М., Еремина Т. Р., Исаев А. В., Рябченко В. А., Савчук О. П. Моделирование растворенного органического вещества в Финском заливе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 90–101.

Ершова А. А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Невы в восточ-

ную часть Финского залива: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2013.

Игнатъева Н. В. Фосфор в донных отложениях и фосфорный обмен на границе раздела вода-дно в Ладожском озере: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 1997.

Ипатова С. В. Результаты мониторинга качества вод водных объектов системы Ладога – Невы – Невская губа // Улучшение экологического состояния Невско-Ладожской водной системы – залог устойчивого развития Северо-Западного региона России: конф. (Санкт-Петербург, 25 апреля 2017 г.). СПб., 2017. 17 с.

Иофина И. В. Структура и функциональные характеристики водной микофлоры // *Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы* / Под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. СПб.: Наука, 1992. С. 167–171.

Калинкина Н. М., Филатов Н. Н., Теканова Е. В., Сабылина А. В., Балаганский А. Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // *Региональная экология*. 2018. № 2(52). С. 7–15.

Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013.

Летанская Г. И., Протопопова Е. В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // *Биология внутренних вод*. 2012. № 4. С. 17–24.

Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Состояние и перспективы развития моделирования экосистемы пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов. СПб.: Нестор-История, 2013. 120 с.

Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Иофина И. В., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Ладожское озеро: теория и практика. СПб.: Нестор-История, 2015. 76 с.

Назарова Л. Е. Влияние колебаний климата на сток с водосбора Онежского озера // *География и природные ресурсы*. 2010. № 1. С. 171–174.

Петрова Н. А., Иофина И. В., Капустина Л. Л., Кулиш Т. П., Петрова Т. Н., Расплетина Г. Ф. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера (этапы трансформации экосистемы, 1975–2004 гг.) // *Экологическая химия*. 2005. Т. 14, № 4. С. 209–234.

Петрова Н. А., Петрова Т. Н., Сусарева О. М., Иофина И. В. Особенности эволюции большого стратифицированного озера гумидной зоны под влиянием антропогенного эвтрофирования (Ладожское озеро, 1975–2007) // *Водные ресурсы*. Т. 37, № 5. 2010. С. 580–589.

Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н. Моделирование трансформации экосистемы Ладожского озера при снижении фосфорной нагрузки // *ДАН. Сер. География*. Т. 434, № 5. 2010. С. 684–687.

Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // *Водные ресурсы*. 2011. Т. 38(6). С. 740–752.

Рябченко В. А., Карлин Л. Н., Исаев А. В., Ванкевич Р. Е., Еремина Т. Р., Молчанов М. С., Савчук О. П. Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате // *Океанология*. 2016. Т. 56(1). С. 41–50. doi: 10.7868/S0030157416010160

Синюкович В. Н., Чернышов М. С. Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал // *Известия Иркутского гос. университета. Сер. Науки о Земле*. 2018. Т. 24. С. 99–110. doi: 10.26516/2073-3402.2018.24.99

Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. Л.: Наука, 1991. 191 с.

Филатов Н. Н., Калинкина Н. М., Куликова Т. П., Литвиненко А. В., Лозовик П. А. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Bennington V., McKinley G. A., Kimura N., Wu Ch. H. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006 // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. c12015. doi: 10.1029/2010JC006261

Dorostkar A., Boegman L., Diamessis P., Pollard A. Sensitivity of MITgcm to different model parameters in application to Cayuga Lake // *Environmental Hydraulics – Proceed. 6th Int. Symp. on Environmental Hydraulics*. 2010. P. 373–378. doi: 10.1201/b10553-58

Döscher R., Willén U., Jones C., Tutgeresson A., Meier H. E. M., Hansson U., Graham L. P. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCO // *Boreal Environ Res.* 2002. Vol. 7. P. 183–192.

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Tekanova E. V. Modern changes in the ecosystem of Lake Onego with climate warming // *Limnol. and Freshwater Biol.* 2018. Vol. 1. P. 15–17. doi: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-15

Gaspar Ph., Grégoris Y., Lefevre J.-M. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term up-

per ocean study site // *J. Geophys. Res.* 1990. 95-C9. P. 179–193.

Gustafsson E., Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea // *Biogeochem.* 2017. Vol. 134. P. 301–317.

Isaev A. V., Eremina, T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate. *J. Mar. Syst.* 2017. Vol. 171. P. 81–88.

Jungclaus J. H., Botzet M., Haak H., Haak H., Luo J.-J., Latif M., Marotzke J., Mikolajewicz U., Roeckner E. Ocean circulation and tropical variability in the coupled ECHAM5/MPI-OM // *J. Climate*. 2006. Vol. 19. P. 3952–3972.

Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approach // *Aquatic Ecol.* 2010. Vol. 44(3). P. 633–667.

Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U., Schulzweida U. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model // *J. Climate*. 2006. Vol. 19. P. 3771–3791.

Rukhovets L., Filatov N. (Eds.) *Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modeling*. Springer Praxis, 2010. 302 p.

Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // *J. Mar. Sys.* 2002. Vol. 32. P. 235–280.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 p.

Поступила в редакцию 27.02.2019

References

Ershova A. A. Kompleksnaya otsenka postupleniya biogennykh veshchestv s vodosbora reki Neva v vostochnuyu chast' Finskogo zaliva [Complex assessment of biogenic matter supply from the Neva River catchment to the eastern part of the Gulf of Finland]: PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 2013.

Filatov N. N. *Gidrodinamika ozer* [Hydrodynamics of lakes]. Leningrad: Nauka, 1991. 191 p.

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Kulikova T. P., Litvinenko A. V., Lozovik P. A. Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada ETR: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh [The largest lakes-reservoirs in the northwest of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic influences]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 375 p.

Ignat'eva N. V. Fosfor v donnykh otlozheniyakh i fosfornyi obmen na granitse razdela voda-dno v Ladozhskom ozere [Phosphorus in bottom sediments and phosphorus exchange at the water-bottom bounda-

ry in Lake Ladoga]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 1997.

Ipatova S. V. Rezul'taty monitoringa kachestva vodnykh ob'ektov sistemy Ladoga – Neva – Nevskaya guba [Results of water quality monitoring in the water bodies of the Ladoga-Neva-Neva Bay system]. *Uluchshenie ekol. sostoyaniya Nevsko-Ladozhskoi vodnoi sistemy – zalog ustoichivogo razvitiya Severo-Zapad. regiona Rossii: konf. (Sankt-Peterburg, 25 apr. 2017 g.)* [Improvement of ecol. condition of the Neva-Ladoga water system – the base for sustainable development of the northwestern region of Russia: conf. (St. Petersburg, April 25, 2017)]. St. Petersburg, 2017. 17 p.

Iofina I. V. *Struktura i funktsional'nye kharakteristiki vodnoi mikoflory* [Structure and functional characteristics of water mycoflora]. N. A. Petrova, A. Yu. Terzhevik (eds.). *Ladozhskoe ozero: kriterii sostoyaniya ekosistemy* [Lake Ladoga: criteria of the ecosystem state]. St. Petersburg: Nauka, 1992. P. 167–171.

Kalinkina N. M., Filatov N. N., Tekanova E. V., Sabylina A. V., Balaganskii A. F. *Mnogoletnyaya dinamika sto-*

ka zheleza i fosfora v Onezhskoe ozero s vodami r. Shuya v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii [Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Lake Onego with the Shuya River under climate change conditions]. *Regional'naya ekol.* [Regional Ecol.]. 2018. No. 2(52). P. 7–15.

Letanskaya G. I., Protopopova E. V. Sovremennoe sostoyanie fitoplanktona Ladozhskogo ozera (2005–2009 gg.) [Current state of the Lake Ladoga phytoplankton (2005–2009)]. *Biol. vnutr. vod* [Inland Water Biol.]. 2012. No. 4. P. 17–24.

Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya modelirovaniya ekosistemy presnovodnykh ozer. Ispol'zovanie modelei dlya resheniya zadach sokhraneniya ikh vodnykh resursov [State and prospects of development of freshwater lakes ecosystems modeling. Modeling for water resources protection]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. 120 p.

Menshutkin V. V., Petrova N. A., Iofina I. V., Petrova T. N., Susareva O. M. Ladozhskoe ozero: teoriya i praktika [Lake Ladoga: theory and practice]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2015. 76 p.

Nazarova L. E. Vliyaniye kolebanii klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera [Influence of climate fluctuations on the runoff from the catchment of Lake Onego]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and Nat. Resources]. 2010. No. 1. P. 171–174.

Petrova N. A., Iofina I. V., Kapustina L. L., Kulish T. P., Petrova T. N., Raspletina G. F. Antropogennoe evtrofirovaniye Ladozhskogo ozera (etapy transformatsii ekosistemy, 1975–2004 gg.) [Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga (stages of ecosystem transformation, 1975–2004)]. *Ekol. khim.* [Ecol. Chem.]. 2005. Vol. 14, no. 4. P. 209–234.

Petrova N. A., Petrova T. N., Susareva O. M., Iofina I. V. Osobennosti evolyutsii bol'shogo stratifitsirovanogo ozera gumidnoi zony pod vliyaniem antropogennogo evtrofirovaniya (Ladozhskoe ozero, 1975–2007) [Specific features of Lake Ladoga ecosystem under the effect of anthropogenic eutrophication (1975–2007)]. *Vod. resursy* [Water Resources]. Vol. 37, no. 5. 2010. P. 580–589.

Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N. Modelirovaniye transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera pri snizhenii fosfornoj nagruzki [Modeling of the transformations of the Lake Ladoga ecosystem in response to a decrease in phosphorus load]. *DAN. Ser. Geografiya* [Proceed. RAS. Ser. Geography]. Vol. 434, no. 5. 2010. P. 684–687.

Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N., Petrova T. N., Susareva O. M. Issledovaniye reaktsii ekosistemy Ladozhskogo ozera na snizheniye fosfornoj nagruzki [Studying the response of Lake Ladoga ecosystem to a decrease in phosphorus load]. *Vod. resursy* [Water Resources]. 2011. Vol. 38(6). P. 740–752.

Ryabchenko V. A., Karlin L. N., Isaev A. V., Vankevich R. E., Eremina T. R., Molchanov M. S., Savchuk O. P. Model'nye otsenki evtrofikatsii Baltiiskogo morya v sovremennom i budushchem klimate [Model assessment of the Baltic Sea eutrophication in current

and future climate]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2016. Vol. 56(1). P. 41–50. doi: 10.7868/S0030157416010160

Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A. (eds). Ladoga [Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013.

Sinyukovich V. N., Chernyshov M. S. Sovremennyye problemy regulirovaniya urovnya ozera Baikal [Topical issues of water level regulation in Lake Baikal]. *Izv. Irkutskogo gos. univ. Ser. Nauki o Zemle* [The Bull. of Irkutsk St. Univ. Ser. Earth Sci.]. 2018. Vol. 24. P. 99–110. doi: 10.26516/2073–3402.2018.24.99

Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Modelirovaniye rastvorenno-go organicheskogo veshchestva v Finskoy zalive [Modeling of dissolved organic matter in the Gulf of Finland]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. and Appl. Hydrophysics]. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 90–101.

Bennington V., McKinley G. A., Kimura N., Wu Ch. H. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. c12015. doi: 10.1029/2010JC006261

Dorostkar A., Boegman L., Diamesis P., Pollard A. Sensitivity of MITgcm to different model parameters in application to Cayuga Lake. *Environmental Hydraulics – Proceed. 6th Int. Symp. on Environmental Hydraulics*. 2010. P. 373–378. doi: 10.1201/b10553-58

Döscher R., Willén U., Jones C., Tutgeresson A., Meier H. E. M., Hansson U., Graham L. P. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Environ Res.* 2002. Vol. 7. P. 183–192.

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Tekanova E. V. Modern changes in the ecosystem of Lake Onego with climate warming. *Limnol. and Freshwater Biol.* 2018. Vol. 1. P. 15–17. doi: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-15

Gaspar Ph., Grégoris Y., Lefevre J.-M. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site. *J. Geophys. Res.* 1990. 95-C9. P. 179–193.

Gustafsson E., Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea. *Biogeochem.* 2017. Vol. 134. P. 301–317.

Isaev A. V., Eremina T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate. *J. Mar. Syst.* 2017. Vol. 171. P. 81–88.

Jungclaus J. H., Botzet M., Haak H., Haak H., Luo J.-J., Latif M., Marotzke J., Mikolajewicz U., Roeckner E. Ocean circulation and tropical variability in the coupled ECHAM5/MPI-OM. *J. Climate.* 2006. Vol. 19. P. 3952–3972.

Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approach. *Aquatic Ecol.* 2010. Vol. 44(3). P. 633–667.

Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U., Schulzweida U. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate.* 2006. Vol. 19. P. 3771–3791.

Rukhovets L., Filatov N. (Eds.) Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modeling. Springer Praxis, 2010. 302 p.

Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. *J. Mar. Sys.* 2002. Vol. 32. P. 235–280.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.). Contribution of Working Group I to the Fourth Assess-

ment. *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 p.

Received February 27, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филатов Николай Николаевич

директор ИВПС КарНЦ РАН, главный научный сотрудник
Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН,
чл.-корр. РАН, советник РАН, д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

Исаев Алексей Владимирович

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997
эл. почта: isaev1975@gmail.com

Савчук Олег Павлович

доцент, к. г. н.
Институт наук о Земле Санкт-Петербургского
государственного университета
10-я линия В. О., 33–35, Санкт-Петербург, Россия, 199178
Институт Балтик Нест, Центр Балтийского моря
Стокгольмского университета
Стокгольм, Швеция, SE-10691
эл. почта: oleg.savchuk@su.se

CONTRIBUTORS:

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru

Isaev, Aleksey

Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovsky Pr., 117997 Moscow, Russia
e-mail: isaev1975@gmail.com

Savchuk, Oleg

Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University
33–35 10th Line Vasilievsky Island, 199178 St.-Petersburg,
Russia
Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre
Stockholm, Sweden, SE-10691
e-mail: oleg.savchuk@su.se