

УДК 556.01 : 556.51 : 556.55 : 519.87 (282.247.211)

## **РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ОЗЕРО – ВОДОСБОР» КАК МЕТОДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИНСТРУМЕНТА ОБОСНОВАНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)**

**Н. Н. Филатов<sup>1\*</sup>, В. Н. Баклагин<sup>1</sup>, А. В. Исаев<sup>1,2</sup>,  
С. А. Кондратьев<sup>1,3</sup>, О. П. Савчук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),  
\* nfilatov@rambler.ru

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Санкт-Петербургский филиал  
(1-я линия В. О., 30, Санкт-Петербург, Россия, 119053)

<sup>3</sup> Институт озероведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург,  
Россия, 196105)

Разрабатывается информационно-аналитическая система (ИАС), предназначенная для оценки состояния и прогнозирования динамики системы «озеро – водосбор». Прогнозирование состояния экосистемы озера в условиях глобальных изменений климата и активной эксплуатации его ресурсов (водных, биологических, энергетических, рекреационных, транспортных) осуществляется на трехмерной математической модели экосистемы озера, сопряженной с моделью стока с водосбора. Модели озера и водосбора объединяются с базой данных и знаний в единой ИАС. Выполненные с помощью ИАС прогностические оценки сезонной и многолетней динамики экосистемы озера будут служить основой для выявления возможных экономических, социальных и культурных последствий региональных и глобальных изменений. Функционирующая ИАС необходима для создания системы поддержки принятия управленческих решений.

Ключевые слова: Онежское озеро; информационно-аналитическая система; экосистемное моделирование; система «озеро – водосбор»; управление водными ресурсами; климатические и антропогенные сценарии

Для цитирования: Филатов Н. Н., Баклагин В. Н., Исаев А. В., Кондратьев С. А., Савчук О. П. Разработка информационно-аналитической системы «озеро – водосбор» как метода фундаментальных исследований и инструмента обоснования управленческих решений (на примере Онежского озера) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 161–172. doi: 10.17076/lim1683

Финансирование. Работа выполнена по гранту РНФ № 22-17-00193.

**N. N. Filatov<sup>1\*</sup>, V. N. Baklagin<sup>1</sup>, A. V. Isaev<sup>1,2</sup>, S. A. Kondratyev<sup>1,3</sup>, O. P. Savchuk<sup>1</sup>.  
DEVELOPING A «LAKE – CATCHMENT» INFORMATION ANALYSIS SYSTEM  
AS A METHOD FOR BASIC RESEARCH AND A TOOL FOR DECISION-MAKING  
(LAKE ONEGO CASE STUDY)**

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

<sup>2</sup> St. Petersburg Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (30 1st Liniia V.O., 119053 St. Petersburg, Russia)

<sup>3</sup> Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia)

An information analysis system (IAS) is being developed to assess the state and predict the dynamics of a lake-catchment system. Forecasting of the state of the lake ecosystem in the context of global climate change and active exploitation of its resources (water, energy, recreational and biological resources, transport) is done using a three-dimensional mathematical model of the lake ecosystem, coupled with a model of runoff from the catchment. Lake and catchment models are combined with a database and a knowledge base to form a single IAS. The prognostic assessments of the seasonal and long-term dynamics of the lake ecosystem performed using the IAS serve as the basis for identifying the possible economic, social and cultural consequences of regional and global changes. Operational IAS is necessary to create a management decision support system.

Keywords: Lake Onego; information analysis system; ecosystem modeling; lake-catchment system; water management; climate and anthropogenic scenarios

For citation: Filatov N. N., Baklagin V. N., Isaev A. V., Kondratyev S. A., Savchuk O. P. Developing a "lake-catchment" information analysis system as a method for basic research and a tool for decision-making (Lake Onego case study). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 161–172. doi: 10.17076/lim1683

Funding. The study was supported by Russian Science Foundation grant #22-17-00193.

## Введение

Несмотря на предпринятые в последние четыре десятилетия практические меры по охране и восстановлению экосистем крупных<sup>1</sup> озер мира, до сих пор состояние этих озер не только существенно не улучшается, но отмечается деградация их экосистем, являющаяся результатом кумулятивных воздействий антропогенных и природных факторов в долгосрочном масштабе времени [Jenny et al., 2020]<sup>2</sup>. В этом же обзоре предсказывается возможное продолжение деградации озер из-за увеличения населения Земли и потепления климата, поэтому требуется незамедлительно уделить существенно большее, чем сейчас, внимание решению проблем управления и охраны ресурсов экосистем крупных озер,

развитию сети наблюдений, мониторинга, совершенствованию законодательства в области охраны водных ресурсов. Не вызывает сомнения необходимость интенсификации подобных исследований и в России с конечной целью создания интегрированных систем управления, обеспечивающих информационную поддержку органов, принимающих практические решения [Данилов-Данильян, Хранович, 2010; Меншуткин и др., 2014а; Диагноз..., 2020]. Из-за отсутствия таких систем или недостаточной их работанности управленческие решения в РФ по использованию ресурсов, сохранению или восстановлению озер и их экосистем зачастую принимаются без соответствующего научного обоснования, как это было сделано, например, для озера Байкал [Никитин и др., 2019].

