

УДК 551.465

© А. В. Исаев\*, В. А. Рябченко, А. А. Коник, 2024

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

\*isaev1975@gmail.com

## ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Статья поступила в редакцию 04.02.2024, после доработки 14.05.2024, принята в печать 29.05.2024

### Аннотация

Предлагается трехмерная эко-гидродинамическая модель Ладожского озера, основанная на Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM). В отличие от существующих моделей экосистемы Ладожского озера, предлагаемая модель реализована на сферической сетке высокого разрешения (шаг сетки по горизонтали  $\approx 1$  км), содержит модуль бентосного слоя и описывает циклы азота и фосфора в водной толще и донных отложениях. Выполнен расчет сезонной и межгодовой изменчивости состояния Ладожского озера в период 1979–2018 гг. при задании в качестве форсинга атмосферного воздействия и стока рек, впадающих в Ладожское озеро, для гидротермодинамического модуля и поступления биогенных элементов из атмосферы и с суши для биогеохимического модуля. Сравнение результатов расчета современного климатического состояния Ладожского озера с имеющимися данными спутниковых и экспедиционных наблюдений показало, что модель правильно воспроизводит климатический сезонный ход поля поверхностной температуры, её вертикальное распределение, средние значения и диапазон изменений основных характеристик экосистемы озера. Предложенная модель может быть использована для исследования влияния внешних естественных и антропогенных факторов на биогеохимические процессы и функционирование экосистемы Ладожского озера.

**Ключевые слова:** озерная экосистема, циркуляция, климат, сезонные и межгодовые колебания, моделирование, Ладожское озеро

UDC 551.465

© А. В. Исаев\*, В. А. Рябченко, А. А. Коник, 2024

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

\*isaev1975@gmail.com

## REPRODUCTION OF THE CURRENT CLIMATIC STATE OF THE LAKE LADOGA ECOSYSTEM

Received 04.02.2024, Revised 14.05.2024, Accepted 29.05.2024

### Abstract

A three-dimensional ecohydrodynamic model of Lake Ladoga based on the St. Petersburg Baltic Eutrophication Model (SPBEM) is proposed. Unlike existing models of the Lake Ladoga ecosystem, the proposed model is implemented on a high-resolution spherical grid (horizontal grid size  $\approx 1$  km), contains a benthic layer module and describes the cycles of nitrogen and phosphorus in the water column and bottom sediments. A run of the seasonal and interannual variability of the state of Lake Ladoga in the period 1979–2018 was carried out when setting as forcing the atmospheric influence and runoff of rivers flowing into Lake Ladoga for the hydrothermodynamic module and the supply of nutrients from the atmosphere and from land for the biogeochemical module. A comparison of the results of calculating the current climatic state of Lake Ladoga with the available satellite and expeditionary observation data showed that the model correctly reproduces the climatic seasonal variation of the surface temperature field, its vertical distribution, average values and range of changes in the main characteristics of the lake's ecosystem. The proposed model can be used to study the influence of external natural and anthropogenic factors on biogeochemical processes and the functioning of the Lake Ladoga ecosystem.

**Keywords:** lake ecosystem, circulation, climate, seasonal and interannual fluctuations, modeling, Lake Ladoga

Ссылка для цитирования: Исаев А.В., Рябченко В.А., Коник А.А. Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 2. С. 50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5

For citation: Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Konik A.A. Reproduction of the Current Climatic State of the Lake Ladoga Ecosystem. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 2, 50–65. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5

## 1. Введение

В настоящее время, несмотря на значительный объем выполненных натурных исследований, полученных данных наблюдений недостаточно для количественного описания сложных многофакторных взаимодействий в озерной экосистеме. Отсутствие количественного описания таких взаимодействий не позволяет прогнозировать возможные изменения состояния экосистемы Ладожского озера даже с указанием степени неопределенности прогнозов. В ситуации недостатка необходимых данных наблюдений наиболее надежным инструментом для решения задачи количественного описания функционирования водной экосистемы, пригодным для прикладного использования, является математическое моделирование водных экосистем на соответствующих пространственно-временных масштабах.

В мировом масштабе математические модели экосистемы больших озер разрабатываются в течение нескольких последних десятилетий [1–6]. Однако на сегодняшний день общий уровень озерных моделей все ещё ниже, чем морских [6, 7], что, в частности, проявляется в том, что до сих пор модели для озерных систем использовались, как правило, для одноразовых расчетов при решении тех или иных ограниченных задач.

Начиная с 1980-х гг. было разработано несколько моделей экосистемы Ладожского озера [8–12]. Использование этих моделей позволило оценить реакцию экосистемы Ладожского озера на рост фосфорной нагрузки и выявить предельно допустимые нагрузки. Однако указанные модели были реализованы на грубой расчетной сетке, а также плохо описывали (или не описывали вообще) обменные процессы на границе раздела вода — донные отложения, поскольку не содержали подмодели бентосного слоя. Расчеты на обсуждаемых моделях в основном выполнялись на установление, при фиксированных внешних воздействиях, что не позволяло воспроизводить долгопериодную изменчивость характеристик экосистемы [13]. Влияние различных источников биогенной нагрузки (речные, атмосферные, промышленные, включая аквакультуру) на функционирование экосистемы озера также до сих пор не исследовалось.

В настоящей статье предлагается трехмерная эко-гидродинамическая модель Ладожского озера, основанная на Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM) [14, 15]. Модель SPBEM хорошо себя зарекомендовала при оценках климатических изменений экосистемы, как для Балтийского моря в современном и будущем климате [16–18], так и при воспроизведении современного состояния экосистемы Онежского озера [19, 20]. В основе модели лежит описание циклов азота и фосфора в водной толще и донных отложениях, что позволяет ее использование как в морских азот-лимитированных системах, так и в пресноводных фосфор-лимитированных. Хорошим подтверждением работоспособности модели в водах с разными лимитирующими биогенными элементами может служить достоверное воспроизведение границы смены зон лимитации на примере устьевого района Финского залива Балтийского моря [15].

В отличие от упомянутых выше моделей экосистемы Ладожского озера, предлагаемая модель реализована на сетке высокого разрешения, содержит модуль бентосного слоя и, что особенно важно, описывает циклы азота и фосфора в водной толще и донных отложениях. Основной целью данной статьи является демонстрация устойчивой работы модели на климатическом масштабе времени (несколько десятилетий) и оценка качества воспроизведения функционирования экосистемы озера в период 1979–2018 гг.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Описание модели

*Биогеохимический модуль* модели 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 недиадомовые), 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: 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 метаболизма 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. Отсутствие в модели цикла кремния, который является важным биогенным элементом используемым диатомовым фитопланктоном, объясняется тем, что для условий Ладожского озера данный элемент не является лимитирующим [21]. Учет особенностей диатомового фитопланктона, обладающего большей массой клеток по сравнению с другими видами фитопланктона за счет наличия у него кремневой оболочки, состоит в задании более высокой скорости гравитационного оседания диатомового фитопланктона и детрита, в соответствии с используемыми в модели параметризациями. Параметризация указанных выше взаимодействий следует общей практике, выработанной в течение десятилетий при моделировании экосистем морей и озер [2, 6, 22–25]. Все уравнения, параметризации, коэффициенты и константы биогеохимического модуля представлены во всех деталях в работе [15], а адаптация для условий пресноводных фосфор-лимитированных экосистем — в работах [19, 20].

*Гидротермодинамический модуль.* В качестве основы для воспроизведения гидротермодинамики озера и решения уравнений адвекции-диффузии примеси была использована модель Массачусетского университета MITgcm [26, 27]. Использование данной модели для моделирования гидродинамических условий больших стратифицированных озер обоснованно успешным применением данной модели для моделирования озер Мичиган и Superior [28–30], а также, совместно с предлагаемой моделью биогеохимических циклов, для оценки современного состояния гидрофизических и биогеохимических характеристик Онежского озера [19, 20]. Для воспроизведения гидрофизических условий данная модель была настроена на батиметрию Ладожского озера, заданную по данным Института озероведения РАН (рис. 1). В качестве пара-

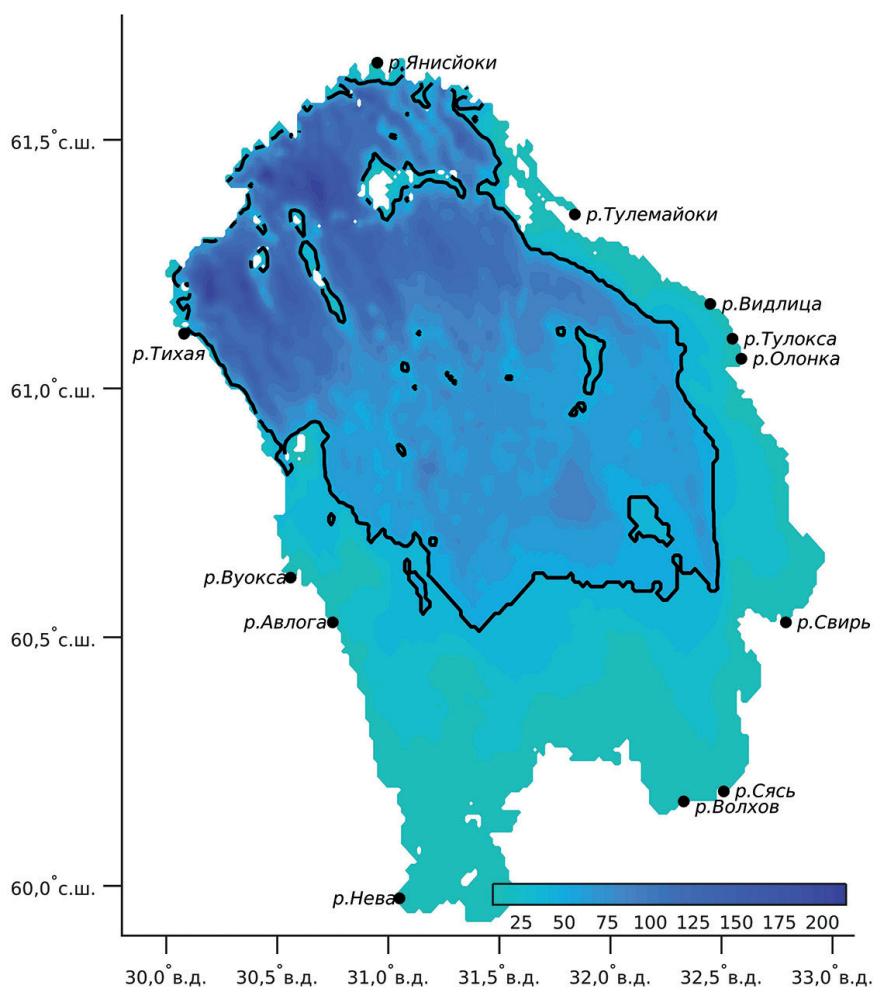


Рис. 1. Реки бассейна и поле глубин Ладожского озера (черная линия — изобата 40 м)

Fig. 1. Rivers of the basin and model bathymetry (meters) of Lake Ladoga (black line is the 40 m isobath)

метризации подсеточных процессов вертикального перемешивания использовалась схема турбулентного замыкания TKE (пакет GGL90) [31]. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости рассчитывался на основе параметризации Смагоринского [32], а коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии задавался постоянным и равным  $2 \text{ м}^2/\text{с}$ . Моделирование сезонного ледяного покрова осуществлялось на основе пакета SeaIce, входящего в модельный комплекс MITgcm и адаптированного для пресноводного водоема. Для решения уравнений адвекции-диффузии трассера, необходимых для реализации модели биогеохимических циклов, использовался пакет PTtracer.

Решение объединенной модели осуществлялось на сферической сетке с горизонтальным шагом  $0.54'$  по широте и  $1.08'$  по долготе, что на широте расположения озера составляет примерно 1 км по каждой из горизонтальных координат. По вертикали использовалась z-координата с равномерным шагом 2 м от поверхности до горизонта 40 м и шагом 5 м от горизонта 40 м до дна.

## 2.2. Граничные условия

Применительно к условиям Ладожского озера, в качестве граничных условий требуется задание атмосферного воздействия и стока рек, впадающих в Ладожское озеро (рис. 1), для гидротермодинамического модуля и поступления биогенных элементов из атмосферы и с суши для биогеохимического модуля.

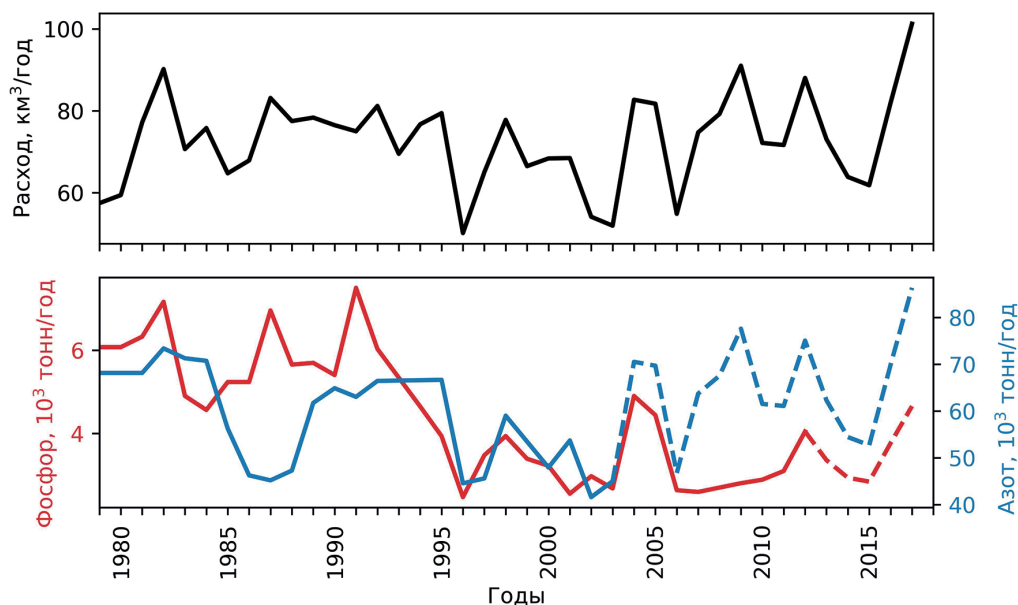
Для задания полей атмосферного воздействия был подготовлен архив на основе данных реанализа ERA-5 (<https://www.ecmwf.int>), включающий ежечасные поля атмосферного давления, компонентов скорости ветра, температуры, влажности, осадков, приходящего коротковолнового и длинноволнового излучения.

Внешняя биогенная нагрузка поступает в водный объект с речным стоком, атмосферными выпадениями, из точечных источников, а также с прямым диффузным стоком, т. е. поступлением биогенов с дождевыми и талыми водами, которые попадают в водоем, минуя реки.

*Поступления с речным стоком.* Детальные исследования поступления биогенных элементов в Ладожское озеро для различных временных периодов были выполнены в [33–35]. Согласно данным работам, основной вклад в формирование внешней биогенной нагрузки вносит речной сток, на который приходится 96,3 % поступающего общего фосфора и 87,1 % общего азота. На атмосферные выпадения приходится 0,7 % поступающего фосфора и 10,9 % азота. Вклад точечных источников составляет 1,6 % и 0,7 %, а вклад прямого диффузного поступления 1,4 % и 1,3 % от общей внешней нагрузки для, соответственно, фосфора и азота. Таким образом, основным источником биогенных элементов, поступающих в Ладожское озеро, является речной сток.

В результате многолетних исследований поступления азота и фосфора в Ладожское озеро с речным стоком были получены оценки, отражающие межгодовую изменчивость, которые опубликованы в монографии, обобщающей существующие данные наблюдений и модельные оценки [21]. В ней приводятся ряды межгодовой изменчивости расхода речных вод, поступающих в Ладожское озеро, для периода с 1979 по 2018 гг., а также поступающих с речными водами фосфора и азота соответственно за период 1976–2011 гг. и 1981–2003 гг. (рис. 2). Указанные ряды данных о поступлении фосфора и азота в Ладожское озеро были реконструированы для периода 1979–2018 гг. Выбор этого периода определялся наличием фактических данных о речном стоке в Ладожское озеро только для указанного периода (см. рис. 2, верхний фрагмент). Как видно (см. рис. 2, нижний фрагмент), временные вариации ежегодного поступления фосфора в озеро можно разделить на 2 периода: период 1976–1991 гг. с относительно высокими значениями поступления и период 1996–2011 гг. с относительно низкими значениями. Реконструкция фосфорной нагрузки для периода 2012–2018 гг. основана на предположении, что средние концентрации фосфора в реках остаются неизменными в этот период и равными их средним за период 1996–2011 гг. значениям. Средняя концентрация фосфора в реках для периода 1996–2011 гг. была рассчитана как отношение средних за период годовых поступлений фосфора и расхода. На основании вычисленной концентрации были реконструированы фосфорные нагрузки для периода 2012–2018 гг., как произведение указанной средней концентрации на среднегодовой расход. Аналогичная процедура применялась для реконструкции азотной нагрузки, но в отличие от фосфора средняя концентрация искалась по всему доступному ряду (1981–2003 гг.), поскольку временная изменчивость поступления азота не характеризуется какими-либо трендами или сильными различиями в разные периоды.