В целом для крупнейших озер России отсутствует количественное описание сложных экосистемных взаимодействий, которое позволило бы не только достоверно различать естественные климатические и антропогенные социо-экономические причины изменений, но и прогнозировать возможную динамику экосистем с указанием степени неопреде-

<sup>1</sup> В этом обзоре под крупными понимаются озера с площадью более 100 км<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Отметим, что среди 40 авторов обзора нет ни одного эксперта из России и даже не упоминаются такие крупные озера Евразии, как Байкал, Ладожское, Онежское, Каспий, Балхаш.

ленности прогнозов. В число таких прогнозов могут входить, например, прогноз изменений гидрологического режима, трофического статуса и рыбопромысловой деятельности, а также проверка эффективности и обоснование локализации гидротехнических сооружений. Для оценки непосредственного краткосрочного воздействия и отдаленных последствий этих и других форм природопользования, модифицированных процессами на водосборе и климатическими изменениями, необходимы как фундаментальные знания экосистемы, так и способность их количественного применения. При этом ни полевые экспериментальные исследования, ни мониторинг не позволяют в полной мере оценить указанные выше системные взаимодействия и дать надежные прогностические оценки [Исаев, Савчук, 2020; Диагноз..., 2020; Румянцев и др., 2021].

Системообразующим ядром современных систем управления ресурсами крупных озер должны служить математические модели, которые позволяют прогнозировать состояние водной экосистемы в условиях глобальных изменений климата и активной эксплуатации ресурсов (водных, биологических, энергетических, рекреационных, транспортных) водоема и его водосбора. Такие прогнозы необходимы и для обоснованной оценки экономических, социаль-

ных и культурных последствий региональных и глобальных изменений. Разработка математических моделей экосистем больших озер продолжается несколько десятилетий [например, Di Toro, Connolly, 1982; Straškraba, Gnauck, 1985; Jorgensen, 1994; Mooij et al., 2010; Scavia et al., 2016]. Однако из недавних обзоров «Моделирование эвтрофикации озерных экосистем» [Vinçon-Leite, Casenave, 2019] и «Моделирование эвтрофикации морей» [Ménèsguen, Lacroix, 2018] видно, что хотя общий уровень разработки моделей термогидродинамики и экосистем для морей опережает таковой для крупных озер, использование моделей обычно сводится к однократным решениям ограниченного круга задач и до сих пор не послужило основой создания надежных постоянно действующих систем управления состоянием и ресурсами озер. Схожая ситуация сложилась и в России, где, несмотря на существенные достижения в области моделирования озер [например, Меншуткин, Воробьева, 1987; Rukhovets, Filatov, 2010; Диагноз..., 2020], разработанные модели так и не были использованы для создания систем поддержки принятия решений.

В обобщенном виде процесс управления водными ресурсами крупных озер может быть представлен следующей схемой (рис. 1) и сопровождаться теоретическими рассуждениями

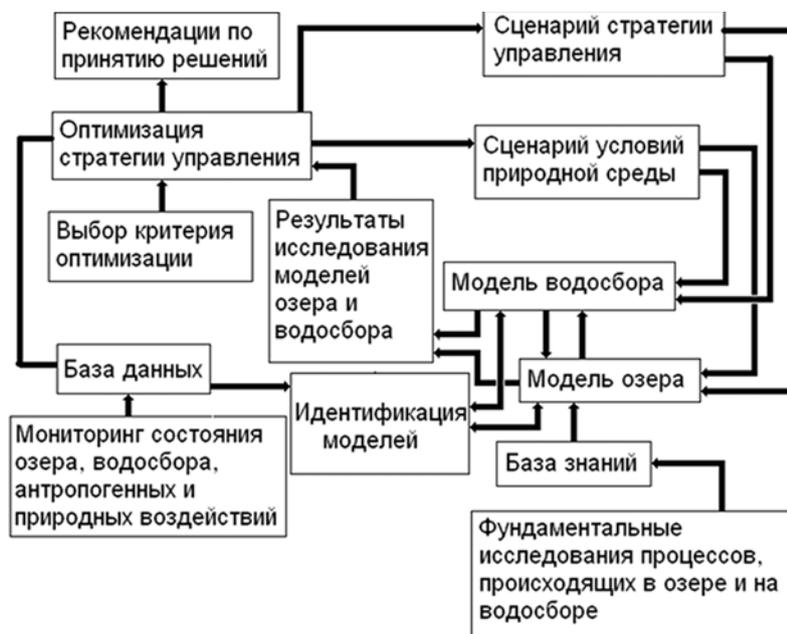


Рис. 1. Схема процесса управления водными ресурсами озера [Меншуткин и др., 2014а]

Fig. 1. Scheme of the lake water management process [Menshutkin et al., 2014a]

о выборе стратегий управления на основе многокритериальной оптимизации, важности использования экономического понятия стоимости, оценки ущерба и штрафных санкций, а также другими правомерными теоретическими построениями. Однако на практике нам неизвестны примеры сколь-нибудь полной реализации подобных схем для конкретных озер России. Не преодолен даже более скромный, но абсолютно необходимый этап создания и обеспечения устойчивого функционирования систем поддержки принятия решений, подобных, например, доступной онлайн системе Baltic NEST [Wulff et al., 2013], которая играет определяющую роль в составлении количественных рекомендаций по противодействию эвтрофикации в рамках межправительственного «Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю» (<https://helcom.fi/baltic-sea-action-plan>).

Исследуя пути управления водными ресурсами крупного озера и наполнения их конкретным содержанием, включая элементы программного обеспечения, мы начинаем с создания информационно-аналитической системы «озеро – водосбор». При всей схожести общих законов функционирования водных экосистем (круговорот вещества, трофические цепи и сети, взаимодействие глубоководных, прибрежных и донных подсистем) проявление этих законов в конкретных крупных озерах существенно различается и модифицируется морфометрией, климатическими условиями, природными и социально-экономическими условиями на водосборе. Поэтому в качестве конкретного водоема, на примере которого предлагается системно исследовать влияние антропогенных и природных факторов на сезонные и многолетние изменения экосистемы, выбрано Онежское озеро, которое, с одной стороны, в среднем олиготрофно и все еще обладает высоким качеством воды, но с другой – начало демонстрировать неблагоприятные тенденции ухудшения состояния своей экосистемы [Крупнейшие..., 2015; Калинин и др., 2018].

Далее остановимся на трех основных блоках создаваемой информационно-аналитической системы Онежского региона, образованного озером с его водосборным бассейном: а) имитационных математических моделях термогидродинамики и биогеохимического круговорота биогенов в экосистеме озера, б) моделях формирования водного стока и биогенной нагрузки на водосборе, в) интегрированной базой данных, знаний и результатов моделирования с инструментами визуализации, представленной в виде, пригодном для совместного анализа.

## **Имитационная модель экосистемы Онежского озера**

Построение, дальнейшее развитие и эксплуатация имитационной модели является формой фундаментального исследования озера [Беляев, 1980] и инструментом широкого спектра прогнозов. Как форма исследования, модель является объединяющей платформой для сопоставления формулировок модели и результатов моделирования со знаниями и данными, полученными в ходе гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и геохимических исследований, а также проверки и обсуждения их взаимной состоятельности. Созданная и постоянно совершенствующаяся модель используется для решения широкого круга исследовательских, проектных и прогностических задач.

В информационно-аналитической системе базовой является модель биогеохимического круговорота биогенных элементов в экосистеме озера, которая в процессе эксплуатации может модифицироваться и расширяться для решения специфических задач, таких, например, как динамика органических загрязнителей [Undeman et al., 2014], ртути [Soerensen et al., 2016] и микропластика [Berezina et al., 2021]. Расчеты на созданных ранее моделях Онежского озера [Меншуткин и др., 2014б] позволили показать последствия антропогенных воздействий, потепления климата, а также оценить ассимиляционный потенциал и допустимые значения поступления фосфора и азота [Руховец и др., 2011]. Существенным недостатком созданных моделей, который может оказаться критическим при долгосрочном прогнозировании, является то, что в них не учитывалась динамика биогенных элементов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенов. Этот недостаток мог бы быть устранен совместно с другими наметившимися усовершенствованиями, но поддержка указанных моделей и их дальнейшее развитие стали невозможными по научно-организационным причинам. В разрабатываемой же ИАС используется модель сопряженных круговоротов азота и фосфора [Savchuk, 2002; Savchuk et al., 2012; Isaev et al., 2020], предварительно адаптированная к условиям Ладожского озера [Исаев, Савчук, 2020] и успешно использованная для тридцатилетнего «биогеохимического реанализа» экосистемы Онежского озера [Isaev et al., 2022; Savchuk et al., 2022]. Модель, которую предлагаем назвать Saint-

Petersburg Lake Ecosystem Model (SPLEM), состоит из гидродинамического и биогеохимического модулей.

Гидродинамический модуль экогидродинамической модели Онежского озера основан на модели Массачусетского института технологий MITgcm [Marshall et al., 1997], которая успешно использовалась для моделирования термогидродинамики крупных бореальных озер [Gloege et al., 2020; Исаев, Савчук, 2020].

Блок-схема биогеохимического модуля представлена на рис. 2. Формулировка модели и параметризация процессов взаимодействия представлены во всей полноте в работах [Savchuk, 2002; Isaev et al., 2020]. Состоятельность параметризаций и правдоподобность воспроизводимой динамики экосистемных переменных и потоков биогенных элементов продемонстрированы более чем двадцатилетним опытом моделирования [например, Savchuk, 2002; Savchuk et al., 2012; Isaev et

al., 2020], включая моделирование Онежского озера [Isaev et al., 2022; Savchuk et al., 2022].

Наряду с исследованиями долговременных крупномасштабных проблем климатических и антропогенных воздействий, включая оценки трофического статуса водоема, определения допустимой нагрузки на экосистему, количественное исследование фильтрующе-трансформирующей роли термобара, использование ИАС послужит и решению широкого спектра сугубо прикладных задач: проверки существующей и обоснования проектируемой локализации водозаборов, точечных и диффузионных поступлений, выпусков бытовых и промышленных сточных вод, размещения хозяйств аквакультуры и подготовки рекомендаций по природоохранным режимам побережья. В то же время важнейшими особенностями Онежского озера являются сложная батиметрия, чрезвычайная изрезанность его береговой черты, наличие узких губ и заливов, а также