*Поступления с атмосферными выпадениями.* Наиболее полно вопрос оценки фосфорной нагрузки Ладожское озеро освещен в работах [33, 36]. Оценки приведенные в данных исследованиях, выполнены на основе данных ГГО им. Воейкова о концентрации химических веществ в снежном покрове в зимне-весенний период 1994 г. в восьми пунктах на акватории водоема и в четырех пунктах в береговой зоне на восточном побережье в районе городов Олонец и Питкяранта, Северо-Западном побережье, между береговой линией



**Рис. 2.** Межгодовая изменчивость годового расхода речных вод, поступающих в Ладожское озеро (а), и ежегодного поступления с ними фосфора и азота (б). Сплошная линия — опубликованные данные [21], пунктирная — реконструкция

**Fig. 2.** Interannual variability of the annual river volume transport entering Lake Ladoga (a), and the annual input of phosphorus and nitrogen with river waters (b). Solid line — published data [21], dotted line — reconstruction

и границей с Финляндией, а также на юго-западном побережье Ладожского озера. Определены значения массы примеси, аккумулированной на  $1 \text{ м}^2$  площади за период ледостава, средняя месячная интенсивность сухих выпадений и средняя концентрация примеси в  $1 \text{ мм}$  твердых осадков. Средняя концентрация вещества в жидких осадках вычислялась путем сопоставления средних месячных данных по химическому составу атмосферных осадков на станциях «Санкт-Петербург» и «Воейково» за периоды 1959–1961 и 1967–1980 гг. Согласно выполненной оценке, фосфорная нагрузка на акваторию Ладожского озера составляет  $34,5 \text{ т Р}_{\text{общ}}$  в год. Поскольку более поздних опубликованных оценок не существует, то в настоящем исследовании используется это значение. Для задания выпадающего из атмосферы азота на водную поверхность озера, используются данные Норвежского метеорологического института, полученные с использованием математического моделирования ([https://emep.int/mscw/mscw\\_moddata.html](https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html)). Результаты моделирования дают оценку выпадения азота в виде окисленных и восстановленных форм с ежемесячным разрешением за период с 1990 по 2020 годы. Среднегодовое поступление соединений азота составляет 6500 тонн в год, при стандартном отклонении 1200 тонн в год.

**Поступления от точечных источников и с прямым диффузным стоком.** В связи с отсутствием опубликованных данных о межгодовой изменчивости нагрузки, поступающей из точечных источников и с прямым диффузным стоком, а также с учетом малого вклада этих источников в общую нагрузку, предполагается, что поступления фосфора и азота из этих источников в течение всего рассматриваемого периода составляют фиксированные доли нагрузки, поступающей с речным стоком. В соответствии с приведенными выше оценками они равны  $0,963 \times (0,016 + 0,014) \approx 0,029$  (2,9 %) для фосфора и  $0,871 \times (0,007 + 0,013) \approx 0,017$  (1,7 %) для азота.

### 2.3. Начальные условия

Поскольку данных натурных наблюдений недостаточно для формирования согласованных полей биогеохимических переменных, то для получения начального распределения переменных модели был выполнен расчет с повторяющимися граничными условиями (атмосферное воздействие, речной сток и биогенная нагрузка), соответствующими условиям 1979 года, до получения квазиустановившегося состояния сезонной изменчивости озера. Значения искомым физических и биогеохимических характеристик на 1 января 1979 года в этом квазиустановившемся состоянии использовались в качестве начальных условий для расчета сезонной и межгодовой изменчивости состояния Ладожского озера в период 1979–2018 гг.

## 2.4. Данные наблюдений

Для верификации модели использовались данные контактных и дистанционных измерений температуры, а также наблюдения за концентрациями минеральных и общих форм фосфора и биомассы фитопланктона. Данные дистанционных ИК-изображений со спутников Aqua-Modis и Aqua-Terra брались с сайта <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directdataaccess/Level-2/> (дата обращения: 29.10.2024). С него были получены суточные измерения температуры в ИК-диапазоне с уровнем обработки L2, выполненные спектрометрирами MODIS и VIIRS со спутников Aqua, Terra и Suomi NPP с января 2000 по декабрь 2020 гг. Пространственное разрешение данных составило около 1 км. Уровень обработки данных L2 обозначает данные второго уровня, которые включают время измерения, географическую привязку и обработку с атмосферной коррекцией.

Данные контактных измерений получены сотрудниками Института озераедения РАН в период 1991–2017 гг. Эти данные включают результаты измерения температуры, концентрации минеральной и общей форм фосфора, биомассы фитопланктона. Отметим, что максимальное число измерений различных параметров приходится на теплый период года (май–сентябрь), в то время как некоторые зимние и весенние месяцы вообще не обеспечены измерениями.

## 3. Верификация модели

### 3.1. Температура

Оценка качества воспроизведения моделью сезонного хода поверхностной температуры была получена следующим образом. Из архива спутниковых изображений выбирались мгновенные снимки, на которых для более 60 % акватории озера имелись измерения с флагом качества 0 или 1, означающим, что эти измерения с высокой вероятностью близки к истинным значениям температуры. Затем данные спутниковых измерений на отобранных снимках интерполировались на расчетную сетку в областях, покрытых данными измерений, а из результатов моделирования для тех же областей покрытия выбирались среднесуточные поля поверхностной температуры, соответствующие дате измерений. В результате для каждого снимка был получен ряд, который представляет собой парные значения рассчитанной и измеренной температуры в каждой ячейки сетки. Используя данные ряды, были получены многолетние среднесеasonные значения измеренной и рассчитанной средней по площади поверхностной температуры озера и средние месячные значения пространственного среднеквадратического отклонения этих характеристик. Указанные климатические среднесеasonные значения средней по площади температуры и её стандартного отклонения по пространству приведены в табл. 1 для данных, полученных спектрометрирами MODIS со спутников Aqua и Terra в период с 1 января 2000 по 31 декабря 2020 гг.

Таблица 1

Table 1

### Сравнительные характеристики поверхностной температуры воды по данным спутниковых измерений MODIS-Aqua и MODIS-Terra и результатам моделирования

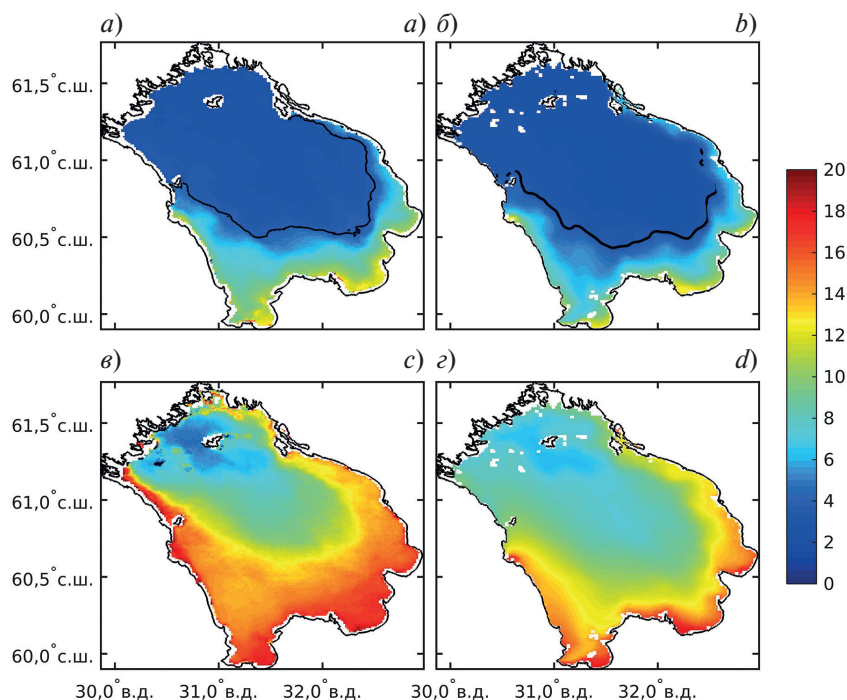
### Comparative characteristics of surface water temperature according to satellite measurements of MODIS-Aqua and MODIS-Terra and modeling results

| Месяц | MODIS-Aqua         |                         |        |                            |        | MODIS-Terra        |                         |        |                            |        |
|-------|--------------------|-------------------------|--------|----------------------------|--------|--------------------|-------------------------|--------|----------------------------|--------|
|       | Количество снимков | Средняя температура, °C |        | Стандартное отклонение, °C |        | Количество снимков | Средняя температура, °C |        | Стандартное отклонение, °C |        |
|       |                    | Спутник                 | Модель | Спутник                    | Модель |                    | Спутник                 | Модель | Спутник                    | Модель |
| 1     | 7                  | 2,8                     | 2,3    | 0,7                        | 0,9    | 10                 | 2,0                     | 1,5    | 0,8                        | 0,8    |
| 2     | 4                  | 1,2                     | 0,4    | 0,5                        | 0,3    | 3                  | 0,8                     | 0,3    | 0,5                        | 0,4    |
| 3     | 16                 | 0,7                     | 0,1    | 0,3                        | 0,1    | 13                 | 0,9                     | 0,1    | 0,4                        | 0,1    |
| 4     | 64                 | 1,6                     | 0,9    | 0,5                        | 0,2    | 83                 | 1,7                     | 1,2    | 0,5                        | 0,2    |
| 5     | 118                | 3,7                     | 2,7    | 1,5                        | 0,8    | 143                | 3,7                     | 2,8    | 1,6                        | 0,9    |
| 6     | 70                 | 10,4                    | 10,0   | 2,8                        | 2,9    | 77                 | 10,0                    | 9,4    | 2,9                        | 2,8    |
| 7     | 158                | 18,8                    | 17,0   | 1,3                        | 2,0    | 188                | 18,8                    | 17,3   | 1,3                        | 2,0    |
| 8     | 130                | 18,8                    | 18,4   | 0,8                        | 1,0    | 147                | 18,5                    | 18,2   | 0,8                        | 1,0    |

| Месяц | MODIS-Aqua         |                         |        |                            |        | MODIS-Terra        |                         |        |                            |        |
|-------|--------------------|-------------------------|--------|----------------------------|--------|--------------------|-------------------------|--------|----------------------------|--------|
|       | Количество снимков | Средняя температура, °C |        | Стандартное отклонение, °C |        | Количество снимков | Средняя температура, °C |        | Стандартное отклонение, °C |        |
|       |                    | Спутник                 | Модель | Спутник                    | Модель |                    | Спутник                 | Модель | Спутник                    | Модель |
| 9     | 82                 | 13,8                    | 13,9   | 0,8                        | 0,7    | 91                 | 13,6                    | 13,4   | 0,8                        | 0,7    |
| 10    | 47                 | 9,4                     | 9,4    | 0,7                        | 0,6    | 45                 | 9,5                     | 9,5    | 0,7                        | 0,6    |
| 11    | 11                 | 6,2                     | 6,4    | 0,8                        | 0,9    | 18                 | 6,1                     | 6,3    | 0,8                        | 0,9    |
| 12    | 15                 | 3,8                     | 3,7    | 0,7                        | 0,9    | 12                 | 3,7                     | 3,5    | 0,8                        | 1,0    |

Анализ таблицы показывает, что в целом модель достаточно хорошо воспроизводит сезонный ход поверхностной температуры. Недооценка поверхностной температуры в июле, которая составляет 1,8 °C для данных MODIS-Aqua и 1,5 °C для данных MODIS-Terra, по-видимому, связана с тем, что спутниковые измерения характеризуют температуру непосредственно поверхности, в то время как модельные данные представляют собой среднее значение для верхнего 2-метрового слоя. Поэтому, с учетом того, что в июле наблюдаются наиболее слабые ветра и вертикальное перемешивание, способствующие формированию вертикального градиента температуры почти у поверхности озера, можно сказать, что указанная недооценка моделью поверхностной температуры вполне допустима. В августе недооценка поверхностной температуры значительно меньше, и составляет всего лишь 0,4 °C. С наступлением осени и началом интенсивного ветро-волнового и конвективного перемешивания значения температуры поверхности по данным измерений и результатам моделирования практически совпадают.

Наглядное представление о качестве воспроизведения пространственного распределения поверхностной температуры даёт рис. 3, на котором представлены среднемноголетние распределения поверхностной температуры Ладожского озера для мая и июня, восстановленные по спутниковым данным и результатам моделирования. Как видно, модель достаточно хорошо воспроизводит основные пространственные особенности

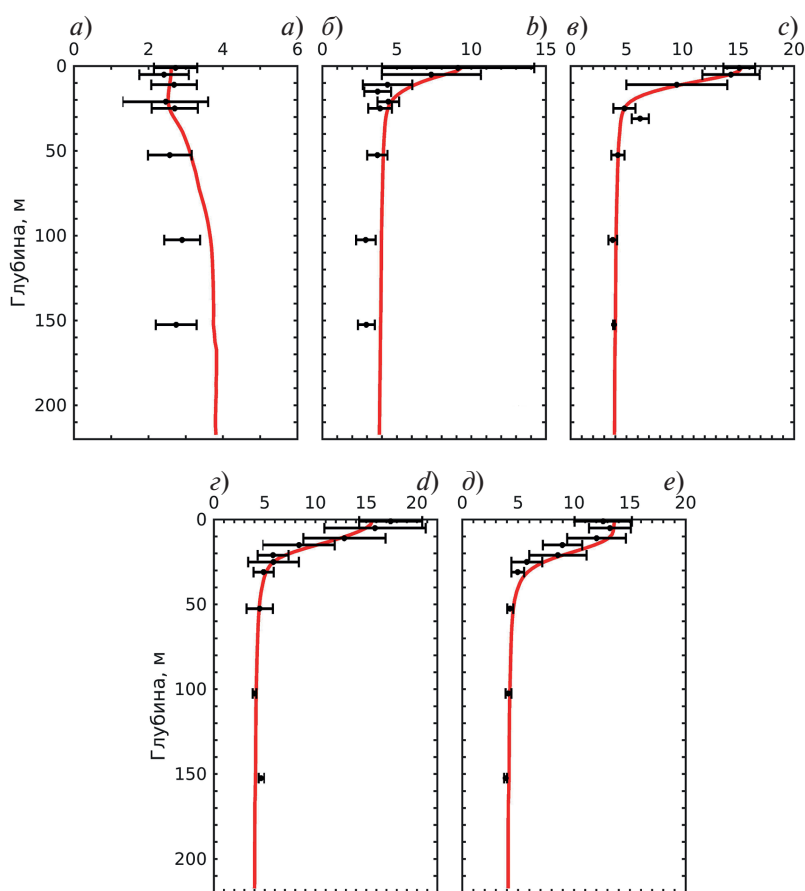


**Рис. 3.** Среднемноголетние (за период 2000–2020 гг.) распределения поверхностной температуры (°C) Ладожского озера для мая (а, б) и июня (в, г) по спутниковым данным (а, в) и результатам моделирования (б, г) (черная линия показывает положение изотермы 4 °C)

**Fig. 3.** Average long-term (for 2000–2020 period) distributions of Lake Ladoga surface temperature for May (a, b) and June (c, d) according to satellite data (a, c) and modeling results (b, d) (the black line shows the position of the isotherm of 4 °C)

распределения поверхностной температуры в указанные месяцы. Одной из важных особенностей сезонной динамики температуры в пресноводном водоеме является термобар, который обеспечивает вертикальное перемешивание вод от поверхности до дна в момент достижения температуры наибольшей плотности, которая для пресных вод составляет  $4^{\circ}\text{C}$ . Как видно из рис. 3, результаты моделирования достаточно хорошо воспроизводят климатическое положение весеннего термобара при сравнении с данными дистанционного зондирования, что выражается в хорошем совпадении пространственного положения изолинии  $4^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, неплохо согласуется со спутниковыми данными модельное распределение температуры в южной части Ладожского озера, где после прохождения термобара начинается быстрый рост поверхностной температуры и формирование сезонной стратификации с температурой поверхностного слоя больше  $4^{\circ}\text{C}$ . Июньские распределения поверхностной температуры (как спутниковое, так и модельное) качественно также хорошо согласуются друг с другом и характеризуются сильным уменьшением температуры с юго-востока на северо-запад и её повышенными значениями в прибрежных мелководных областях. Значения температуры во всей области в июне оказались превышающими  $4^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует об отсутствии термобара в это время. Напомним, что речь идет о средних многолетних распределениях температуры.

Изменения температуры воды с глубиной иллюстрирует рис. 4, на котором представлены средние за период 1991–2017 гг. вертикальные распределения температуры в центральной глубоководной части Ладож-



**Рис. 4.** Среднее за период 1991–2017 гг. вертикальное распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в центральной глубоководной части Ладожского озера в мае (а), июне (б), июле (в), августе (г) и сентябре (д) по данным экспедиционных измерений (точки — средние значения, черные горизонтальные линии — среднеквадратичное отклонение) и результатам расчёта (красные кривые). Глубоководная часть озера выделена по положению 40-метровой изобаты (рис. 1).

**Fig. 4.** Average for 1991–2017 period vertical distribution of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) in the central deep-water part of Lake Ladoga in May (a), June (b), July (c), August (d) and September (e) according to expeditionary measurements (points are average values, black horizontal lines are the standard deviation) and modeling results (red curves). The deep-water part of the lake is identified by the position of the 40-meter isobath (see Fig. 1)

ского озера в мае, июне, июле, августе и сентябре, построенные по данным экспедиционных измерений и результатам расчёта. Как видно, в мае (период весеннего конвективного перемешивания) наблюдается гомотермия, т. е. вертикальное распределение температуры близко к однородному со значениями 2,5–3 °С, в то время как модельное распределение демонстрирует немного завышенные температуры (около 4 °С) в глубоких слоях озера. В летние месяцы (период нагревания озера) наблюдается ярко выраженная устойчивая стратификация в верхнем 25–30-метровом слое с ростом поверхностной температуры от мая к августу и практическое постоянство температуры в нижележащих слоях. В сентябре (начало периода осеннего выхолаживания и конвективного перемешивания) небольшое уменьшение поверхностной температуры сопровождается появлением верхнего перемешанного слоя толщиной 8–10 м и небольшим заглублением нижней границы термоклина. Все эти особенности правильно воспроизводятся моделью.