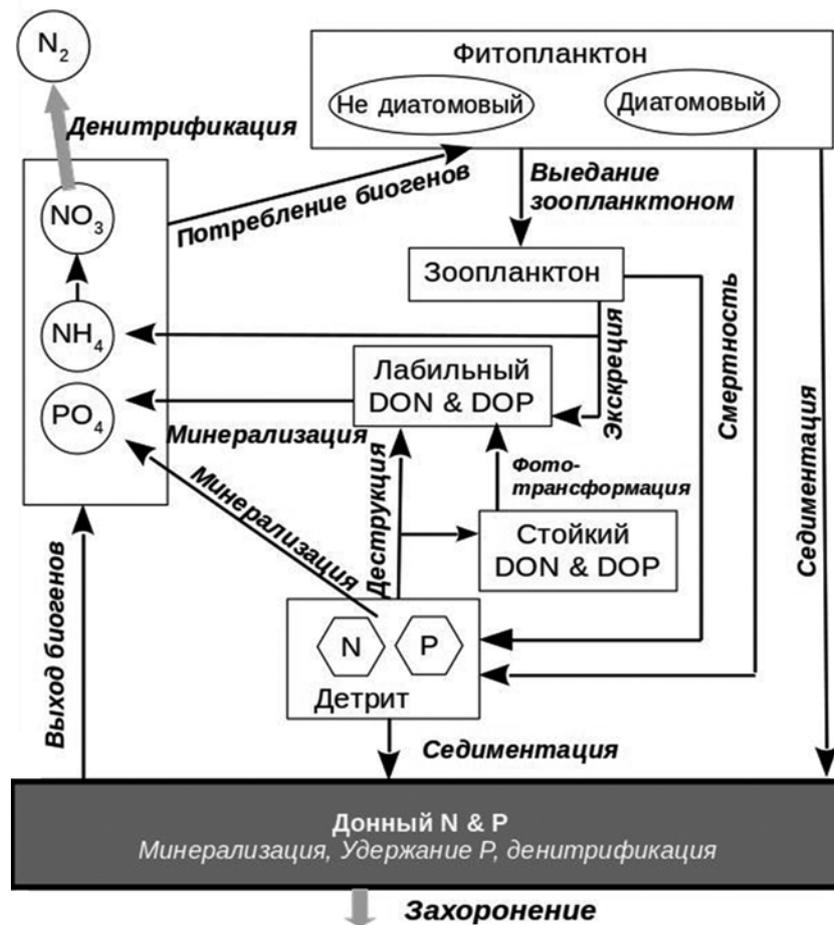


Рис. 2. Биогеохимические переменные и потоки вещества в SPLEM

Fig. 2. Biogeochemical variables and matter fluxes in SPLEM

существенные пространственные градиенты экосистемных характеристик (рис. 3). Из-за этих особенностей решение вышеперечисленных геоинженерных задач невозможно без реалистичного описания комплекса процессов переноса и трансформации вещества в заливах, литоральной зоне, а также водо- и массо-

обмена губ с открытыми водами на основе трехмерной гидродинамической модели. С учетом горизонтальных размеров озера и радиуса деформации Россби, который для Онежского озера составляет 2–3 км, минимально необходимое горизонтальное разрешение сеточной области должно составлять 500–1000 м.

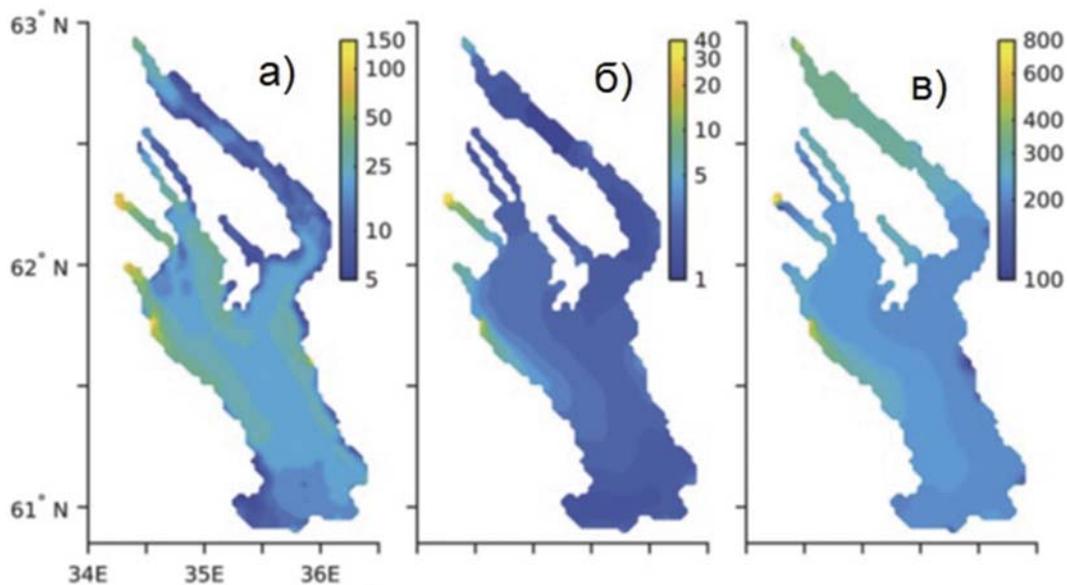


Рис. 3. Полученные в результате биогеохимического реанализа экосистемы Онежского озера и представленные в логарифмическом масштабе средние многолетние (1985–2015 гг.) значения: а) годовой первичной продукции ( $\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), б) зимних (апрель) поверхностных максимумов фосфатов ( $\text{мг Р} \cdot \text{м}^{-3}$ ), в) растворенного неорганического азота DIN ( $\text{мг N} \cdot \text{м}^{-3}$ ) [Isaev et al., 2022]