### 3.2. Биогеохимические характеристики

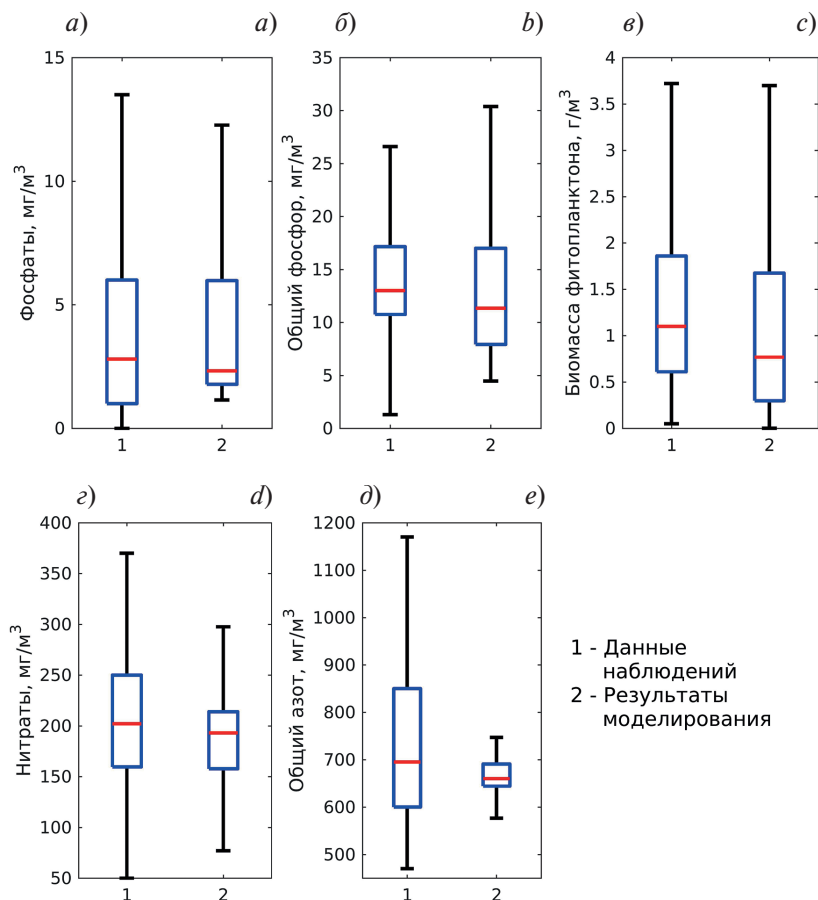
Верификация модели биогеохимических циклов Ладожского озера проводилась с использованием данных натурных измерений, полученных Институтом озераведения РАН в рамках экспедиционных исследований и включающих следующие биогеохимические характеристики: минеральный и общий фосфор, окисленные формы азота и общее содержание азота в водной среде, биомасса фитопланктона за период 1991–2020 гг. Верификация модели строилась на следующей схеме сравнения воспроизведенных и измеренных характеристик. Для каждого измерения, которое характеризуется местом (широта и долгота станции) и датой отбора проб, были выбраны значения воспроизведенных характеристик в ячейке сетки, внутрь которой попадали координаты точки проведения измерений. Собранные таким образом парные значения основных параметров, характеризующих состояние экосистемы, анализировались, используя диаграммы размаха и безразмерную функцию качества (cost function) CF [37]. Функция CF представляет собой абсолютное значение разницы между средними значениями характеристики, рассчитанными по данным наблюдений ( $D$ ) и по модели ( $M$ ), отнесенной к стандартному отклонению данных наблюдений ( $S_d$ ), т. е.  $CF = |D - M|/S_d$ . Принято считать, что функция CF показывает, насколько велики систематические различия модельных результатов и данных наблюдений. Традиционно, результат моделирования считается хорошим, если CF не превышает 1; приемлемым — в случае, если значение CF находится между 1 и 2; плохим — если CF превышает 2.

Поскольку Ладожское озеро является фосфор-лимитированным водоемом, то из биогенных элементов наибольшее значение при верификации модели имеют соединения фосфора. На рис. 5, а представлена диаграмма размаха для минерального фосфора, построенная по 664 значениям. Как видно, медианное значение модельных фосфатов составляет 2,3 мкг/м<sup>3</sup>, а медиана данных натурных наблюдений равна 2,8 мкг/м<sup>3</sup>. При этом расхождение значения квартиля 75 % между воспроизведенными и измеренными значениями составляет 0,1 мкг/м<sup>3</sup>. Рассчитанная функция качества для фосфатов составляет 0,1. Стоит отметить, что предел обнаружения фосфатов в природных водах в соответствии с действующими методиками составляет от 2,5 до 5 мкг/м<sup>3</sup>. Поэтому можно с уверенностью сказать, что модель достаточно хорошо воспроизводит концентрацию минерального фосфора. Сопоставление модельных и наблюдаемых значений содержания общего фосфора (рис. 5, б) показывает, что модель недооценивает медианное значение на 1,8 мкг/м<sup>3</sup> и имеет больший размах между квартилями 25 и 75 %. Тем не менее, функция CF для общего фосфора равна 0,15.

Аналогичное сравнение результатов моделирования с данными наблюдений для нитратов и общего азота (рис. 5, в, д) показывает, что модель достаточно хорошо воспроизводит наблюдаемые уровни концентраций данных характеристик. Так, из сравнения 356 измерений нитратов с результатами моделирования видно, что модель недооценивает медианное значение на 10 мкг/м<sup>3</sup>, что составляет примерно 5 % от наблюдаемого значения. При этом, хотя недооценка квартиля 75 % составляет примерно 40 мкг/м<sup>3</sup>, функция CF составляет всего лишь 0,35. Для общего азота при сравнении 440 пар измеренных и смоделированных значений, также в целом отмечается недооценка среднего уровня содержания общего азота в модели по сравнению с данными наблюдений. Модель сильно занижает и размах колебаний содержания общего азота. Тем не менее, CF для общего азота равна 1,5, т. е. соответствует приемлемому уровню.

Отметим, что отмеченные расхождения результатов моделирования биогенных элементов с данными наблюдений, скорее всего, связаны с неточностями в задании поступления из внешних источников.

Сравнение 584 измерений биомассы фитопланктона с результатами моделирования (рис. 5, е) показало, что модель в целом недооценивает биомассу фитопланктона. Недооценка медианного значения составляет 0,34 гww/м<sup>3</sup> (30 %), недооценки значения квартиля 25 % — 45–50 % и квартиля 75 % — 10 %. Значение функции качества равно 0,39. Заниженные значения воспроизведенной биомассы фитопланктона связаны с недооценкой содержания фосфора.



**Рис. 5.** Сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений для фосфатов (а), общего фосфора (б), биомассы фитопланктона (в сыром весе) (в), нитратов (г) и общего азота (д). (Красная линия — медианное значение, синяя — квантили 25 и 75 %, черная — минимум и максимум)

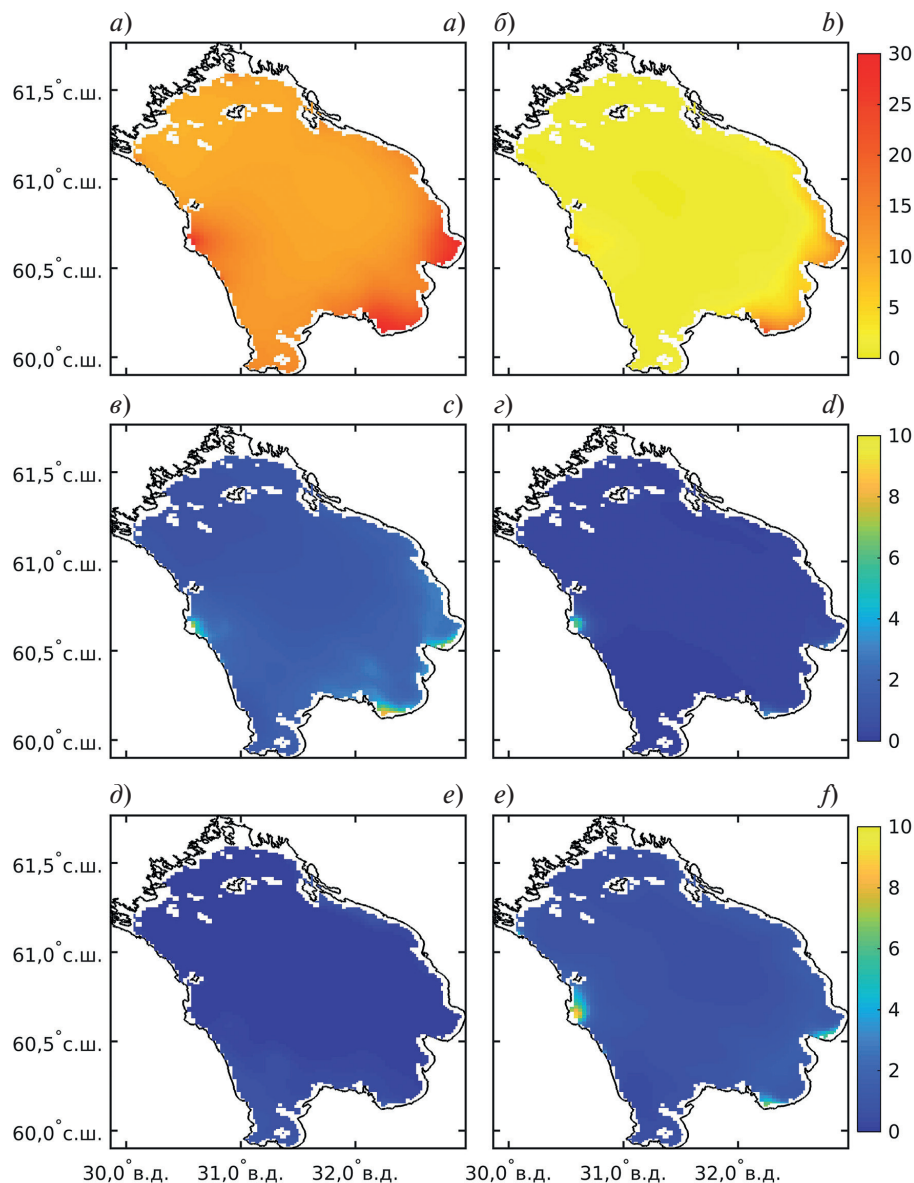
**Fig. 5.** Comparison of modeling results with field observation data for phosphates (a), total phosphorus (b), phytoplankton biomass (c), nitrates (d) and total nitrogen (e) (red line — the median value, blue line — 25 and 75 % quartiles, black line — minimum and maximum)

#### 4. Пространственная и временная изменчивость

В отличие от немногочисленных данных экспедиционных измерений, характеризующихся пространственными и временными пропусками, полученные модельные результаты позволяют в гораздо более полном объёме представить пространственно-временную картину сезонной изменчивости озерной экосистемы и оценить соответствие общепринятым представлениям о её функционировании.

К основным показателям состояния экосистемы Ладожского озера относятся фитопланктон и лимитирующий его развитие биогенный элемент — фосфор (в виде фосфатов). Модельное среднесезонное распределение фосфатов на поверхности озера в конце зимнего периода (рис. 6, а) неоднородно, что свидетельствует о неравномерности их накопления в верхнем слое в зимний период. Наибольшие концентрации минерального фосфора (до 25–30 мг/м³), обусловленные его поступлением с речными водами, отмечаются в Волховской и Свирской губах, а также вблизи устья реки Вуокса. В открытых районах озера зимние концентрации фосфатов составляют 10–15 мг/м³. Наименьшие концентрации фосфатов отмечаются в северной части озера, где они составляют 5–10 мг/м³. В летний период фотосинтез органического вещества фитопланктоном приводит к понижению концентрации фосфатов в верхнем слое озера до (0,5–5,0) мг/м³ (рис. 6, б). Исключение составляют Волховская и Свирская губы, а также восточное побережье, где концентрации фосфатов в летний период могут достигать 10–12 мг/м³ за счет поступления фосфатов с речным стоком.

Согласно рис. 6, в, максимальные значения биомассы диатомового фитопланктона в мае-июне, составляющие  $8\text{--}10\text{ г/м}^3$ , наблюдаются в районах максимального накопления фосфатов в зимний период. В открытых районах озера биомасса диатомового фитопланктона составляет  $1\text{--}4\text{ г/м}^3$ , наименьшие значения ( $<1\text{ г/м}^3$ ) отмечаются в северной части водоема. В целом распределение биомассы диатомового фитопланктона следует распределению фосфатов в период перед началом весеннего цветения, что объясняется тем фактом, что в весенний период рост фитопланктона обеспечивается в основном накопленными за зиму питательными веществами и не контролируется ещё не успевшим развиваться зоопланктоном. Недиаомовый фитопланктон весной не развит, его биомасса незначительна (рис. 6, д). В летний период (рис. 6, з, е) ситуация меняется на обратную: на всей акватории озера биомасса диатомового фитопланктона мала и преоб-

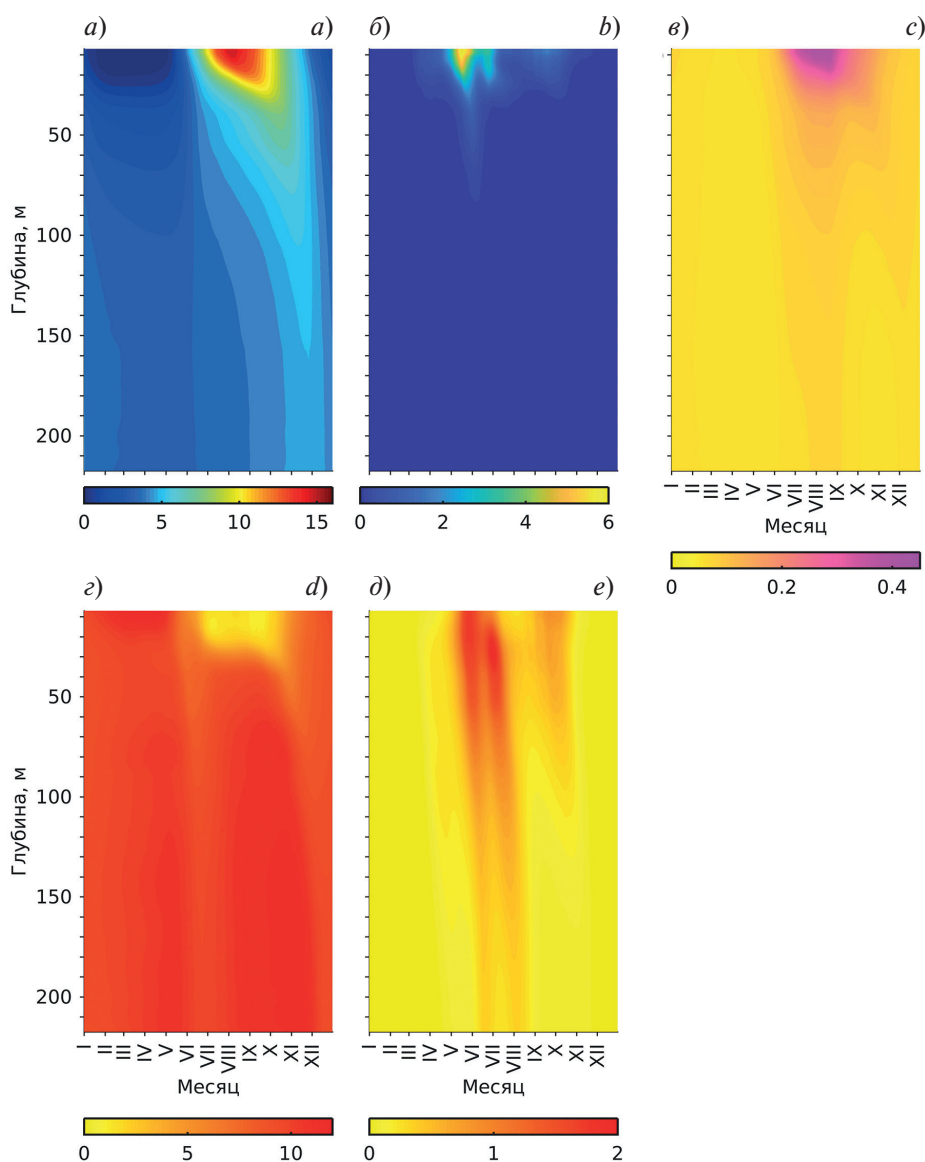


**Рис. 6.** Среднемноголетние (за период 1979–2018 гг.) поверхностные распределения фосфатов ( $\text{мг/м}^3$ ) в последней декаде апреля (а) и июль–сентябрь (б), диатомовых водорослей ( $\text{г/м}^3$  в сыром весе) май-июнь (в) и июль–сентябрь (г), недиаомовых водорослей ( $\text{г/м}^3$  в сыром весе) май-июнь (д) и июль–сентябрь (е) в Ладожском озере по результатам моделирования

**Fig. 6.** Average long-term (for 1979–2018) surface distributions of phosphates ( $\text{mg/m}^3$ ) in the last ten days of April (a) and July–September (b), diatoms ( $\text{gww/m}^3$ ) in May–June (c) and July–September (d), non-diatoms ( $\text{gww/m}^3$ ) in May–June (e) and July–September (f) in Lake Ladoga according to modeling results

ладает недиатомовый фитопланктон, концентрация которого в поверхностном слое составляет  $1,5\text{--}3\text{ г/м}^3$  за исключением устьевых районов впадения основных притоков Ладожского озера — Свири, Волхова и Вуоксы. В этих районах содержание биомассы фитопланктона достигает  $7\text{--}8\text{ г/м}^3$ . Отмеченная особенность модельного решения — преобладание диатомового фитопланктона в весенний период и недиатомового, в летний, полностью соответствует имеющимся представлениям о функционировании экосистемы Ладожского озера, сложившимся по данным натурных исследований [21].

В соответствии с рис. 7, на котором представлены среднегодовое сезонные изменения (по времени и глубине) температуры и характеристик экосистемы в центральной глубоководной части Ладожского озера, сезонная динамика фосфатов в столбе воды имеет 4 ярко выраженных периода (рис. 7, *г*). Это периоды зимнего и летнего накопления фосфатов в гипolimнионе, когда из-за устойчивой термической стратификации (рис. 7, *а*) затруднен обмен теплом и примесями между эпилимнионом и гипolimнионом, а также периоды развития весеннего и осеннего термобара, когда в результате вертикального перемешивания накопленные



**Рис. 7.** Рассчитанные среднегодовое (за период 1979–2018 гг.) сезонные изменения по времени и глубине температуры, °C (*а*), фитопланктона,  $\text{г/м}^3$  в сыром весе (диатомовые + недиатомовые водоросли) (*б*), зоопланктона,  $\text{г/м}^3$  в сыром весе (*в*), фосфатов,  $\text{мг/м}^3$  (*г*) и фосфора в детрите,  $\text{мг/м}^3$  (*д*) в Ладожском озере

**Fig. 7.** Calculated average long-term (for 1979–2018) time-depth seasonal dynamics of temperature, °C (*a*), phytoplankton,  $\text{gww/m}^3$  (diatoms + non-diatoms) (*b*), zooplankton,  $\text{gww/m}^3$  (*c*), phosphates,  $\text{mg/m}^3$  (*g*) and phosphorus in detritus,  $\text{mg/m}^3$  (*d*) in Lake Ladoga

в гипolimнионе фосфаты поступают в фотический слой. Указанная особенность сезонной динамики фосфатов объясняет механизм сезонных вариаций фитопланктона (рис. 7, б). А, именно, накопленные в гипolimнионе в летний период фосфаты в результате осеннего термобара (середина ноября) поступают в верхний фотический слой, но не могут быть использованы там для продуцирования органического вещества в процессе фотосинтеза из-за недостатка света. В последующий зимний период поступившие в фотический слой в период осеннего термобара фосфаты пополняются за счет поступления фосфатов со стоком рек. Одновременно идёт процесс накопления фосфатов в гипolimнионе за счет минерализации оседающего детрита (рис. 7, д), чему способствует зимняя фаза устойчивой стратификации водной толщи озера. Таяние льда и увеличение освещенности весной приводят к сильному росту (цветению) диатомовых водорослей в середине мая. Этот рост биомассы фитопланктона происходит благодаря зимним запасам фосфатов. К моменту выедания этих запасов, весеннее нагревание верхнего слоя озера приводит к развитию весеннего термобара, который обеспечивает поступление в фотический слой накопленных в гипolimнионе фосфатов, тем самым поддерживая весеннее цветение диатомовых водорослей. После окончания весеннего цветения диатомовых, обусловленного истощением минерального питания и выеданием фитопланктона зоопланктоном, начинается летняя фаза продуцирования органического вещества недиадомовыми водорослями, которая поддерживается поступлением фосфатов в верхний слой в основном за счет экскреции зоопланктона, а также минерализации детрита, продуцируемого фито- и зоопланктоном, который активно развивается в июле-августе (рис. 7, в). В начале периода осенне-зимней конвекции (конец сентября — начало октября) отмечается небольшая осенняя вспышка диатомовых (рис. 7, б), которая обеспечивается поступлением фосфатов из глубоких слоев озера и еще достаточными для процесса фотосинтеза световыми условиями.

## 5. Заключение

Сравнение результатов расчета современного климатического состояния Ладожского озера в период 1979–2018 гг. по трехмерной эко-гидродинамической модели с имеющимися данными спутниковых и экспедиционных наблюдений показало, что модель правильно воспроизводит климатический сезонный ход поля поверхностной температуры и её вертикального распределения. Согласно оценкам функции качества, модель также достаточно хорошо воспроизводит средние значения и диапазон изменений основных характеристик экосистемы Ладожского озера, а выявленные особенности климатического сезонного хода не противоречат общепринятым представлениям о функционировании экосистем пресноводных озер бореальной зоны. Всё это свидетельствует о том, что предложенная модель может быть использована для исследования влияния внешних естественных и антропогенных факторов на биогеохимические процессы и функционирование экосистемы Ладожского озера.

## Финансирование

Исследование выполнено при поддержке грантов Российского научного фонда (проект № 23-17-20010) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010)

## Funding

The research was supported by grants from the Russian Science Foundation (project No. 23-17-20010) and the St. Petersburg Science Foundation (project No. 23-17-20010).

## Литература

1. Di Toro D.M., Connolly J.P. Mathematical models of water quality in large lakes. Lake Erie eutrophication of waters: Monitoring. Assessment and control. Paris: OECD, 1982. 154 p.
2. Straskraba M., Gnauck A. Freshwater ecosystems. Modelling and simulation. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1985. 309 p.
3. Mooij W.M., Trolle D., Arhonditsis G. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches // Aquatic Ecology. 2010. Vol. 44 (3). P. 633–667. doi:10.1007/s10452-010-9339-3
4. Zhang W., Watson S.B., Rao Y.R., et al. A linked hydrodynamic, water quality and algal biomass model for a large, multi-basin lake: A working management tool // Ecological Modelling. 2013. Vol. 269. P. 37–50. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.08.018
5. Scavia D., DePinto J.V., Bertani I. A multi-model approach to evaluating target phosphorus loads for Lake Erie // Journal of Great Lakes Research. 2016. Vol. 42 (6). P. 1139–1150. doi:10.1016/j.jglr.2016.09.007

6. Vinçon-Leite B., Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 651. P. 2985–3001. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.139
7. Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: a review // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 636. P. 339–354. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.183
8. Менишуткин В.В., Воробьева О.Н. Модель экологической системы Ладожского озера // Современное состояние Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петровой и Г.Ф. Растлепиной. Л.: Наука, 1987. С. 187–200.
9. Rukhovets L.A., Astrakhansev G.P., Menshutkin V.V., et al. Development of Lake Ladoga ecosystem models: modeling of the phytoplankton succession in the eutrophication process. I. // Ecological Modelling. 2003. Vol. 165(1). P. 49–77. doi:10.1016/S0304-3800(03)00061-9
10. Астраханцев Г.П. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Г.П. Астраханцев, В.В. Менишуткин, Н.А. Петрова, Л.А. Руховец. СПб.: Наука, 2003. 363 с.
11. Menshutkin V.V., Astrakhansev G.P., Yegorova N.B., et al. Mathematical modelling of the evolution and current conditions of the Ladoga Lake ecosystem // Ecological Modelling. 1998. Vol. 107. P. 1–24. doi:10.1016/S0304-3800(97)00184-1
12. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego — Great European Lakes: Observations and modeling / Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2010. doi:10.1007/978-3-540-68145-8
13. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата // Под редакцией С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова и В.А. Румянцева. М.: Изд. РАН, 2021. 640 с.
14. Savchuk O.P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // Journal of Marine Systems. 2002. Vol. 32(4). P. 253–280. doi:10.1016/S0924-7963(02)00039-8
15. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., et al. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification // Water. 2020. Vol. 12(5). P. 1307. doi:10.3390/w12051307
16. Рябенко В.А., Карлин Л.Н., Исаев А.В. и др. Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате // Океанология. 2016. Т. 56, № 1. С. 41–50. doi:10.1134/S0001437016010161
17. Meier H.E.M., Edman M.K., Eilola K.J., et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations // Frontiers in Marine Science. 2018. Vol. 5. P. 440. doi:10.3389/fmars.2018.00440
18. Meier H.E.M., Edman M., Eilola K., et al. Assessment of uncertainties in scenario simulations of biogeochemical cycles in the Baltic Sea // Frontiers in Marine Science. 2019. Vol. 6. P. 46. doi:10.3389/fmars.2019.00046
19. 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
20. 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
21. Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
22. Patten B.S. Mathematical models of plankton production // Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie. 1968. Vol. 53. P. 357–408.
23. Modeling of Marine Systems / Nihoul, J.C.J. (Ed.). Amsterdam: Elsevier, 1975. 272 p.
24. Сергеев Ю.Н., Колодочка А.А., Круммель Х.Д. и др. Моделирование процессов переноса и трансформации вещества в море Л.: Издательство Ленинградского университета, 1979. 292 с.
25. Savchuk O., Wulff F. A model of the biogeochemical cycles of nitrogen and phosphorus in the Baltic. A systems analysis of the Baltic Sea / ed. Wulff F.V., Rahm L.A., Larsson P. Berlin: Heidelberg, Springer, 2001. P. 373–415. doi:10.1007/978-3-662-04453-7\_14
26. Marshall J., Adcroft A., Hill C., et al. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, N C3. P. 5753–5766. doi:10.1029/96JC02775
27. Marshall J., Hill C., Perelman L., et al. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, N C3. P. 5733–5752. doi:10.1029/96JC02776
28. Pilcher D.J., McKinley G.A., Bootsma H.A., et al. Physical and biogeochemical mechanisms of internal carbon cycling in Lake Michigan // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015. Vol. 120, N 3. P. 2112–2128. doi:10.1002/2014JC010594
29. Gloege L., McKinley G.A., Mooney R.J., et al. Lake hydrodynamics intensify the potential impact of watershed pollutants on coastal ecosystem services // Environmental Research Letters IOP Publishing. 2020. Vol. 15, N 6. P. 064028. doi:10.1088/1748-9326/ab7f62

30. Bennington V., McKinley G.A., Kimura N., et al. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, N C12. doi:10.1029/2010JC006261
31. Gaspar P., 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 // *Journal of Geophysical Research*. 1990. Vol. 95(C9), P. 16179. doi:10.1029/JC095iC09p16179
32. Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.J. Numerical results from a ninelevel general circulation model of the atmosphere // *Monthly Weather Review* Vol. 93. 1965. P. 727–768.
33. Кондратьев С.А., Ефремова Л.В., Расплетина Г.Ф., и др. Оценка внешней нагрузки на Ладожское озеро // *Экологическая химия*. 1997. Т. 6, № 2. С. 73–84.
34. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 255 с.
35. Лозовик П.А., Галахина Н.Е., Кравченко И.Ю. Современное состояние водных объектов Карелии в результате воздействия природных, климатических и антропогенных факторов // *Водное хозяйство России*. 2017. № 3. С. 24–39.
36. Ефремова Л.В. Оценка атмосферной составляющей внешней нагрузки на Финский залив // Тез. докл. конф. «Экологические проблемы Севера Европейской территории России», Апатиты, 1996. С. 149–150.
37. Eilola K., Gustafsson B.G., Kuznetsov I., et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state-of-the-art numerical models of the Baltic Sea // *Journal of Marine Systems*. 2011. Vol. 88. P. 267–284. doi:10.1016/j.jmarsys.2011.05.004.

## References

1. Di Toro D.M., Connolly J.P. Mathematical models of water quality in large lakes. Lake Erie eutrophication of waters: Monitoring. Assessment and control. Paris: OECD, 1982, 154 p.
2. Straskraba M., Gnauck A. Freshwater ecosystems. Modelling and simulation. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1985, 309 p.
3. Mooij W.M., Trolle D., Arhonditsis G. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquatic Ecology*. 2010, 44, 3, 633–667. doi:10.1007/s10452-010-9339-3
4. Zhang W., Watson S.B., Rao Y.R., et al. A linked hydrodynamic, water quality and algal biomass model for a large, multi-basin lake: A working management tool. *Ecological Modelling*. 2013, 269, 37–50. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.08.018
5. Scavia D., DePinto J.V., Bertani I. A multi-model approach to evaluating target phosphorus loads for Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*. 2016, 42, 6, 1139–1150. doi:10.1016/j.jglr.2016.09.007
6. Vinçon-Leite B., Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Science of the Total Environment*. 2019, 651, 2985–3001. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.139
7. Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: a review. *Science of the Total Environment*. 2018, 636, 339–354. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.183
8. Menshutkin V.V., Vorobieva O.N. A model of the ecological system of Lake Ladoga. The current state of the ecosystem of Lake Ladoga. Ed. N.A. Petrova, G.F. Raspletina. Leningrad, Nauka, 1987, 187–200 (In Russian).
9. Rukhovets L.A., Astrakhansev G.P., Menshutkin V.V., et al. Development of Lake Ladoga ecosystem models: modeling of the phytoplankton succession in the eutrophication process. I. *Ecological Modelling*. 2003, 165, 1, 49–77. doi:10.1016/S0304-3800(03)00061-9
10. Astrakhansev G.P., Menshutkin V.V., Petrova L.A., et al. Modeling ecosystems of large stratified lakes. SPb., Nauka, 2003, 363 p. (In Russian).
11. Menshutkin V.V., Astrakhansev G.P., Yegorova N.B., et al. Mathematical modelling of the evolution and current conditions of the Ladoga Lake ecosystem. *Ecological Modelling*. 1998, 107, 1–24. doi:10.1016/S0304-3800(97)00184-1
12. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego — Great European Lakes: Observations and modeling. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. doi:10.1007/978-3-540-68145-8
13. Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate / Ed. by S.A. Kondratyev, Sh.R. Pozdniakov, V.A. Rumiantsev, Moskva, RAS, 2021. 640 p. (In Russian).
14. Savchuk O.P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. *Journal of Marine Systems*. 2002, 32, 4, 253–280. doi:10.1016/S0924-7963(02)00039-8
15. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., et al. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification. *Water*. 2020, 12, 5, 1307. doi:10.3390/w12051307
16. Ryabchenko V.A., Karlin L.N., Isaev A.V., et al. Model estimates of the eutrophication of the Baltic Sea in the contemporary and future climate. *Oceanology*. 2016, 56, 1, 36–45. doi:10.1134/S0001437016010161
17. Meier H.E.M., Edman M.K., Eilola K.J., et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations. *Frontiers in Marine Science*. 2018, 5, 440. doi:10.3389/fmars.2018.00440

18. Meier H.E.M., Edman M., Eiola K., et al. Assessment of uncertainties in scenario simulations of biogeochemical cycles in the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2019, 6, 46. doi:10.3389/fmars.2019.00046
19. 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
20. 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
21. Ladoga / Ed. by V.A. Rumiantsev, S.A. Kondratev. *SPh., Nestor-History*, 2013, 468 p. (In Russian).
22. Patten B.S. Mathematical models of plankton production. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*. 1968, 53, 357–408.
23. Modeling of Marine Systems / Ed. by Nihoul, J.C.J., Elsevier, 1975, 272 p.
24. Modeling the processes of transfer and transformation of matter in the sea / Ed. by Iu.N. Sergeev. *Leningrad State University*, 1979, 292 p. (In Russian).
25. Savchuk O., Wulff F. A model of the biogeochemical cycles of nitrogen and phosphorus in the Baltic. A systems analysis of the Baltic Sea ed. Wulff F.V., Rahm L.A., Larsson P. *Berlin, Heidelberg, Springer*, 2001, 373–415. doi:10.1007/978-3-662-04453-7\_14
26. Marshall J., Adcroft A., Hill C., et al. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997, 102(C3), 5753–5766. doi:10.1029/96JC02775
27. 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
28. Pilcher D.J., McKinley G.A., Bootsma H.A., et al. Physical and biogeochemical mechanisms of internal carbon cycling in Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015, 120, 3, 2112–2128. doi:10.1002/2014JC010594
29. Gloege L., McKinley G.A., Mooney R.J., et al. Lake hydrodynamics intensify the potential impact of watershed pollutants on coastal ecosystem services. *Environmental Research Letters. IOP Publishing*. 2020, 15, 6, 064028. doi:10.1088/1748-9326/ab7f62
30. Bennington V., McKinley G.A., Kimura N., et al. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010, 115, C12015. doi:10.1029/2010JC006261
31. Gaspar P., 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. *Journal of Geophysical Research*. 1990, 95(C9), 16179. doi:10.1029/JC095iC09p16179
32. Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.I. Numerical results from a ninelevel general circulation model of the atmosphere. *Monthly Weather Review*, 1965, 93, 727–768.
33. Kondratev S.A., Efremova L.V., Raspletina G.F. et al. Assessment of external load on Lake Ladoga. *Environmental Chemistry*. 1997, 6(2), 73–84 (In Russian).
34. Kondratev S. A formation of external load on reservoirs: modeling problems. / Ed. by Kondratev S.A., *SPh., Nauka*, 2007, 255 p. (In Russian).
35. Lozovik P.A., Galakhina N.Y., Kravchenko I.Y. Current status of water bodies of Karelia as a result of natural, climatic and anthropogenic factors' impact. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2017, 3, 24–39 (In Russian).
36. Efremova L.V. Assessment of the atmospheric component of the external load on the Gulf of Finland. *Proceedings "Ecological problems of the North of the European territory of Russia"*, *Apatity*, 1996, 149–150 (In Russian).
37. Eilola K., Gustafsson B.G., Kuznetsov I., et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state-of-the-art numerical models of the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*. 2011, 88, 267–284. doi:10.1016/j.jmarsys.2011.05.004

## Об авторах

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

РЯБЧЕНКО Владимир Алексеевич, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук,  
ORCID: 0000-0003-3909-537X, WoS Researcher ID: R-3877–2016, Scopus Author ID: 7005479766,  
SPIN-код: 2187-1380, e-mail: vla-ryabchenko@yandex.ru

КОНИК Александр Александрович, научный сотрудник, кандидат географических наук,  
ORCID: 0000-0002-2089-158X, Scopus AuthorID: 57203864647, SPIN-код: 5839-1738,  
e-mail: konikrshu@gmail.com