Fig. 3. The average long-term (1985–2015) values obtained as a result of biogeochemical reanalysis of the Lake Onego ecosystem and presented on a logarithmic scale: a) annual primary production ( $\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ), b) winter (April) surface peaks of phosphates ( $\text{mg P} \cdot \text{m}^{-3}$ ), c) dissolved inorganic nitrogen DIN ( $\text{mg N} \cdot \text{m}^{-3}$ ) [Isaev et al., 2022]

### Модель формирования водного стока и биогенной нагрузки на водосборе

Водный режим озера и содержание в нем биогенных элементов, определяющие состояние экосистемы озера, в значительной мере складываются под воздействием процессов, протекающих в ходе эволюции водосборного бассейна водоема. Поэтому для диагностирования состояния озера и прогнозирования сезонных и многолетних изменений необходимо использовать динамическую модель водосбора, которая позволяла бы правдоподобно оценивать изменения водного стока и биогенной нагрузки при различных сценариях хозяйствен-

ной деятельности и изменениях климата. Для решения этих задач в ИАС будет использована модель Института озероведения РАН [Кондратьев, Шмакова, 2019], на которой рассчитываются различные сценарии поступления в озеро воды и биогенных элементов как с речным стоком основных притоков, так и с береговой линии, минуя речную сеть.

Модель формирования стока с водосбора ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model) предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора. Модель описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регули-

рование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель формирования биогенной нагрузки на водосборе ILLM (Institute of Limnology Load Model) разработана на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенов [Кондратьев и др., 2016]. Система ILHM+ILLM моделей относится к типу детерминированно-стохастических и включает в себя блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели, описывающие сток и вынос примесей

с водосбора (рис. 4). Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы детерминированно-стохастического моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных значений метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и тем более ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора. Модель предназначена для количественной оценки нагрузки общим фосфором и общим азотом, сформированной различными источниками загрязнения, и прогноза изменения нагрузки под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений.



Рис. 4. Схема детерминированно-стохастической моделирующей системы «погода – сток – биогенная нагрузка» [Кондратьев и др., 2016]

Fig. 4. Scheme of the deterministic-stochastic modeling system 'weather – runoff – biogenic load' [Kondrat'ev et al., 2016]

При разработке модели водосбора Онежского озера будут использованы подмодели частных водосборов основных рек – Водлы, Шуи и Суны, рек Заонежья, водосборов малых восточных, южных и западных притоков. Будет выполнен сбор и анализ информации о структуре подстилающей поверхности частных водосборов на основе результатов дешифрирования космических снимков. Планируется получить современные данные о диффузной сельскохозяйственной нагрузке на изучаемые водосборы, формируемой животноводческими фермами, внесением органических и минеральных удобрений, изъятием с выращенным урожаем и т. д. Будут выполнены сценарные расчеты стока с водосбора и поступающей с водосбора биогенной нагрузки, формируемых в результате прогнозируемых климатических и социально-экономических изменений.

#### Информационно-аналитическая система обработки и анализа модельных и натуральных данных

Обобщенный подход к разработке информационно-аналитических систем (ИАС) поддержки принятия управленческих решений предложен Г. А. Угольницким и А. Б. Усовым [2008]. Указывается, что подобная система должна включать в себя блоки, связанные с данными натуральных наблюдений, результатами моделирования, информацией о нормативно-правовой базе по использованию водных ресурсов, а также экспертную подсистему. Для осуществления системного подхода ИАС должна обеспечивать трехстороннее взаимодействие между: а) лицами, принимающими решения, б) экспертами в области естественных и гуманитарных наук и в) специалистами,

обеспечивающими работоспособность моделей и получение данных натуральных измерений. Такое взаимодействие оптимизирует разработку сценариев планируемого использования водных объектов и проведение прогностических расчетов будущего состояния объекта при различных сценариях использования с последующими рекомендациями для управленческих решений.

Одной из основных задач нашего проекта является разработка ИАС, которая может стать подсистемой более полной информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами Онежского озера и его водосбора. Разрабатываемая в виде интерактивного приложения для ПК информационно-аналитическая система включает в себя модуль сбора и обработки данных натуральных наблюдений и подсистему математических моделей.

Функционал данной ИАС должен обеспечивать пространственно-временную визуализацию как непосредственных результатов моделирования и данных натуральных измерений, привязанных к электронной основе Онежского озера, так и продуктов их индивидуального и совместного анализа разного уровня обобщения (статистика, интегрирование, корреляционный анализ и т. п.). Исходя из требуемого функционала, ИАС одновременно должна сочетать в себе два класса информационных подсистем – экспертный, позволяющий проводить анализ первичных данных натуральных измерений и результатов моделирования профильными специалистами, и аналитический, включающий обобщенные на экспертном уровне результаты, представляющие собой набор интегральных карт и таблиц для широкого круга пользователей, включая водопользователей и лиц, принимающих решения.

Организация описанного выше функционала ИАС предусматривает наличие следующих объединенных в единое целое подсистем:

- Высокорастворимая цифровая картографическая основа озера и водосбора.
- База натуральных и спутниковых данных, с инструментами анализа и отображения.
- Результаты моделирования озера и водосбора, с инструментами обработки и отображения результатов.
- Инструменты совместного анализа и отображения результатов моделирования и данных контактных и дистанционных наблюдений.
- Модуль, обеспечивающий запросы внешних пользователей ИАС для прове-

дения расчетов с целью оценки влияния на экосистему планируемых мероприятий по водопользованию.

Важным аспектом в технической (программной) реализации ИАС является выбор и обоснование программного обеспечения и технических средств. Анализ мирового и отечественного опыта в создании ИАС и геоинформационных систем (ГИС) для поддержки проведения мульти- и междисциплинарных научных исследований [Шокин, 2008; Zavala-Romero et al., 2014; Kulawiak et al., 2019] показал, что наиболее оптимальным решением для создания программной оболочки ИАС является веб-приложение (клиент-серверное приложение, где логика и формирование запросов на обработку и анализ информации распределены между сервером и клиентом, а хранение данных осуществляется на сервере). Преимущества веб-приложений перед настольными приложениями очевидны: возможность расширения и масштабирования с другими решениями и внешними системами; не требуется установка на индивидуальных ПК; обновления выполняются без участия пользователя; мгновенный доступ. В качестве инструментов разработки ИАС используются программные продукты с открытым исходным кодом, что позволяет использовать последние наработки мирового уровня в данной области.

## Заключение

1. Разрабатывается информационно-аналитическая система Онежского озера и его водосбора, предназначенная для проведения сценарных расчетов и выработки научных рекомендаций по решению широкого спектра фундаментальных и прикладных проблем функционирования экосистемы Онежского озера в условиях климатических и социо-экономических изменений.

2. Помимо решения исследовательских задач разрабатываемая ИАС послужит как прототипом подобных систем для других больших озер России, так и материальной основой и средством внедрения методологии реального системного исследования водоема.

3. В пригодном для эксплуатации виде ИАС будет состоять из трех взаимодействующих модулей, находящихся сейчас на разных уровнях готовности.

4. Совершенствование имеющейся работоспособной трехмерной модели экосистемы озера SPLEM потребует повышения ее базового горизонтального разрешения до 1000 м с возможностью дальнейшей детализации

и/или модификации формулировок модели, необходимых для решения той или иной конкретной задачи.

5. Имеющиеся модели формирования речного стока с водосбора и поступления речной и диффузной нагрузки биогенными элементами будут использоваться для выработки граничных условий для модели озера в зависимости от выбранных сценариев изменений.

6. Разрабатываемая информационно-аналитическая система обработки и анализа модельных и натурных данных может послужить основой систем поддержки принятия решений.

## Литература

- Беляев В. И. Математическое моделирование экосистем морей и океанов // Итоги науки и техники. Сер. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. М., 1980. Т. 5. С. 105–153.
- Данилов-Данильян В. И., Хранович И. Л. Управление водными ресурсами. М.: Научный мир, 2010. 223 с.
- Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.
- Исаев А. В., Савчук О. П. Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистемы великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 197–208.
- Калинкина Н. М., Филатов Н. Н., Теканова Е. 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. doi: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73
- Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Маркова Е. Г., Лозовик П. А., Брюханов А. Ю., Чичкова Е. Ф. Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования // Известия РГО. 2016. Т. 148, вып. 5. С. 53–64.
- Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Ред. Н. Н. Филатов (отв. ред.), Н. М. Калинкина, Т. П. Куликова, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовик. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
- Меншуткин В. В., Воробьева О. Н. Модель экосистемы Ладожского озера // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, 1987. С. 187–200.
- Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 3. 2014а. С. 100–108.
- Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем // Водные ресурсы. 2014б. Т. 41, № 1. С. 24–38. doi: 10.7868/S0321059614010088
- Никитин В. М., Абасов Н. В., Бычков И. В., Осипчук Е. Н. Уровненный режим озера Байкал: проблемы и противоречия // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 74–83. doi: 10.21782/GIPRO206-1619-2019-4(74-83)
- Румянцев В. А., Филатов Н. Н., Кондратьев С. А. Современное состояние и совершенствование системы мониторинга Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера. 2021. С. 540–558.
- Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полозков 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.
- Угольницкий Г. А., Усов А. Б. Информационно-аналитическая система управления эколого-экономическими объектами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 2. С. 168–176.
- Шокин Ю. И., Добрецов Н. Н., Пестунов И. А., Молородов Ю. И., Смирнов В. В., Синявский Ю. Н. Система сбора, хранения и обработки спутниковых и наземных данных Новосибирского научного центра СО РАН // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Сер. Математика, механика, информатика. № 4(59). С. 371–376.
- Berezina A., Yakushev E., Savchuk O., Vogelsang C., Staalstrom A. Modelling the influence from biota and organic matter on the transport dynamics of microplastics in the water column and bottom sediments in the Oslo Fjord // Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2021. Vol. 13(19). Art. 2690. doi: 10.3390/w13192690
- 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.
- Gloege L., McKinley G. A., Mooney R. J., Allan J. D., Diebel M. W., McIntyre P. B. Lake hydrodynamics intensify the potential impact of watershed pollutants on coastal ecosystem services // Environ. Res. Lett. IOP Publ. 2020. Vol. 15, no. 6. Art. 064028. doi: 10.1088/1748-9326/ab7f62
- Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification // Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. Vol. 12, no. 5. P. 1307. doi: 10.3390/w12051307
- 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. Vol. 15, no. 2. P. 76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg

Jenny J.-Ph., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes // *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 686–702. doi: 10.1016/j.jglr.2020.05.006

Jorgensen S. E. *Fundamentals of ecological modelling*. Elsevier Publ. House, 1994. 450 p.

Kulawiak M., Dawidowicz A., Pacholczyk M. E. Analysis of server-side and client-side Web-GIS data processing methods on the example of JTS and JSTS using open data from OSM and geoportal // *Computers & Geosciences*. 2019. Vol. 129. P. 26–37. doi: 10.1016/j.cageo.2019.04.011

Marshall J., Hill C., Perelman L., Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1997. Vol. 102, no. C3. P. 5733–5752. doi: 10.1029/96JC02776

Mooij W. M., Trolle D., Arhonditsis G. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches // *Aquat. Ecol.* 2010. Vol. 44, no. 3. P. 633–667. doi: 10.1007/s10452-010-9339-3

Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: a review // *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 636. P. 339–354. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.183

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

Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // *J. Marine Syst.* 2002. Vol. 32, no. 4. P. 253–280. doi: 10.1016/S0924-7963(02)00039-8

Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. BALSEM – a marine model for decision support within the Baltic Sea region // Stockholm University. Technical Report 7. 2012.

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. Vol. 15(2). P. 98–109. doi: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8

Scavia D., DePinto J. V., Bertani I. A multi-model approach to evaluating target phosphorus loads for Lake Erie // *J. Great Lakes Res.* 2016. Vol. 42, no. 6. P. 1139–1150. doi: 10.1016/j.jglr.2016.09.007

Soerensen A. L., Schartup A. T., Gustafsson E., Gustafsson B. G., Undeman E., Björn E. Eutrophication increases phytoplankton methylmercury concentrations in a coastal sea – A Baltic Sea case study // *Environ. Sci. Technol.* 2016. Vol. 50. P. 11787–11796. doi: 10.1021/acs.est.6b02717

Straskraba M., Gnauck A. *Freshwater ecosystems. Modelling and simulation* // Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1985.

Undeman E., Gustafsson E., Gustafsson B. G. A novel modeling tool with multi-stressor functionality for organic contaminant transport and fate in the Baltic Sea // *Sci. Tot. Environ.* 2014. Vol. 497-498. P. 382–391.

Vinçon-Leite B., Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review // *Sci. Total Environ.* 2019. No. 651. P. 2985–3001. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.139

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

Zavala-Romero O., Ahmed A., Chassignet E. P., Zavala-Hidalgo J., Eguarte A. F., Meyer-Baese A. An open source Java web application to build self-contained web GIS sites // *Environ. Model. Softw.* 2014. Vol. 62. P. 210–220. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.08.029

## References

Belyaev V. I. Mathematical modeling of ecosystems of seas and oceans. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Obshchaya ekologiya. Biotsenologiya. Gidrobiologiya = Results of Science and Technology. Ser. General Ecology. Biocenology. Hydrobiology*. 1980. Vol. 5. P. 105–153. (In Russ.)

Berezina A., Yakushev E., Savchuk O., Vogelsang C., Staalstrom A. Modelling the influence from biota and organic matter on the transport dynamics of microplastics in the water column and bottom sediments in the Oslo Fjord. *Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2021;13(19):2690. doi: 10.3390/w13192690

Danilov-Danil'yan V. I., Khranovich I. L. *Management of water resources*. Moscow: Nauchnyi mir, 2010. 223 p. (In Russ.)

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.

Filatov N. N. (ed.). *Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. 255 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Kulikova T. P., Litvinenko A. V., Lozovik P. A. The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European part of Russia: The current state and changes in ecosystems under climatic and man-induced impact. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 375 p. (In Russ.)

Gloege L., McKinley G. A., Mooney R. J., Allan J. D., Diebel M. W., McIntyre P. B. Lake hydrodynamics intensify the potential impact of watershed pollutants on coastal ecosystem services. *Environ. Res. Lett. IOP Publ.* 2020;15(6):064028. doi: 10.1088/1748-9326/ab7f62

Isaev A. V., Sachuk O. P. Diagnosis of the state of the Lake Ladoga ecosystem and forecast of changes in case of possible climate change based on mathematical modeling of biogeochemical fluxes of matter. *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistemy velikikh ozer Rossii = Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. P. 197–208. (In Russ.)

Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosys-

- tem, 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
- Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification. *Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020;12(5):1307. doi: 10.3390/w12051307
- Jenny J.-Ph., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. *J. Great Lakes Res.* 2020;46(4):686–702. doi: 10.1016/j.jglr.2020.05.006
- Jorgensen S. E. Fundamentals of ecological modeling. Elsevier Publ. House; 1994. 450 p.
- Kalinkina N. M., Filatov N. N., Tekanova E. V., Balaganskii A. F. Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Lake Onego with Shuya River under climate change conditions. *Regional'naya ekologiya – Regional Ecology*. 2018;2(52):7–15. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V., Markova E. G., Lozovik N. A., Bryukhanov A. Yu., Chichkova E. F. Biogenic load on Lake Onega from scattered sources based on the results of mathematical modeling. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva – The RGS Herald*. 2016;148(5):53–64. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment - watercourse - reservoir system. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2019. 248 p. (In Russ.)
- Kulawiak M., Dawidowicz A., Pacholczyk M. E. Analysis of server-side and client-side Web-GIS data processing methods on the example of JTS and JSTS using open data from OSM and geoportal. *Computers & Geosciences*. 2019;129:26–37. doi: 10.1016/j.cageo.2019.04.011
- Marshall J., Hill C., Perelman L., Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1997;102(C3):5733–5752. doi: 10.1029/96JC02776
- Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: A review. *Sci. Total Environ.* 2018;636:339–354. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.183
- Menshutkin V. V., Vorob'eva O. N. A model of the Lake Ladoga ecosystem. *Sovremennoe sostoyanie ekosistemy Ladozhskogo ozera – Current state of the Lake Ladoga ecosystem*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 187–200. (In Russ.)
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Mathematical models of aquatic ecosystems in lakes resources management. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie – Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2014a; 3:100–108. (In Russ.)
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Modeling of ecosystems of freshwater lakes (a review) 2. Models of ecosystems. *Vodnye resursy – Water Resources*. 2014b;41(1):24–38. (In Russ.)
- Mooij W. M., Trolle D., Arhonditsis G. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquat. Ecol.* 2010;44(3):633–667. doi: 10.1007/s10452-010-9339-3
- Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. URL: <https://nest.su.se/nest> (accessed: 19.08.2022).
- Nikitin V. M., Abasov N. V., Bychkov I. V., Osipchuk E. N. Level regime of Lake Baikal: Problems and contradictions. *Geografiya i prirodnye resursy – Geography and Natural Resources*. 2019;4:74–83. (In Russ.)
- 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
- Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Polozkov V. N., Petrova T. N., Susareva O. M. Study of the Lake Ladoga ecosystem response to a decrease in phosphorus load. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2011. Vol. 38(6). P. 740–752. (In Russ.)
- Rumyantsev V. A., Filatov N. N., Kondrat'ev S. A. Current state and improvement of the monitoring system of Lake Ladoga. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera – Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga*. 2021. P. 540–558. (In Russ.)
- Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. *J. Marine Syst.* 2002;32(4):253–280. doi: 10.1016/S0924-7963(02)00039-8
- Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. BALTSEM – a marine model for decision support within the Baltic Sea region. *Stockholm University. Technical Report 7*. 2012.
- 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
- Scavia D., DePinto J. V., Bertani I. A multi-model approach to evaluating target phosphorus loads for Lake Erie. *J. Great Lakes Res.* 2016;42(6):1139–1150. doi: 10.1016/j.jglr.2016.09.007
- Shokin Yu. I., Dobretsov N. N., Pestunov I. A., Molorodov Yu. I., Smirnov V. V., Sinyavskii Yu. N. System for collecting, storing and processing satellite and terrestrial data of the Novosibirsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*. Vol. 13. Series Mathematics, mechanics, computer science. 2008;4(59):371–376. (In Russ.)
- Soerensen A. L., Schartup A. T., Gustafsson E., Gustafsson B. G., Undeman E., Björn E. Eutrophication increases phytoplankton methylmercury concentrations in a coastal sea – A Baltic Sea case study. *Environ. Sci. Technol.* 2016;50:11787–11796. doi: 10.1021/acs.est.6b02717
- Straskraba M., Gnauck A. Freshwater ecosystems. Modelling and simulation. Elsevier Science Publishers, Amsterdam; 1985.
- Ugol'nitskii G. A., Usov A. B. Information-analytical system for management of ecological and economic objects. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*

= *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008;2:168–176. (In Russ.)

Undeman E., Gustafsson E., Gustafsson B. G. A novel modeling tool with multi-stressor functionality for organic contaminant transport and fate in the Baltic Sea. *Sci. Tot. Environ.* 2014;497-498:382–391.

Vinçon-Leite B., Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Sci. Total Environ.* 2019;651:2985–3001. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.139

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

Zavala-Romero O., Ahmed A., Chassignet E. P., Zavala-Hidalgo J., Eguiarte A. F., Meyer-Baese A. An open source Java web application to build self-contained web GIS sites. *Environ. Model. Softw.* 2014;62:210–220. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.08.029

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 22.09.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор,  
главный научный сотрудник, советник генерального  
директора КарНЦ РАН

e-mail: nfilatov@rambler.ru

### Баклагин Вячеслав Николаевич

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

e-mail: slava.baklagin@mail.ru

### Исаев Алексей Владимирович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: isaev1975@gmail.com

### Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник

e-mail: kondratyev@limno.org.ru

### Савчук Олег Павлович

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: olegstobni@gmail.com

## CONTRIBUTORS:

### Filatov, Nikolai

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,  
Chief Researcher, Advisor to KarRC RAS Director General

### Baklagin, Vyacheslav

Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher

### Isaev, Alexey

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

### Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher

### Savchuk, Oleg

Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher