

УДК 556.55.072

doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647

Моделирование в озераведении. Опыт ИНОЗ РАН***С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, С.Д. Голосов,
И.С. Зверев, К.Д. Коробченкова***

Институт озераведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, 3718470@gmail.com

Лабораторное моделирование в ИНОЗ РАН представлено гидродинамическим лабораторным комплексом для исследования процессов турбулентного вовлечения в озерах. Стохастическое моделирование проводится в направлениях совершенствования методов идентификации моделей, разработки моделей стационарных случайных процессов и их совокупности, нестационарных случайных процессов, а также стохастических моделей динамических систем. Детерминированные модели используются для описания процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем». Сформирована и успешно используется при решении практических задач детерминированно-стохастическая модельная система. Разработанные и апробированные модели открывают широкие возможности для совершенствования прогностической части государственного мониторинга крупных озер.

Ключевые слова: озераведение, лабораторная модель, математическая модель, модельная система, мониторинг.

Modeling in Limnology. Experience of IL RAS***S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova, S.D. Golosov,
I.S. Zverev, K.D. Korobchenkova***

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences — a separate structural unit of the Federal State Budgetary Institution of Science “St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences”, St. Petersburg, Russia, 3718470@gmail.com

Modeling is an effective means of expanding the capabilities of limnology, which is a formalized representation of the available knowledge about the processes and systems being studied in various ways. Laboratory or physical modeling at the Institute of Limnology was presented by the hydrodynamic laboratory complex “Aerohydrochannel” to study turbulent entrainment processes in lakes. Mathematical models can be divided into probabilistic-statistical (stochastic) and deterministic. At the Institute stochastic modeling was carried out to improve methods for identifying models, developing models of stationary random processes and their totality, non-stationary random processes, and stochastic models of dynamic systems. Deterministic models were used to describe heat and mass transfer processes in the “catchment-watercourse-reservoir” system. Currently, a deterministic-stochastic model system has been formed and is successfully used, which includes the following components: a model of formation of runoff in a catchment, a model of removal of chemicals from a catchment and formation of a load on a reservoir, model (1D, 2D, 3D) of water movement, transport of sediments and dissolved impurities in an open channel, 1D model of thermal regime and mixing in a reservoir, 1D model of dynamics of non-conservative impurities in a reservoir, 2D model of currents and sediment transport in a shallow reservoir, 3D model of heat and mass

transfer in a reservoir, which is a model of the hydrodynamics of the inland sea, adapted to the conditions of a lake; and a stochastic weather model. The article gives the examples of using the developed models for solving the problems of assessing the state of such large water bodies as Ladoga and Chudsko-Pskovskoye lakes, Kuibyshev reservoir, as well as for predicting their possible changes under the influence of economic activity and climatic influences. The results of implementation of international projects using the created model system are presented. The developed and tested models offer wide opportunities for improving the predictive part of the state monitoring of large lakes and reservoirs.

Keywords: limnology, laboratory model, mathematical model, model system, monitoring.

For citation: *S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova, S.D. Golosov, I.S. Zverev, K.D. Korobchenkova.* Modeling in Limnology. Experience of IL RAS. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 607—647. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647

Введение

Озероведение (лимнология) — раздел гидрологии суши, изучающий континентальные водоемы — озера, водохранилища, пруды и весь комплекс протекающих в них взаимосвязанных процессов. При исследовании водоемов озероведение использует методы гидрологии, гидрографии, гидрофизики, гидрохимии, гидробиологии, геоботаники, метеорологии, геоморфологии, математики, информатики, моделирования и др. 16 декабря 1943 г. решением Президиума АН СССР в г. Ленинграде была создана Лаборатория озероведения, преобразованная в 1971 г. в Институт озероведения АН СССР. В 1991 г. Институт перешел в подчинение РАН, а в 2020 г. стал обособленным подразделением Санкт-Петербургского Федерального Исследовательского Центра РАН (ИНОЗ РАН СПб ФИЦ РАН).

Основными методами исследований, издавна используемыми в озероведении, являются полевые исследования и натурный эксперимент. Однако организация полевых экспериментальных работ на водоемах и их водосборных бассейнах обычно требует больших затрат времени и средств. Как показывает многолетняя практика, если натурные эксперименты не были подкреплены теоретическими положениями, то полученные на их основе выводы оказываются малоубедительными, нередко противоречивыми и плохо поддаются обобщению как во времени, так и в пространстве. Эффективным средством расширения возможностей озероведения является моделирование, представляющее собой формализованное представление имеющихся знаний об изучаемых процессах и системах различными способами. Использование моделей позволяет осуществить выход за пределы натурального эксперимента, во много раз сократить сроки и стоимость исследований, число занятых специалистов, повысить обоснованность принимаемых решений.

Целью настоящей публикации является обзор и анализ развития методов математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем» в Институте озероведения Российской академии наук.

Основные направления исследований ИНОЗ РАН в области моделирования и история их развития

Если воспроизведение какого-то процесса или системы происходит в лабораторных условиях, то модель принято называть физической или лабораторной.

Если формализация изучаемого процесса проводится в виде математических выражений, то модель является математической. Институт озераедения имеет опыт создания моделей обоих перечисленных выше типов.

Лабораторное моделирование было представлено гидродинамическим лабораторным комплексом для исследования процессов турбулентного вовлечения в озерах «Аэрогидроканал». На лимнологической станции института в конце 80-х — начале 90-х годов прошлого века сконструирована и изготовлена уникальная измерительная система, предназначенная для исследования широкого спектра гидротермодинамических процессов в водной среде. Экспериментальный комплекс позволял исследовать процессы взаимодействия атмосферы и водной подстилающей поверхности, формирования верхнего перемешанного слоя, а также процессы турбулентного вовлечения в стратифицированной водной среде. «Аэрогидроканал» представлял собой гидравлический лоток длиной более 20 м, состоящий из чередующихся прямолинейных и криволинейных участков, снабженных направляющими пластинами и сотовыми выпрямителями воздушного потока (рис. 1).

Система имеет специальные нагреватели воздушного потока, позволяющие воспроизводить различные термодинамические условия на границе раздела вода—воздух. Главная отличительная особенность «Аэрогидроканала», по сравнению с аналогичными отечественными и зарубежными установками, состояла в том, что его конструкция позволяла подавить возникающие в замкнутых каналах паразитарные вторичные циркуляции водной массы. Уникальность «Аэрогидроканала» подтверждена авторским свидетельством (рис. 2). Результаты

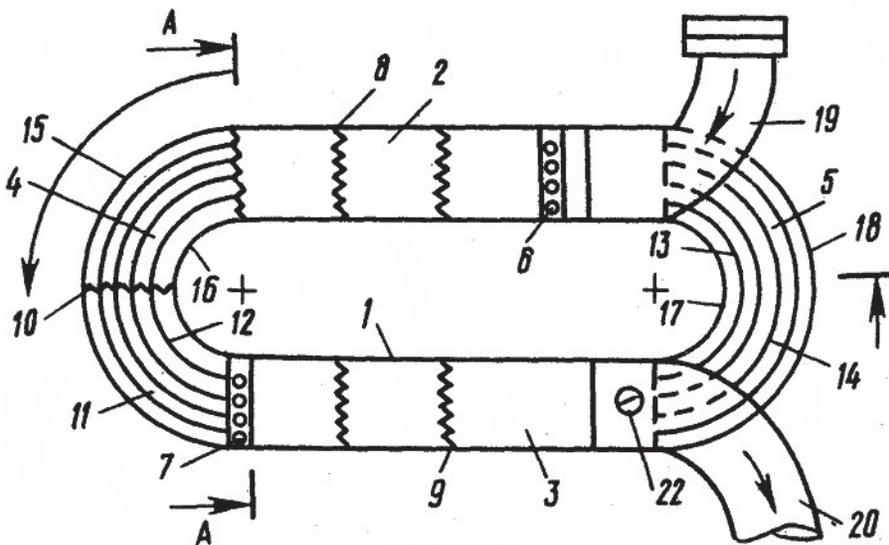


Рис. 1. Схематичное изображение установки «Аэрогидроканал».

Fig. 1. Schematic representation of the installation "Aerohydrochannel".



Рис. 2. Авторское свидетельство на установку «Аэрогидроканал».

Fig. 2. Copyright certificate for installation "Aerohydrochannel".

экспериментов на установке опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных изданиях [1, 2].

Одной из основных задач математического моделирования является проведение вычислительного эксперимента с целью «изучения, прогнозирования, оптимизации сложных многопараметрических нелинейных процессов, теоретическое и экспериментальное исследование которых традиционными методами затруднено или невозможно» [3]. По характеру исходных данных и результатов предсказания математические модели, в свою очередь, могут быть разделены на вероятностно-статистические (стохастические) и детерминистические.

Вероятностно-статистические (стохастические) модели основаны на статистической информации, а предсказания, полученные с их помощью, имеют вероятностный характер. Многофакторность, полицикличность, непредсказуемость изменчивости гидрометеорологических процессов приводят к необходимости рассматривать их как случайные функции временных и пространственных координат и описывать их свойства в терминах вероятностных характеристик.

На начальном этапе основное направление исследований состояло в раскрытии временных и пространственных особенностей колебаний гидрологических характеристик и выявлении их связи с характеристиками физико-географического ландшафта. На основе установленных закономерностей проведено совершенствование инженерных методов расчета стока. Были решены следующие задачи: исследована временная статистическая структура межгодовых колебаний годового речного стока, показана связь годового стока с характеристиками физико-географического ландшафта, предложены параметрические модели случайных процессов для описания и долгосрочного прогноза годового стока, создана методика расчета временных характеристик группировок годового стока, и на ее основе раскрыты закономерности пространственного распределения характеристик группировок по территории Евразии и дана им физико-географическая интерпретация. Это направление исследований в основном представлено в работе [4]. Дальнейшее развитие методов стохастического моделирования проходило по следующим направлениям.

Совершенствование методов идентификации стохастических моделей. Процедура стохастического моделирования подразумевает подготовительный этап, на котором по реализациям исследуемых процессов рассчитываются оценки вероятностных характеристик, необходимые для построения модели. Поэтому наряду с использованием стандартных процедур оценивания вероятностных характеристик в ИНОЗ РАН разрабатываются и совершенствуются алгоритмы их расчета, которые в наибольшей степени отражают специфику исследуемых процессов. К таким разработкам относятся следующие процедуры, необходимые для идентификации модели: алгоритм оценивания параметрического спектра по перепределенной системе уравнений Юла-Уокера; метод параметрического оценивания взаимных спектров; метод учета в спектре нечетной составляющей процесса; методическое обоснование наличия 2—3-летних и 29—30-летних циклов межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов [5]; методика оценивания параметров модели совокупности рядов наблюдений по методу наименьших квадратов [6].

Разработка моделей стационарных случайных процессов. За основу стационарного приближения природных процессов приняты линейные и нелинейные модели случайных процессов, позволяющие воспроизводить модельные реализации процессов с нормальным, экспоненциальным, устойчивым законами распределения их ординат. Эти модели широко известны, просто реализуются, имеют хорошо развитое алгоритмическое и программное обеспечение. Для учета характерных особенностей временных рядов гидрологических процессов предложены конкретные виды преобразования, сводящие функции распределения анализируемых реализаций к стандартным распределениям модельных процессов. Такое преобразование позволяет воспроизводить модельные реализации с произвольным законом распределения ординат и открывает широкие возможности решения научных и прикладных водохозяйственных задач. В работе [4] на основе такого подхода разработан аппарат теории случайных выбросов, позволяющий получать такие важные в народнохозяйственной практике характеристики, как величина

и длительность выбросов, среднее число выбросов за фиксированный уровень, интервалы между последовательностями выбросов и т.д., и были решены следующие задачи: исследована временная структура межгодовых колебаний годового речного стока рек, показана связь годового стока с характеристиками физико-географического ландшафта, создана методика расчета временных характеристик группировок годового стока рек, и на ее основе раскрыты закономерности пространственного распределения характеристик группировок по территориям Европы и Азии.

Разработка моделей совокупности стационарных случайных процессов. Большинство природных процессов обладают годовой ритмикой. Стохастической моделью годовой ритмики является модель периодически коррелированных случайных процессов. В соответствии с этой методикой ряды среднемесячных значений исследуемых процессов представляются в виде 12-мерного вектора, состоящего из 12-мерных годовых последовательностей каждого месяца. Такое представление заменяет периодически нестационарный процесс эквивалентным ему 12-мерным вектором из стационарных и стационарно связанных случайных процессов. Указанный подход применен для создания «Стохастической модели годового хода и межгодовой изменчивости водной системы уровень Ладоги — сток реки Невы». Модель использована для изучения функционирования водной системы в современном климате и для оценки ее реакции на различные варианты изменения климата. Монография [6] ориентирована на совершенствование методов и точности расчета характеристик речного стока и обеспечения запросов практики водохозяйственного водопотребления и гидрологического строительства по характеристикам водного режима рек, которые не освещены данными наблюдений. Подходящее решение этой проблемы состоит в построении региональных оценок функции обеспеченности гидрологических параметров по группе рек, обладающих определенной общностью гидрологического режима. В этой работе предложена процедура учета корреляционных связей совокупности рядов наблюдений, позволяющая повысить точность оцениваемых параметров.

Разработка моделей нестационарных случайных процессов. В работах ИНОЗ РАН рассмотрены приемы учета различных видов нестационарности гидрологических процессов (таких как нестационарность по математическому ожиданию, дисперсии, корреляционной функции, спектру). Для детализации общего фона межгодовой изменчивости годового стока рек целесообразно обратиться к временным рядам большой продолжительности. При этом ряды могут охватывать несколько климатических периодов. Для адекватного отражения такой нестационарности предложено использовать модели процессов дробного шума. Колебания уровня воды бессточного водоема — это пример природной нестационарности, когда длительные серии высокого или низкого стояния уровня водоема обусловлены случайными отклонениями составляющих водного баланса от их средних значений. Поэтому для изучения свойств межгодовой изменчивости уровня бессточных водоемов использованы модели процессов со стационарными приращениями. Применение этих моделей для изучения механизма формирования долгопериодных колебаний уровня Каспийского моря объяснило, почему даже

в стационарном климате уровень Каспия не имеет фиксированного среднего значения. Учет в моделях всех особенностей нестационарности позволяет адекватно отражать природу и механизмы функционирования гидрологических процессов. Выполненные по таким моделям расчеты обладают большой достоверностью и являются надежным пособием при планировании и рациональном управлении водными ресурсами [5].

Разработка стохастических моделей динамических систем. В работах ИНОЗ РАН представлены стохастические модели динамических систем с различными числами входов и выходов. Модели динамических систем с одним входом и одним выходом предназначены для оценки вклада каждой климатической составляющей на формирование изменчивости исследуемого гидрологического процесса. Модели динамических систем с несколькими входами и одним выходом необходимы для изучения формирования изменчивости гидрологического процесса под воздействием совокупности режимобразующих факторов. В общем виде решение задачи по изучению закономерностей реакции водных объектов на внешнее воздействие сводится к рассмотрению динамической системы с совокупностью воздействующих показателей на входе и совокупностью гидрологических характеристик на выходе системы. Разработанные модели применяются для изучения закономерностей функционирования водных объектов в современном климате и для оценки их реакции на изменение климата и антропогенной нагрузки [5, 7].

Детерминистические модели активно начали развиваться в Институте озероведения РАН с середины 1980-х гг. В 1986 г. была разработана одномерная нестационарная модель термического режима и условий перемешивания в озере, названная «ИНОЗ», которая применена для составления прогноза возможных изменений гидротермодинамического режима оз. Севан, вызванных планируемым искусственным подъемом уровня [8, 9]. В дальнейшем модель многократно усовершенствовалась и уже под названием **ТЕМIX** широко применялась для описания годового цикла термического режима разнотипных озер, расположенных в различных географических зонах умеренных широт северного полушария [10]. Модель относилась к классу одномерных нестационарных гидротермодинамических моделей и была основана на параметризации вертикального распределения температуры в водной толще и донных отложениях. В ней рассчитывались толщина верхнего перемешанного слоя водоема, потоки тепла, влажности и количества движения через свободную поверхность озера, вертикальный профиль температуры в системе вода — донные отложения, а также формирование и таяние ледяного покрова. Модель была успешно применена для описания термического режима центральной части Ладожского озера, где глубины не превышают 50 м.

Развитием модели **ТЕМIX** стала одномерная нестационарная модель озерной экосистемы [11]. Основной задачей, для решения которой создавалась модель, была оценка отклика водоема на изменения внешней и внутренней фосфорной нагрузки. Модель позволяла исследовать как отклик экосистемы озера или его части на естественный приток фосфора с водосбора, так и оценивать последствия аварийных сбросов сточных вод из коллекторов промышленных предприятий. С использованием модели были оценены последствия загрязнения Волховской

губы Ладожского озера соединениями фосфора во время аварии на Сясьском ЦБК зимой 1998—1999 гг. Результаты расчетов показали, что поступление аварийного сброса из коллектора ЦБК в водную массу и донные отложения Волховской губы с весенним паводком уже в первые летние месяцы могло бы привести к резкому ухудшению экологической обстановки в южной части Ладоги. В этом случае южная часть озера могла бы превратиться в непригодную для рекреационных целей акваторию.

В дальнейшем модель была преобразована в универсальную математическую модель гидротермодинамики озера **FLake** (Fresh-water Lake) [12]. В модели реализованы собственные результаты Института, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время модель служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды [12].

На основе модели FLake создана моделирующая система **FLakeEco** [13], с использованием которой смоделирована многолетняя динамика термического и кислородного режимов двух разнотипных озер — Мюггелзее (полимиктическое) и Хайлигензее (димиктическое), расположенных в черте г. Берлина и дан прогноз ухудшения экологического состояния этих озер на период до 2100 г. под воздействием возможных изменений регионального климата. В соответствии с результатами расчетов в обоих озерах могут резко измениться термический режим и условия перемешивания, что приведет к резкому ухудшению кислородного режима.

Несмотря на очевидные достоинства одномерных моделей (простота реализации, ясный физический смысл, лежащий в основе уравнений и др.), исследования экологического состояния Ладожского озера требовали разработки более сложной гидротермодинамической модели, которая могла бы воспроизводить термический режим и структуру течений в различных по морфометрическим параметрам районах озера. Первая версия такой модели была создана и протестирована в 1988 г. по инициативе и под руководством работавшего в Институте Л.А. Оганесяна — выдающегося специалиста по численному анализу, одного из создателей всемирно признанного метода конечных элементов. Трехмерная нестационарная модель, разработанная на основе полных уравнений термогидродинамики [14], описывает такие явления, как образование и таяние льда, динамику термического бара, формирование термоклина весной и его разрушение осенью. На основе этой модели создана трехмерная нестационарная модель экосистемы Ладожского озера [15—17]. Недостатком указанных моделей является то, что в них отсутствует учет непосредственного воздействия атмосферы на озеро. Последнее существенно ограничивает применимость моделей при решении задач

о влиянии изменчивости регионального климата на гидротермодинамику озер и их экологическое состояние. Для преодоления возникшей проблемы к озерным условиям была адаптирована математическая модель гидродинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН [18]. Выбор модели был обусловлен тем, что гидротермодинамические процессы в Ладожском озере отличаются многообразием и сложностью и по этим показателям озеро можно рассматривать, скорее, как пресноводное внутреннее море, чем озеро. Вторым, решающим аргументом послужило то, что данная модель прошла успешную апробацию при моделировании гидротермодинамики Каспийского моря, являющегося характерным представителем класса внутренних морей.

Особое внимание в исследованиях Института озераведения уделялось оценке состояния Невской губы, которая после строительства Комплекса защитных сооружений СПб от наводнений (КЗС) фактически стала пресноводным водоемом, находящимся в черте города. Качество воды Невской губы определяется, главным образом, поступлением химических веществ со стоком Невы и сбросами городских очистных сооружений. В 1989—1991 г. научный коллектив сотрудников ИНОЗ РАН под руководством канд. техн. наук С.В. Грибина выполнил уникальные комплексные исследования по изучению и моделированию распространения шлейфов сточных вод Северной станции аэрации сточных вод в Невской губе [19—21]. Работа включала как экспериментальные исследования на северной части акватории Невской губы, так и лабораторное и математическое моделирование. Целью исследований являлось экспериментальное и модельное изучение шлейфа сточных вод от выпусков Северной станции аэрации (ССА) Санкт-Петербурга в Невской губе. В ходе выполнения математического моделирования показано, что водовыпуск ССА работает в режиме эжекторного насоса, который засасывает в себя и пропускает через створ шириной 200—250 м значительные объемы (140 м³/с) воды с акватории Невской губы. Это, в свою очередь, приводит к понижению водообмена вдоль побережья, образованию водоворотных структур и застойных зон как выше, так и ниже по течению. Из сказанного следует, что обвинения в адрес КЗС по поводу образования застойных зон в Невской губе не всегда соответствуют действительности.

Более общую картину распространения шлейфов сточных вод в Невской губе иллюстрируют результаты моделирования, выполненного совместно с СПб Филиалом Института океанологии РАН с использованием трехмерной гидродинамической модели [22]. По результатам моделирования сделаны следующие выводы:

— наиболее загрязненным является район у устья Невы между о. Белый и северной дамбой морского канала. Превышение прибрежных концентраций общего фосфора над фоновыми значениями здесь будет иметь место при любом ветре, за исключением южного, который способствует очищению южной части рассматриваемого района у северной дамбы морского канала. Дамба является препятствием, ограничивающим проникновение шлейфов сточных вод ЦСА к южному побережью Финского залива;

— у южного побережья Невской губы наихудшая ситуация отмечается летом при западном ветре, который приводит к возникновению пятна повышенной

концентрации в юго-восточной части Невской губы. При этом юго-восточный район акватории оказывается практически свободным от загрязнения сточными водами. Исключением являются нагонные ситуации;

— мелководная акватория у северного побережья Невской губы подвержена загрязнению сбросов ССА. Здесь неблагоприятные ситуации возникают при западном и северном ветрах;

— у северного и восточного побережий о. Котлин зоны повышенной концентрации общего фосфора наблюдаются летом при восточном и южном ветрах, а также в зимнее время. Южное побережье острова загрязнено несколько меньше;

— манипулирование затворами водопропускных сооружений КЗС позволяет изменять концентрацию примесей в окрестности дамбы. При этом качество воды может быть улучшено (т. е. достигнуто уменьшение концентрации вредных примесей) у северного побережья Невской губы и у северного побережья о. Котлин. Добиться значительного улучшения качества воды у южного побережья Невской губы, таким образом, вряд ли возможно.

С помощью методов математического моделирования выполнено исследование формирования аварийных (ливневых) сбросов части неочищенных сточных вод основными очистными сооружениями города при выпадении интенсивных осадков, а также оценка траекторий их последующего движения по акватории Невской губы [23]. Полученные результаты показали, что ливневые сбросы сильно увеличивают концентрации примесей в окрестности водовыпусков очистных сооружений и приводят к образованию пятен повышенной концентрации, распространяющихся по акватории Невской губы (рис. 3). Характерное время существования повышенных концентраций в окрестности водовыпусков составляет от 10 ч до 1,5 сут. Пятна повышенной концентрации, двигающиеся по акватории губы под воздействием гидрометеорологических факторов, могут существовать дольше (до нескольких суток).

Методы трехмерного гидродинамического моделирования использовались также и при оценке перспективной оптимизации расположения водовыпусков муниципальных очистных сооружений ГУП «Водоканал СПб» на акватории Невской губы [24—25]. Критерием оптимального расположения выпусков в Невской губе определены локализация загрязнений в непосредственной окрестности выпусков и скорость их последующего разбавления вдали от берегов вне застойных зон. Численные эксперименты по выбору оптимального размещения водовыпусков юго-западных очистных сооружений (ЮЗОС) позволили определить наилучший вариант их расположения вблизи Морского канала, что и было реализовано на практике. Существующая гидродинамическая ситуация в этой части Невской губы в большинстве случаев приводит к тому, что сточные воды ЮЗОС распространяются в шлейфе стоков Центральной станции аэрации (ЦСА) вдали от берега и подвержены дополнительному перемешиванию в зоне морского канала проходящими судами. Кроме того, показано, что манипулирование затворами водопропускных сооружений КЗС позволяет изменять концентрацию примесей в окрестности дамбы. При этом качество воды может быть улучшено у северного побережья Невской губы и у северного побережья о. Котлин. Добиться значительного

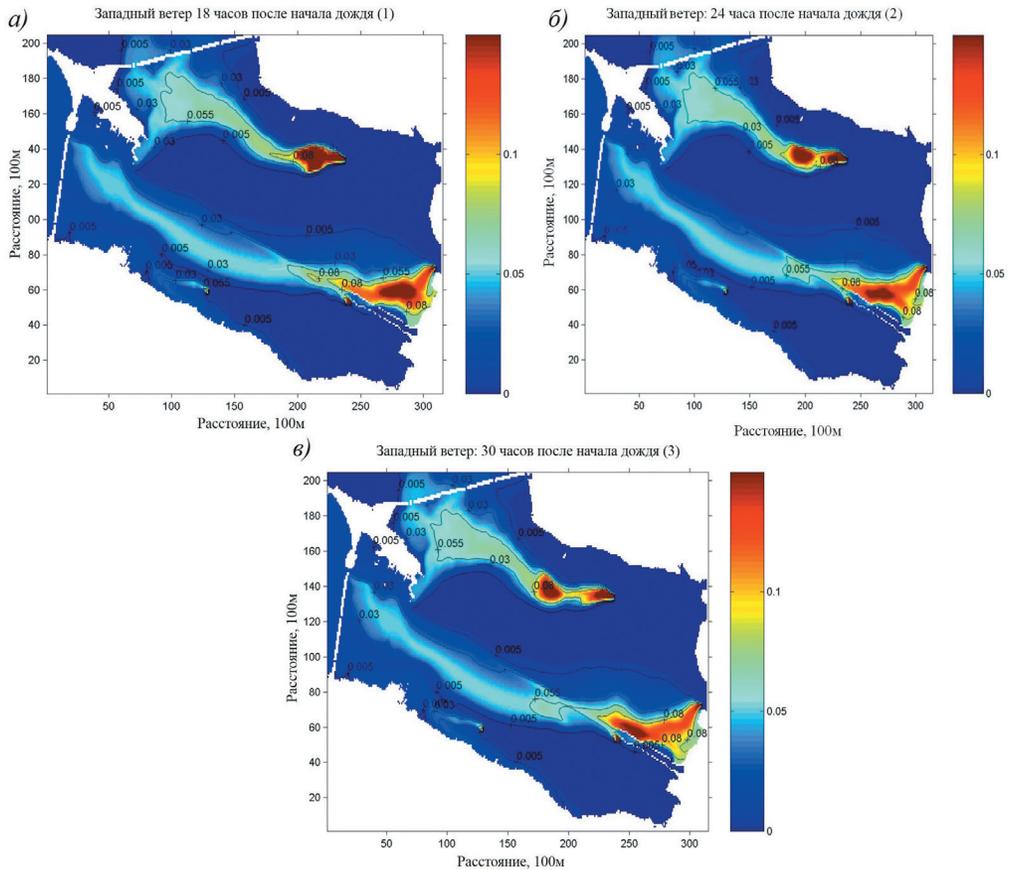


Рис. 3. Распределение поверхностной концентрации общего фосфора $P_{\text{общ}}$ (мг/л) в Невской губе через 18 (а), 24 (б) и 30 (в) ч после начала выпадения осадков.

Летний стоково-ветровой режим при расходе Невы $2540 \text{ м}^3/\text{с}$ и западном ветре $3,5 \text{ м/с}$.

Fig. 3. Distribution of surface concentration of total phosphorus $P_{t_{\text{от}}}$ (mg/l) in the Neva Bay 18 (a), 24 (б), and 30 (в) hours after the onset of precipitation.

Summer runoff-wind regime at a discharge of the Neva of $2540 \text{ м}^3/\text{с}$ and a westerly wind of $3,5 \text{ м/с}$.

улучшения качества воды у южного побережья Невской губы, манипулируя затворами водопропускных сооружений КЗС, по-видимому, не удастся.

С конца 80-х годов в Институте озераедения РАН получило развитие математическое моделирование процессов формирования стока, выноса с водосбора биогенных веществ, формирования внешней нагрузки на водные объекты [9, 26—28]. В большинстве случаев создание такого рода моделей завершалось их практическим внедрением и подготовкой соответствующих рекомендаций [29—30]. Разработанные модели, получившие название **ILHM** (Institute of Limnology Hydrological Model) и **ILLM** (Institute of Limnology Load Model), прошли верификацию

на ряде водосборов рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка, Шуя, Водла и др. [31—33]. По результатам выполнения проекта ЕС BaltHazAR II [34] сделан вывод, что «... модель ILLM может использоваться для расчета биогенной нагрузки на Балтийское море для неконтролируемых и частично контролируемых водосборов в Российской части водосборного бассейна». В выводах Российско-шведского проекта RusNIP II [35] говорится, что «модель ILLM наиболее удобна для использования в относительно крупных водосборах».

Одной из основных проблем, ограничивающих возможности использования моделей стока и выноса биогенных элементов и снижающих достоверность расчетов, является недостаток данных натуральных наблюдений. Решение найдено в виде стохастического генератора метеоэлементов **SWM**, обеспечивающего детерминированные модели продолжительными рядами значений осадков, температуры воздуха и др. [36].

Перспективным направлением исследований в области моделирования биогенной нагрузки на водные объекты является создание расчетных методов, ориентированных на использование данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности. Примером может служить метод приближенной оценки биогенной нагрузки на озера и их трофического статуса по данным о структуре водосбора, полученным с помощью аэрофотосъемки [37]. Безусловным достоинством таких моделей являются оперативность получения информации и возможность описания пространственной неоднородности характеристик подстилающей поверхности и акваторий. В 2015 г. данные космической съемки поверхности водосборов Финского залива и Онежского озера успешно использовались при моделировании биогенной нагрузки на указанные водоемы в рамках проектов ИНОЗ РАН «*Научно-обоснованные предложения по восстановлению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России и определение соответствия нагрузки требованиям Копенгагенской Министерской Декларации ХЕЛКОМ (2013)*» и «*Оценка диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро и разработка научно-обоснованных предложений по ее снижению*», выполненных в рамках Федеральной целевой программы «*Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012—2020 годах*».

С середины 90-х годов значительное внимание специалистов в области математического моделирования уделяется разработке и совершенствованию гидродинамического подхода к описанию течения и переноса примеси в речных руслах. Основным объектом изучения являлась р. Нева, связывающая Ладожское озеро и Невскую губу Финского залива. В практике Института использовались следующие математические модели, позволяющие решать разнообразные задачи, связанные с течениями и переносом примесей в р. Неве:

— *одномерная модель* (уравнения Сен-Венана), описывающая неустановившееся течение и перенос примеси в русле при условии осреднения характеристик потока по площади живого сечения [38], а также позволяющая проводить расчеты в разветвленной речной системе с учетом воздействия нагонных явлений;

— *двухмерная и трехмерная модели*, описывающие неустановившееся течение в русле реки, перенос растворимой примеси и взвешенных частиц и предна-

значенные для детального описания распространения загрязненных вод в русловом потоке, в том числе и в окрестностях водозаборов [39].

Современное состояние моделирования в ИНОЗ РАН

Таким образом, в результате многолетних исследований в области моделирования сформирована и успешно используется детерминированно-стохастическая модельная система ИНОЗ РАН, ориентированная на количественную оценку процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем», а также на прогнозирование последствий воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений. Компоненты системы могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее практического применения. На сегодняшний день в состав модельной системы входят следующие компоненты [40]:

- модель формирования стока на водосборе **ILHM** (27, 28, 31, 41, 42);
- модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект **ILLM** [31, 32, 43—45];
- математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D) [31, 46];
- 1D модель теплового режима и перемешивания водоема **FLake** [48—52];
- 1D модель динамики неконсервативной примеси в водоеме **FLakeEco** [53];
- 2D модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме [31, 54];
- 3D модель тепло и массопереноса в водоеме — **МГВМ**, адаптированная к озерным условиям [18, 55, 56];
- стохастическая модель погоды **SWM** [31, 57].

Ниже представлены примеры использования различных компонентов разработанной модельной системы при решении задач, связанных с количественной оценкой и прогнозом тепло и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем».

Ладожское озеро площадью 17680 км², с объемом водной массы 848 км³ и суммарной площадью водосбора более 283 000 км² является крупнейшим пресноводным водоемом Европы. Водосбор Ладоги размещен в пределах России, Финляндии и Беларуси. На водосборе Ладоги расположены такие крупнейшие европейские озера, как Онежское, Сайма и Ильмень. Воды Ладожского озера практически полностью определяют сток р. Невы, который оказывает существенное воздействие на состояние и формирование вод Балтийского моря, расположенного у побережий трех стран Финского залива.

С использованием трехмерной модели гидродинамики внутреннего моря — **МГВМ**, адаптированной к использованию в озерных условиях [59], выполнены исследования термогидродинамики Ладожского и Онежского озер. В качестве исходной метеорологической информации для расчета современного среднего климатического состояния термогидродинамических процессов в озере использовались данные реанализа NCEP/NCAR [60]. В качестве сценария возможных климатических изменений был выбран MPI B2, разработанный в Институте

Макса Планка с использованием модели глобальной атмосферной циркуляции ЕСНАМ4/ОРУС3 [61]. Данный сценарий характеризуется следующими основными параметрами:

- 1) умеренный выброс парниковых газов в атмосферу;
- 2) основное потепление климата происходит в зимний период, что соответствует данным многолетних натуральных наблюдений, выполненным за последние 40—50 лет;
- 3) общие тенденции выбросов, которые обеспечиваются сценарием В2, также близки к тем, которые наблюдались в течение последних 40 лет;
- 4) температура воздуха в конце столетия может повыситься на величину до 5 °С.

Верификация модели выполнялась по данным натуральных наблюдений за распространением вод основных притоков по акватории озера и их влиянию на формирование пространственного распределения минерализации озерных вод (рис. 4) [55, 59]. Как показали численные эксперименты, модель достаточно хорошо

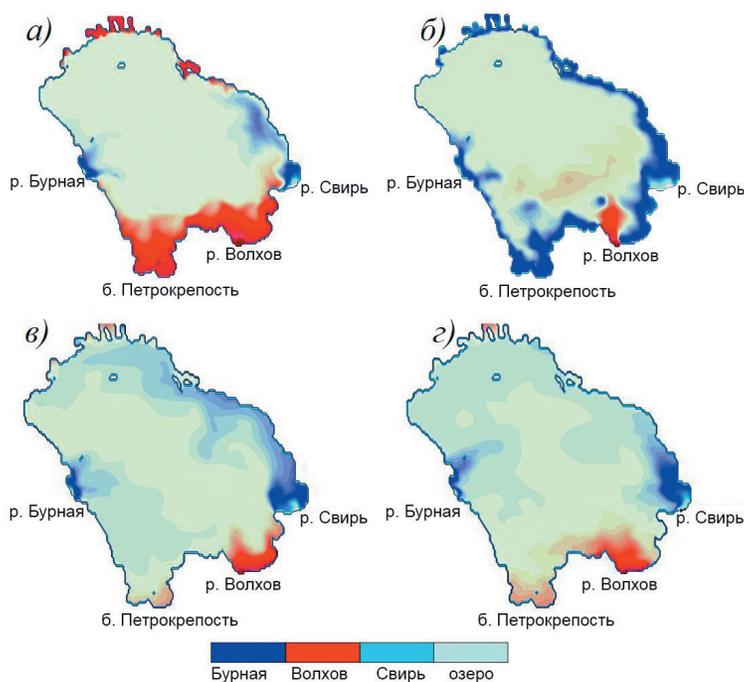


Рис. 4. Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского озера в различные сезоны «среднеклиматического» года по результатам моделирования: а) в зимний период; б) в конце ледостава; в) в летний период; з) в осенне-зимний период.

Fig. 4. Distribution of waters of the main tributaries over the water area of Lake Ladoga in different seasons of the “mid-climatic” year according to the modeling results:

- a) in winter; б) at the end of freeze-up; в) in summer; з) autumn-winter periods.

описывает главные особенности термогидродинамических процессов в озере — циркуляцию вод, положение и скорость продвижения фронта термобара.

Исследованы термический и ледовый режимы Ладожского и Онежского озер в условиях среднеклиматических атмосферных воздействий (нормы для 1961—1990 гг.) для широты Ладоги, а также и при «возможных климатических изменениях на водосборе» в соответствии с климатическим сценарием МРІ В2. Численные эксперименты показали, что основное отличие при потеплении от среднеклиматического сценария начинается в первых числах ноября в южных районах озера и сказывается на скорости нарастания и таяния льда. При потеплении озеро способно полностью покрыться льдом, однако его малая толщина предопределяет ранние сроки таяния. Следует ожидать, что полное очищение озера ото льда, возможно, будет происходить на 2—3 недели раньше по сравнению со среднеклиматическим атмосферным воздействием. Раннее исчезновение ледяного покрова приведет к временному сдвигу в процессах, определяющих термический режим озера в весенне-летний период. Так, образование термобара начнется раньше на 2—3 недели, скорость его распространения по акватории озера будет выше. В результате весенне-летний термобар закончится в середине июня вместо среднеклиматической середины июля. Как следствие, летний прогрев основной водной массы начнется почти на месяц раньше, что не может не сказаться на ее температурном режиме. При потеплении практически вся акватория озера летом прогреется до 20 °С, чего не бывает при среднеклиматическом воздействии. При таком развитии событий следует ожидать, что возможные климатические изменения способны привести к существенному изменению в термогидродинамических процессах в озере и, как следствие, в функционировании водной экосистемы. Ниже приведены некоторые результаты численных экспериментов. На левых (а) панелях рисунков 5—7 представлены данные расчетов, полученные с использованием осредненных за период с 1949 по 2009 гг. метеоданных реанализа NCEP/NCAR, правых (б) — по климатическому сценарию МРІ В2. На рис. 5 проиллюстрировано начальное распределение первичной продукции (ПП) фитопланктона в озере, относящееся к 1 октября среднеклиматического года и к концу XXI в.

Наиболее продуктивными, как и следовало ожидать, являются южные мелководные районы. Здесь величины ПП колеблются в пределах от 50 до 70 гС/м²сут (рис. 6). Реакция экосистемы на возможные климатические изменения начинает проявляться уже в начале ноября, когда в южных районах образуется первый лед (рис. 7). Значения ПП в «сценарном» варианте для ноября месяца колеблются от 5 до 10 мгС/м²сут. Этот же эффект наблюдается и в середине марта. Несмотря на то, что в обоих случаях озеро практически полностью еще покрыто льдом, значения ПП из-за различий в толщине льда в среднеклиматическом варианте расчетов близки к нулю, а в «сценарном» варианте достигают 20—25 мгС/м²сут. В этом случае можно говорить о том, что возможные климатические изменения способны вызывать раннее подледное развитие водорослей. В июле, когда весенне-летний термобар заканчивается, продукционные процессы активизируются по всему озеру. В «среднеклиматическом» варианте расчетов значения ПП варьируют

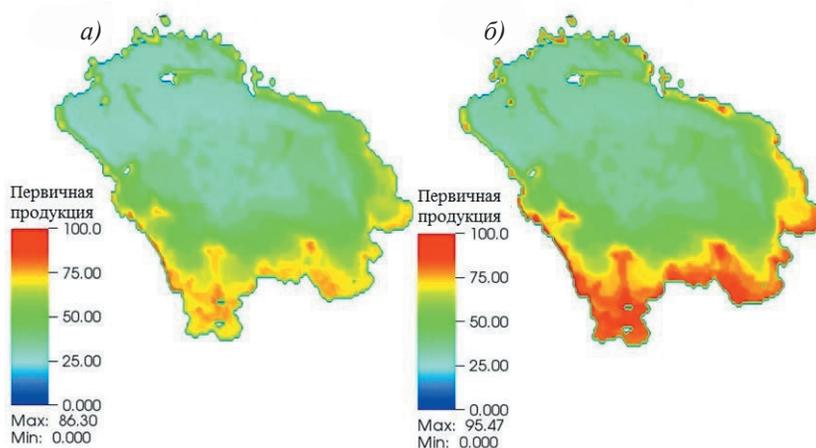


Рис. 5. Начальное распределение первичной продукции фитопланктона в Ладожском озере в октябре:

а) среднеклиматический год; б) климатический сценарий (потепление климата до 5°).

Fig. 5. The initial distribution of primary production of phytoplankton in Lake Ladoga in October:

а) average climatic year; б) climatic scenario (climate warming up to 5°).

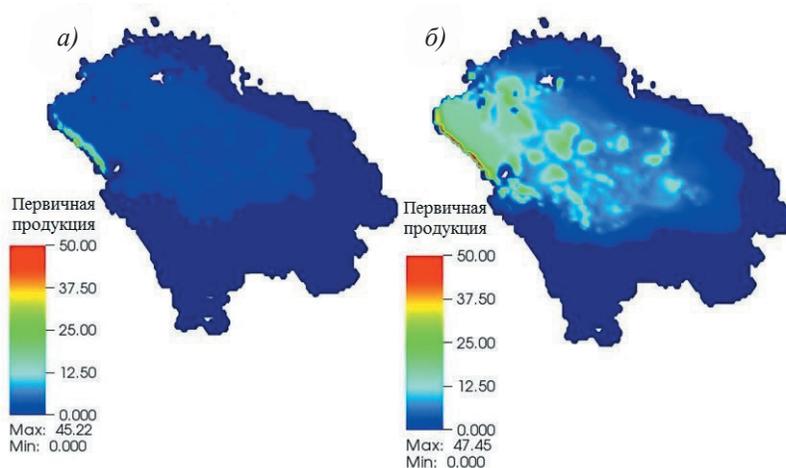


Рис. 6. Эффект раннего подледного развития фитопланктона в Ладожском озере, вызванного возможными изменениями климата:

а) среднеклиматический год; б) климатический сценарий.

Fig. 6. The effect of early under-ice development of phytoplankton in Lake Ladoga caused by possible climate changes:

а) mid-climatic year; б) climatic scenario.

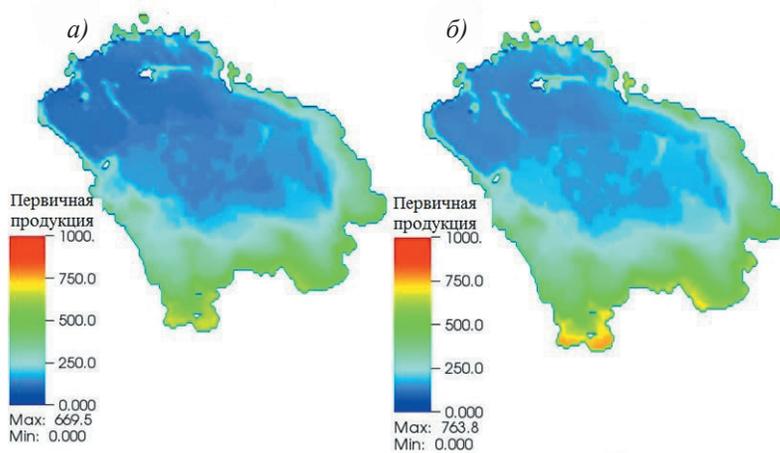


Рис. 7. Распределение первичной продукции фитопланктона по акватории Ладожского озера в середине июля:

а) среднеклиматический год; *б)* климатический сценарий.

Fig. 7. Distribution of primary production of phytoplankton in the aquatic area of Lake Ladoga in mid-July:

a) average climatic year; *b)* climatic scenario.

от 500 мгС/м²сут в бухте Петрокрепость до 150 мгС/м²сут в северо-западных районах, в «сценарном» варианте — от 700 до 200 мгС/м²сут соответственно (рис. 7).

В Онежском озере во все сезоны абсолютные значения ПП ниже по сравнению с Ладожским озером. Это объясняется тем, что температура воды в Онежском озере в периоды открытой воды ниже, чем в Ладожском. Фитопланктон Онежского озера из-за особенностей формирования цветности воды находится в состоянии «радиационного голода». Это означает, что приходящая солнечная радиация поглощается в основном частицами абиогенного происхождения в слое прозрачности. Таким образом, солнечная радиация выступает в роли лимитирующего фактора.

Концентрация взвешенных веществ является одним из принятых к мониторингу показателей качества воды практически во всех программах контроля по гидрологическим и гидрохимическим показателям многих стран [62]. «Взвешенные вещества (ВВ) являются одними из наиболее распространенных контролируемых и регламентируемых показателей качества воды» [63]. Тем не менее, наблюдения за стоком наносов на притоках Ладожского озера в рамках государственного мониторинга практически не проводились. Исключение составляют эпизодические непродолжительные измерения на гидрометрических створах на реках Олонка — г. Олонец (1953 и 1956 гг.) и Свирь — с. Мятусово (1945 и 1948 гг.).

Для количественной оценки поступления в озеро взвешенных наносов, которые являются сорбентами различных загрязняющих веществ и приводят к заилению южной мелководной акватории, были выполнены расчеты с использованием



Рис. 8. Расположение основных притоков Ладожского озера.

Fig. 8. Location of the main tributaries of Lake Ladoga.

математической модели движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в русле, входящей в состав модельной системы ИНОЗ РАН.

Схема расположения основных притоков Ладоги, для которых оценивались сток наносов и мутность воды, приведена на рис. 8. Их общая площадь водосборов составляет 248 232 км² или 88 % всей площади водосбора Ладожского озера.

Согласно результатам вычислений, приведенным в табл. 1, с основными притоками, т. е. с 88 % водосборной площади в Ладогу поступает около 380 тыс. т речных наносов в год. Если привести рассчитанное значение к общей площади водосбора, то получится, что за год в озеро поступает 432 тыс. т/год. Средний по водосбору годовой модуль стока наносов оценивается в 1,53 т/(км²×год).

Основной вклад в поступление наносов осуществляют водотоки с наибольшей водностью — Свирь, Вуокса и Волхов, на долю которых приходится 253 тыс. т/год или 59 % от общего количества наносов. Однако, на эти же водотоки приходится и наименьший годовой модуль стока наносов, что объясняется удержанием наносов зонами подпора перед плотинами ГЭС и, как следствие, уменьшением общего расхода наносов.

Таблица 1

Параметры распределения среднесуточного расхода воды Q_{cp} , м³/с, годового стока наносов R_{cp} , т/год и мутности воды S_{cp} , мг/л для гидрометрических (г/м) створов и годового стока наносов $R_{устье}$ для устьевых участков притоков

Parameters of distribution of average daily water discharge Q_{av} , м³/s, annual sediment runoff R_{av} , t/year and water turbidity S_{av} , mg/l for gauging sections and annual sediment runoff R_{mouth} for estuarine sections of tributaries

Г/м створы основных 7 притоков (рек) Ладоги	Q_{cp} , м ³ /с	C_v	C_s	C_s/C_v	R_{cp} , 10 ³ т/год	S_{cp}^* , г/м ³	$S_{медиана}^*$, г/м ³	σ_{S^*} , г/м ³	$R_{устье}^*$, 10 ³ т/год	M , т/(км ² ×год)
Вуокса — X ГЭС	545	0,25	1,79	7,16	72,80	3,73 (2,9)	1,67	2,90	81,10	1,18
Янисйоки — п. Хямекоски	46,6	0,58	1,65	2,83	17,30	8,4 (2,3)	6,24	23,70	18,30	5,01
Видлица — с. Б. Горы	13,7	0,74	2,46	3,33	8,11	11,2 (3,3)	9,50	12,90	10,95	11,21
Олонка — г. Олонец	33,5	1,25	2,66	2,13	27,70	11,5 (9,5)	5,26	13,30	34,30	16,20
Свирь — XII ГЭС	538	0,35	-0,63	-1,80	77,60	4,3 (4,3)	4,10	1,07	97,60	1,16
Сясь — д. Яхново	48,8	1,57	4,53	2,89	54,30	12,0 (6,6)	4,61	16,00	63,90	10,30
Волхов — VI ГЭС	434	0,76	1,15	1,51	73,70	4,2 (10,8)	4,90	0,65	74,10	0,92

* В скобках приведены осредненные измеренные значения мутности воды по данным наблюдений ИНОЗ РАН в период 2011—2019 гг.

Анализ результатов расчета годового модуля стока наносов показал хорошее соответствие полученных значений условиям формирования выноса твердого вещества на водосборе характеристикам слагающих его почво-грунтов. Восточная часть водосбора Ладожского озера (бассейны рек Свирь, Олонка и Видлица) расположена на южном склоне Балтийского щита, рельеф которого характеризуется чередованием скалистых гряд и межрядовых понижений, заполненных глинами, суглинками и супесями [64]. Благоприятные для размыва почвы этой территории определяют сравнительно высокие значения годового модуля стока наносов. Южная часть водосбора (бассейны рек Волхов и Сясь) расположена на Русской плите. Из-за сельскохозяйственного освоения земель и легкоразмываемых почвообразующих грунтов значения годового модуля стока наносов рек также достаточно высоки для северо-западного региона и для р. Сясь достигают 10 т/(км²×год).

Чудско-Псковское озеро — четвертый по величине пресноводный водоем Европы и крупнейший Европейский трансграничный водоем, расположенный на границе между Россией и Эстонией [28, 65, 66]. Площадь озера составляет 3555 км², водосбора — 44000 км², из которой 26 % находится в Эстонии, 67 — в России и 7 — в Латвии. Наиболее крупный приток — р. Великая с площадью водосбора 25200 км² или 58 % общей площади водосбора. В настоящее время особое беспокойство вызывает процесс эвтрофирования водоема, сопровождающийся «цветением» воды и ухудшением ее качества. Важнейшим фактором, определяющим интенсивность эвтрофирования Чудско-Псковского озера, является обеспеченность водной массы биогенными элементами, прежде всего, фосфором.

Выполнены исследования по оценке биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с использованием методов моделирования. Задействована система моделей **SWM + ILM + ILLM**. Итогом моделирования в данном случае является набор кривых распределения и их параметров (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения) для суточных слоев осадков, среднемесячных слоев стока и среднегодового выноса биогенных веществ с российской части водосбора Чудско-Псковского озера в условиях современного климата. Результаты расчетов стока и выноса биогенных веществ с водосбора представлены в табл. 2. Здесь приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока с водосбора, средние значения нагрузки общим фосфором и общим азотом (400 тР/год, 8549 тN/год) и ее природной составляющей (269 тР/год, 3573 тN/год) на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора. Представлены также их средние квадратичные отклонения, а также значения, рассчитанные для многоводных (обеспеченностью 1 и 5 %) и маловодных (обеспеченностью 95 и 99 %) лет. Нетрудно видеть, что изменчивость стока в зависимости от метеорологических параметров более существенна по сравнению с изменчивостью биогенной нагрузки. Сказанное объясняется тем, что не все источники биогенной нагрузки напрямую зависят от водности года.

Таблица 2

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока H , рассредоточенной и природной составляющих биогенной нагрузки (LP_{np} , LN_{np} и LP_{nat} , LN_{nat}) на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора (Среднее — X_{cp} , среднее квадратичное отклонение — σ , значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % — $X_{\%}$)

Distribution parameters of the calculated annual runoff layers H , non-point and natural components of the nutrient load (LP_{np} , LN_{np} and LP_{nat} , LN_{nat}) on Lake Chudsko-Pskovskoye from the Russian part of the catchment (Mean — X_{av} , standard deviation — σ , abundance values 1, 5, 25, 75, 95 and 99 % — $X_{\%}$)

	X_{cp}	σ	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
H , мм/год	242	57,00	375	336	281	204	148	110
LP_{np} , т/год	400	81,52	590	535	455	345	265	210
LP_{nat} , т/год	269	50,67	387	353	303	235	185	151
LN_{np} , т/год	8549	2013,00	13239	11870	9898	7200	5228	3859
LN_{nat} , т/год	3573	841,00	5533	4961	4136	3010	2185	1613

Проведен расчет по оценке перспектив снижения фосфорной нагрузки за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в сельскохозяйственное производство на российской части водосбора Чудско-Псковского озера. Нагрузка, сформированная на полях сельскохозяйственных предприятий, оценивалась по методу, предложенному специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [67]. Расчеты выполнялись, исходя из содержания общего фосфора в пахотном слое почвы, доз внесения минеральных и органических удобрений на поля сельхозпредприятия и их усвоения сельхозкультурами, а также происхождения и механического состава почв. Учитывались современные практикуемые в Псковской области технологии содержания животных и системы удаления навоза. Результатом расчетов явилась прогностическая оценка снижения фосфорной нагрузки на 10,7 т/год за счет внедрения НДТ.

Как следует из результатов 3D моделирования, формирование полей течений в Чудско-Псковской озерной системе характерно для больших мелководных озер умеренных широт (рис. 9 а). В подледный период течения в обоих озерах в основном носят бароклинный характер, обусловленный неравномерным распределением плотности воды по пространству. Максимальные скорости невелики — в основном до 1,5—2 см/с в наиболее мелководных прибрежных районах. С окончанием периода ледостава в апреле—мае основным влияющим на течения фактором становится ветер. В озерах (особенно в Чудском) наблюдается частая смена антициклонической циркуляции на циклоническую и наоборот. Скорости при этом возрастают до 5—6 см/с. Характер течений и их скорости остаются таковыми в течение всего периода открытой воды до начала ледостава, когда основным фактором, определяющим циркуляцию водных масс, снова становится бароклинность, вызванная неравномерным по пространству теплообменом между водной массой и донными отложениями. Пространственное распределение фосфора в Псковском озере определяется двумя процессами — циркуляцией водной массы в Чудском озере и «разбавляющим» влиянием стока р. Великой (рис. 9 б). Эти процессы прослеживаются в течение всего года. Первый процесс проявляется в том, что более холодная, а, следовательно, более плотная вода Чудского озера блокирует водообмен с Псковским озером с севера. Кроме того, концентрация фосфора в Чудском озере меньше, чем в Псковском, поэтому в зоне смешения двух водных масс на границе озер наблюдается уменьшение концентрации фосфора в Псковской водной массе. Второй процесс проявляется в том, что концентрация фосфора в воде р. Великой также меньше, чем в центральной части Псковского озера. Поэтому в течение всего года в юго-восточной части Псковского озера наблюдаются минимальные концентрации фосфора. В таких условиях максимальные концентрации фосфора в Псковском озере сосредоточены в центральной и особенно в западной части акватории. Пространственное распределение фосфора в Чудском озере носит выраженный зональный характер. Максимальные значения наблюдаются в южной части озера в зоне смешения с водной массой Псковского озера, минимальные — в северной.

В период ледостава взмучивание донных отложений практически отсутствует. Это объясняется тем, что в отсутствие волнения напряжение трения

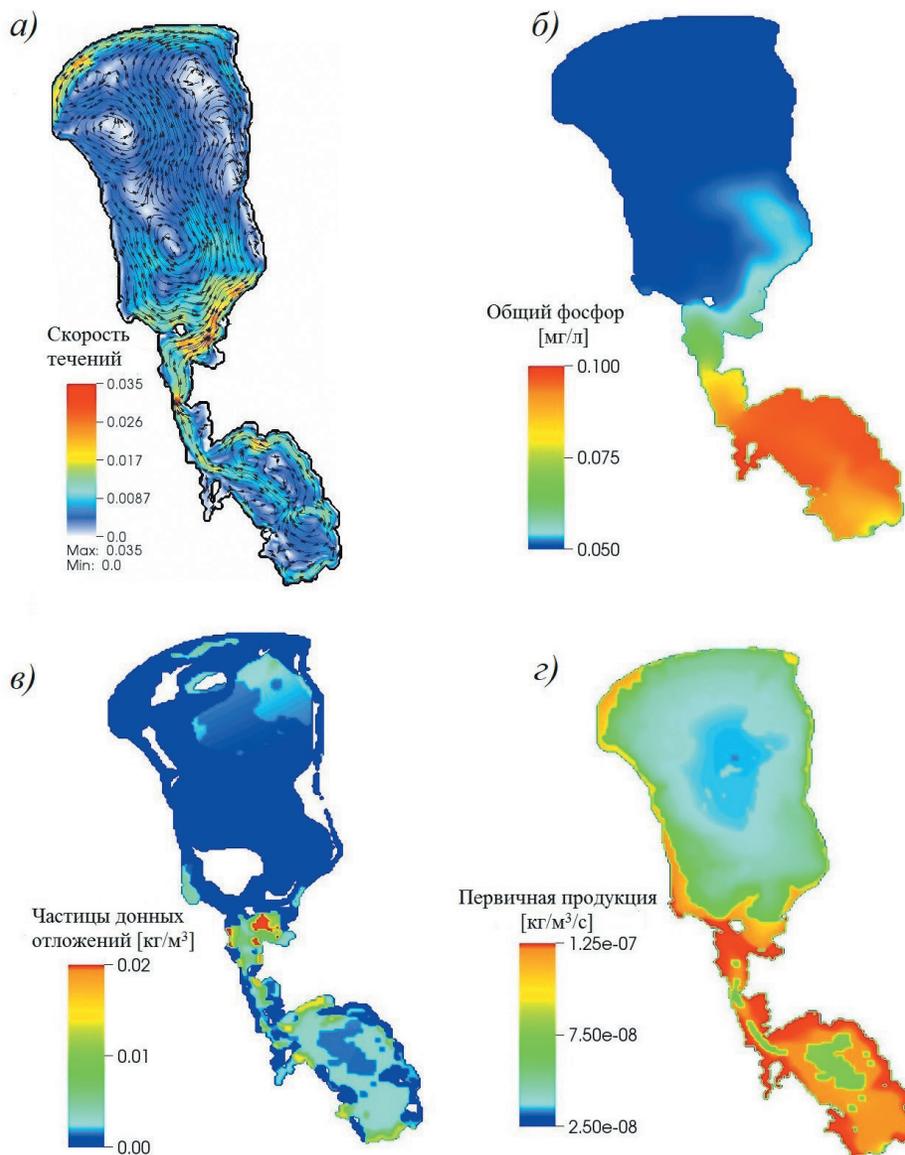


Рис. 9. Результаты 3D моделирования Чудско-Псковской озерной системы:

- а) поле скоростей течений в середине апреля;
- б) пространственное распределение концентрации общего фосфора в середине июля;
- в) пространственное распределение концентрации частиц донных отложений в середине июля;
- з) пространственное распределение первичной продукции фитопланктона в середине июля.

Fig. 9. Results of 3D modeling of Lake Chudsko-Pskovskoye:

- a) field of current velocities in mid-April; б) spatial distribution of total phosphorus concentration in mid-July; в) spatial distribution of the concentration of bottom sediment particles in mid-July;
- z) spatial distribution of the primary production of phytoplankton in mid-July.

в придонной области, создаваемое бароклинными течениями, не достигает критического значения, необходимого для отрыва частиц донных отложений от поверхности. В период открытой воды процесс ресуспензии верхнего слоя донных отложений протекает активно, обеспечивая поступление биогенных веществ во всех формах в придонную область, откуда они переносятся в водную массу посредством турбулентных вихрей и течений. Взмучивание активно начинает развиваться в мае в Псковском озере, тогда как водная масса Чудского озера в это время еще устойчиво стратифицирована после схода ледового покрова. Наиболее активно ресуспензия донных осадков протекает в летний период, когда оба озера достаточно часто перемешиваются до дна (рис. 9 в). В период осеннего охлаждения процесс ресуспензии теряет свою интенсивность. Особенно это заметно в Чудском озере. С установлением в первой половине ноября ледового покрова взмучивание донных осадков в Псковском озере прекращается. В Чудском озере ресуспензия также протекает до начала периода ледостава.

Процессы первичного продуцирования в Чудско-Псковском озере так же, как и ресуспензия, лимитируются продолжительностью ледостава. Лимитирование ПП обусловлено недостатком фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), которая полностью либо отражается, либо поглощается снежно-ледовым покровом в зимний период. Сразу после вскрытия Псковского озера резко возрастает поток ФАР на поверхность озера. В условиях отсутствия биогенного лимитирования в нем начинает активно развиваться фитопланктон. В Чудском озере процессы ПП протекают с гораздо меньшей интенсивностью, а на севере озера интенсивность фотосинтеза близка к нулю. В летние месяцы свой вклад в интенсификацию ПП вносит прогрев водных масс обоих озер. Фотосинтез водорослей возрастает практически на порядок величины по сравнению с весенним периодом (рис. 9 з). Характер пространственного распределения ПП меняется. К максимальным значениям фотосинтеза в Псковском озере добавляются зоны с фотосинтезом такой же интенсивности в прибрежных районах Чудского озера. До конца лета характер пространственного распределения ПП не меняется. В осенний период в связи с естественным уменьшением прихода ФАР интенсивность фотосинтеза закономерно снижается и практически сводится к нулевым значениям к началу периода ледостава.

Выполнены расчеты сезонной динамики биогенной нагрузки как на всю Чудско-Псковскую озерную систему, так и на Чудское и Псковское озера в отдельности. В расчетах использовались данные об основных потоках вещества в пограничной зоне осадков—вода, оцененных на основе данных натурных наблюдений в 2013 и 2017 гг. Алгоритм расчета состоял из нескольких этапов:

1. В озерах определялись площади со схожими типами донных отложений.
2. Для каждого типа донных отложений оценивались (по справочной литературе) физико-химические свойства, включая плотность, когезию и критические значения напряжения трения отрыва частиц от дна.
3. Для каждого типа донных отложений по модели рассчитывались в виде потока значения ресуспензии, для чего в модели предусмотрена соответствующая процедура.

4. По данным натурных наблюдений определялась суммарная доля биогенных веществ во взвеси.

5. На последнем этапе путем интегрирования по времени и площади рассчитывались абсолютные значения внутренней биогенной нагрузки.

Результаты расчетов внутренней фосфорной нагрузки представлены на рис. 10. Характер временной динамики нагрузки свидетельствует о том, что гидродинамические процессы являются важнейшим фактором формирования внутренней биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро. Биогенная нагрузка минимальна в зимний период, когда гидродинамические процессы протекают подо льдом с минимальной интенсивностью, в период открытой воды, когда ветровое

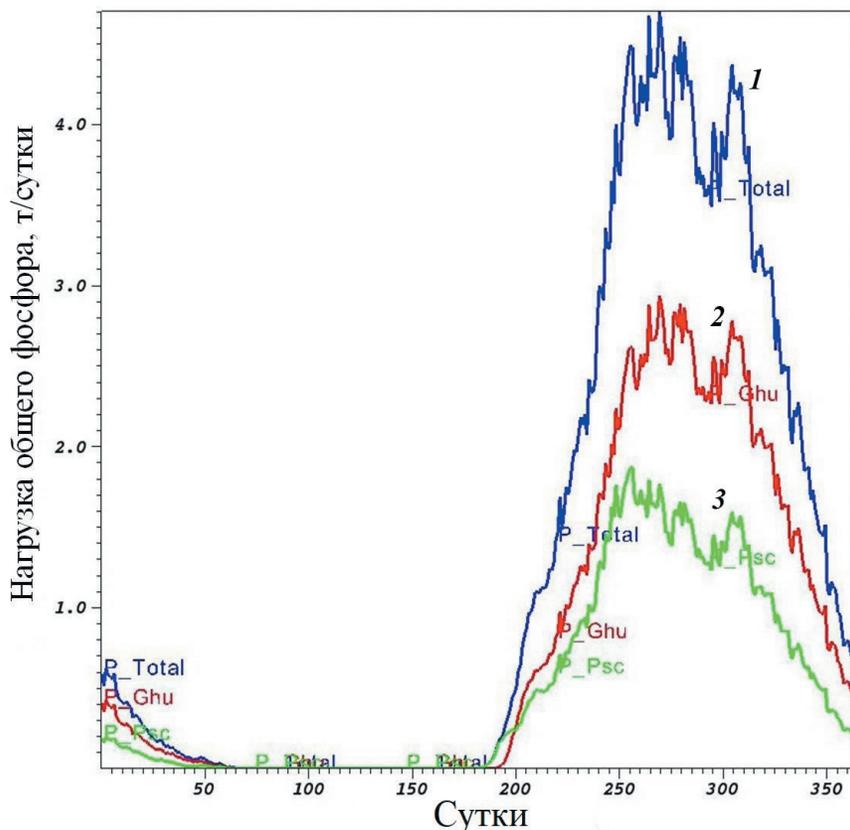


Рис. 10. Сезонная динамика внутренней фосфорной нагрузки на Чудско-Псковское озеро в течение среднеклиматического года (1), Чудское озеро (2) и Псковское озеро (3).

Примечание: начальная дата по оси X — 01 октября.

Fig. 10. Seasonal dynamics of the internal phosphorus load on Lake Chudsko-Pskovskoye during a mid-climatic year (1), Lake Chudskoye (2) and Lake Pskovskoye (3).

Note: the start date on the X-axis is 01 October.

и волновое воздействие на поверхность донных отложений резко возрастает, внутренняя биогенная нагрузка принимает свои максимальные значения. В табл. 3 приведены полученные в ходе расчетов значения годовой суммарной фосфорной и азотной нагрузок на Чудско-Псковскую озерную систему. Там же для сравнения помещены оценки биогенной нагрузки, полученные по данным натурных наблюдений 2017 г.

Таблица 3

Расчетные значения внутренней биогенной нагрузки
на Чудско-Псковскую озерную систему
Estimated values of the internal nutrient load on Lake Chudsko-Pskovskoye

	Фосфор (т/год)	Азот (т/год)	Данные натурных наблюдений	
			Фосфор (т/год)	Азот (т/год)
Чудское озеро	550	5843	695	6763
Псковское озеро	375	3563	377	3027
Суммарная нагрузка	925	9406	1072	9790
Внешняя нагрузка, 2001—2015 гг.	641	16779		

Как видно из табл. 3, расчетные количественные оценки внутренней фосфорной и азотной биогенной нагрузки достаточно близки к оценкам, полученным по данным прямых натурных измерений. При этом внутренняя нагрузка по фосфору значительно превосходит внешнюю нагрузку. По азоту внутренняя нагрузка составляет более 50 % от внешней нагрузки.

Для оценки влияния изменений внешней нагрузки на экологическое состояние озера выполнены численные эксперименты по возможному снижению содержания биогенных элементов в стоке основного притока озера — р. Великой. Из результатов расчетов следует, что снижение концентрации общих форм фосфора и азота в стоке р. Великой на 10 % по сравнению с современными значениями способно привести к снижению суммарной (внутренней + внешней) нагрузки на Чудско-Псковское озеро на 1,5 % для фосфорной нагрузки и на 0,95 % для азотной по отношению к рассчитанным среднееголетним значениям. Тем не менее, снижение внешней биогенной нагрузки является безальтернативным способом улучшения экологического состояния озера, однако быстрого деэвтрофирования ожидать не стоит, поскольку восстановление соответствия трофического уровня донных отложений трофическому уровню водной массы происходит со значительным временным запаздыванием.

Исследования приоритетного проекта «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол от 30.08.2017 № 9) были направлены на разработку и реализацию мероприятий, одной из целей которых является сохранение и улучшение качества воды и гидроэкологического состояния водохранилищ Волжско-Камского каскада. В рамках выполнения проекта ИНОЗ РАН выполнил оценку биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище, сформированной на левобережной и правобережной частях водосбора в современных

условиях [68]. Рассчитанные с использованием модели **ILHM + ILLM** значения суммарной нагрузки на водохранилище составили 1637 тР/год и 36531 тN/год для условий средней водности. При этом вклад левобережной части — около 69 % от значения суммарной нагрузки (таблицы 4 и 5).

Таблица 4

Средняя многолетняя биогенная нагрузка на Куйбышевское водохранилище с правобережной части водосбора (площадь — 30878 км², средний слой стока 74 мм/год)

Average long-term nutrient load on the Kuibyshev reservoir from the right-bank part of the catchment (area — 30878 km², average runoff layer 74 mm/year)

	Фосфор	Азот
Нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)	515,3	11141,4
Природная (фоновая) составляющая (т/год)	29,4	685,0
Диффузная (антропогенная) составляющая, включая атмосферные выпадения (т/год)	484,4	10427,4
Модуль выноса (кг/км ² год)	16,7	360,8

Таблица 5

Средняя многолетняя биогенная нагрузка на Куйбышевское водохранилище с левобережной части водосбора (площадь — 60207 км², средний слой стока 125 мм/год)

Average long-term nutrient load on the Kuibyshev reservoir from the left-bank part of the drainage basin (area — 60207 km², average runoff layer 125 mm/year)

	Фосфор	Азот
Нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)	1121,8	25389,7
Природная (фоновая) составляющая (т/год)	104,0	2732,9
Диффузная (антропогенная) составляющая, включая атмосферные выпадения (т/год)	984,0	21243,8
Модуль выноса (кг/км ² год)	18,6	421,7

Проведено выделение фоновой (природной) и диффузной (антропогенной) составляющих нагрузки. Вклад диффузной составляющей в общую биогенную нагрузку на водохранилище со стороны водосбора весьма велик (84—94 % от значения суммарной нагрузки). В ходе оценки сельскохозяйственной нагрузки на водосбор показано, что внедрение в сельскохозяйственную практику наилучших доступных технологий (НДТ) не приведет к существенному снижению биогенной нагрузки на водохранилище. Причиной может служить тот факт, что на большей части изучаемой территории дозы внесения питательных веществ с органическими и минеральными удобрениями в последние годы ниже среднего выноса азота и фосфора с урожаем.

На рис. 11 представлена блок-схема 3D модели, которая использовалась для расчетов гидрофизических и химико-биологических параметров Куйбышевского водохранилища [56, 69].

В качестве исходной метеорологической информации для расчетов по модели использовались данные реанализа NCEP/NCAR. Показано, что модель позволяет

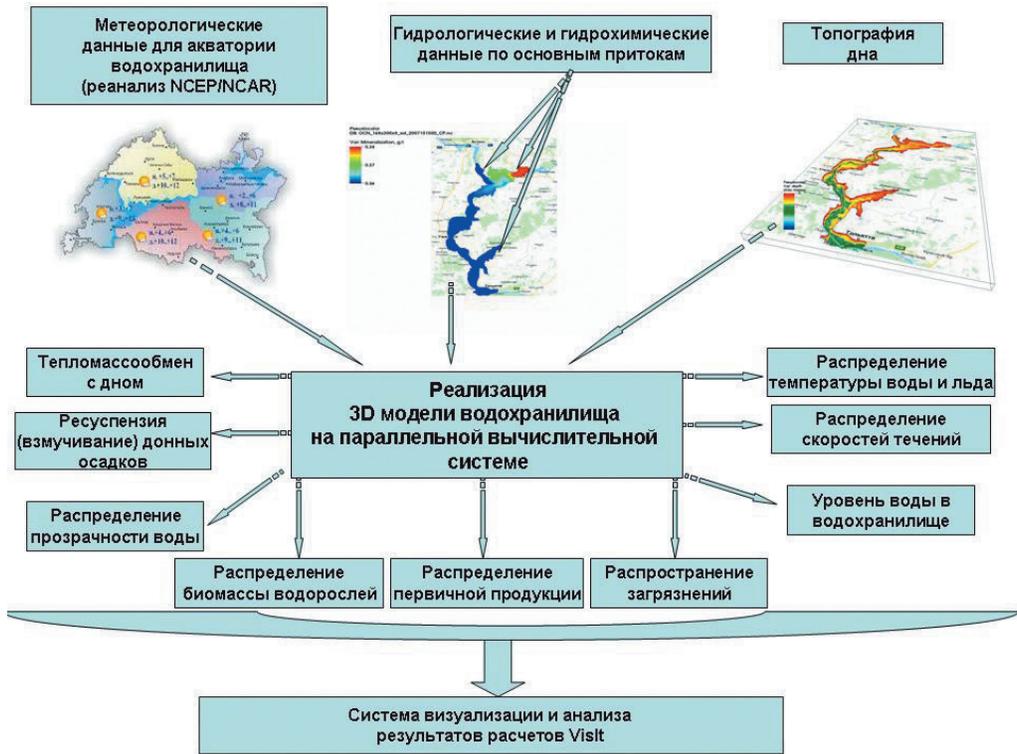


Рис. 11. Блок-схема 3D модели экосистемы Куйбышевского водохранилища.

Fig. 11. Block diagram of a 3D model of the ecosystem of the Kuibyshev reservoir.

воспроизводить пространственно-временную неоднородность распределения гидрофизических и химико-биологических параметров в Куйбышевском водохранилище. В частности, результаты расчетов позволили сделать вывод о том, что во время теплого периода на акватории формируются максимальные значения биомассы водорослей в мелководных хорошо прогретых плесах водохранилища. Так как Куйбышевское водохранилище является эвтрофным водоемом, то при отсутствии лимитирования развития фитопланктона биогенными элементами особое влияние оказывают другие факторы, включая температуру воды. Особенно это относится к Черемшанскому заливу, который считается наиболее продуктивным районом водохранилища (рис. 12)

Одной из целей Российско-Финляндского проекта SEVIRA является оценка стока и выноса биогенных элементов с водосборов малых трансграничных рек, формирующих биогенную нагрузку на Финский залив Балтийского моря, а также прогноз возможных изменений гидрологического режима рек и нагрузки на Балтику в результате возможных климатических изменений и антропогенных воздействий. Один из объектов исследования — р. Rakkolanjoki / Селезневка с площадью водосбора 621,2 км² (рис. 13 а).



Рис. 12. Пространственное распределение общей биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в середине лета.

Fig. 12. Spatial distribution of the total phytoplankton biomass in the Kuibyshev reservoir in mid-summer.

Результаты расчетов по модели **ПЛМ+ПЛМ** (рис. 13 б) показали, что реализация в трансграничном регионе экологически благополучного сценария выброса в атмосферу парниковых газов RCP2.6 может привести в 2100 г. к снижению стока с изучаемого водосбора на 4,47 % по отношению к периоду 2006—2016 гг. и соответствующему снижению биогенной нагрузки на Выборгский залив Балтийского моря со стороны р. Селезневки на 5,19 % по фосфору и 5,06 % по азоту. Максимальный выброс парниковых газов в соответствии со сценарием RCP8.5 в перспективе вызовет возрастание стока до 24,1 % и выноса фосфора и азота на 28,1 и 26,1 % соответственно. Полученные прогнозные оценки предоставлены администрациям населенных пунктов, расположенных как на финской, так и на российской частях водосбора р. Rakkolanjoki / Селезневки.

Международный проект **EnvitOX** рассматривает риски, связанные с возможным попаданием токсичных веществ в водозаборы Санкт-Петербурга, расположенные в р. Неве, а затем в Невскую губу Финского залива, фактически являющуюся пресноводным водоемом. Одним из потенциальных источников загрязнения является полигон хранения высокотоксичных отходов I—V классов опасности

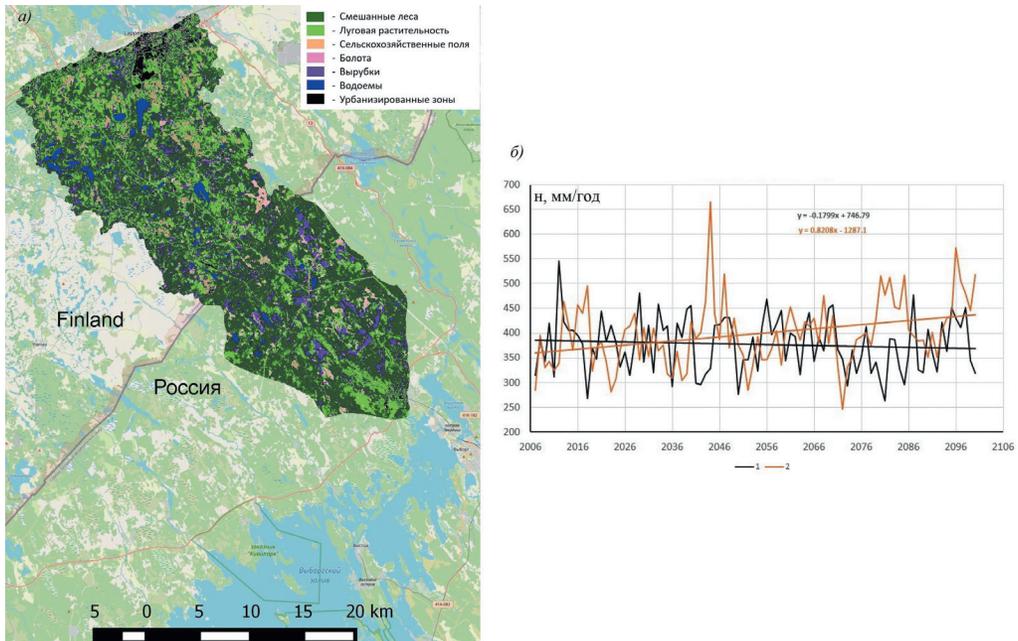


Рис. 13. Схема водосбора реки Rakkolanjoki / Селезневки площадью 621,2 км² (а) и результаты расчета стока, мм/год (б) в соответствии со сценарием RCP2.6 (1) и (2).

Fig. 13. Scheme of the catchment area of the Rakkolanjoki/Seleznevka River with an area of 621.2 km² (a) and the results of calculating the runoff, mm/year (b) in accordance with the RCP2.6 scenarios (1) and (2).

«Красный Бор», расположенный в 30 км от Петербурга и в 15 км от устья р. Ижоры, через которую возможны поступления аварийного сброса с полигона. Это единственное предприятие для захоронения опасных производственных отходов на территории Северо-Западного федерального округа. На полигоне находится около 2 млн т токсичных отходов, которые свозились с 1969 г. с территории всей России и даже из Прибалтики. При возникновении аварийной ситуации на полигоне токсичные стоки могут попасть в р. Ижора, а затем в Неву в 7 км выше водозаборов Санкт-Петербурга (рис. 14).

Расчеты проводились для трех наиболее вероятных сценариев развития аварийной ситуации на полигоне, которые были определены на основе многолетних натуральных исследований на самом полигоне и окружающей его территории:

— *Сценарий 1.* Перелив содержимого карт-хранилищ токсичных отходов через верхнюю кромку обваловки вследствие интенсивных осадков, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. Превышение уровня содержимого над обваловкой возможно в открытых картах полигона. Объем токсикантов, который может поступить из поверхностного слоя содержимого карт в обводной или внутренний дренажный каналы при теоретически возможном превышении уровня на 0,10 м, составит 794 м³ за 96 ч.

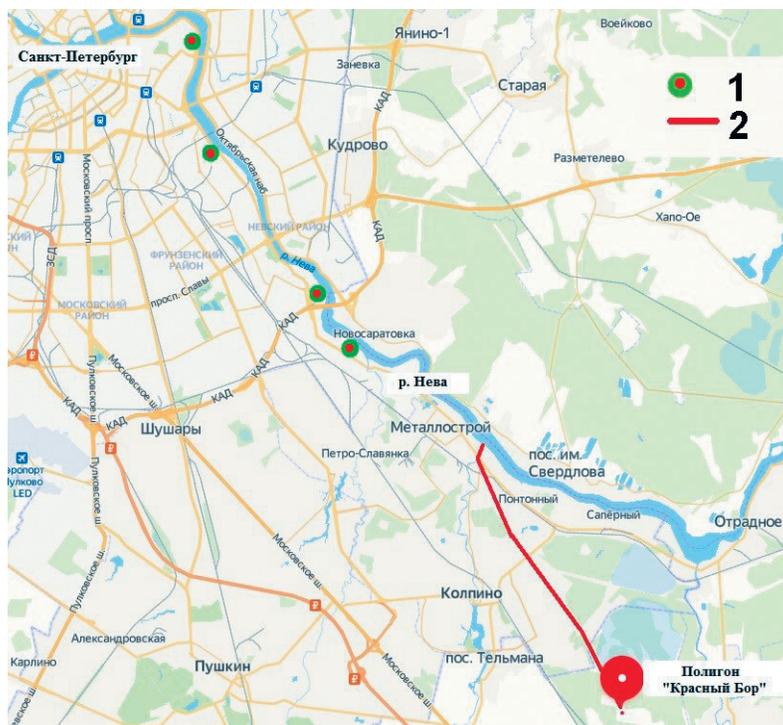


Рис. 14. Схема расположения полигона «Красный Бор»:

- 1 — пункты водозабора Санкт-Петербурга;
 2 — маршрут распространения возможного аварийного сброса до русла Невы.

Fig. 14. Layout of the Krasny Bor landfill:

- 1 — water intake points in St. Petersburg,
 2 — the route of distribution of a possible emergency discharge to the Neva river bed.

— *Сценарий 2.* Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие интенсивных осадков в весенний период, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. В данном сценарии предполагается, что разрушение обваловки может быть только в условиях перелива. Глубина разрушения обваловки является параметром расчета. Время действия фактора риска — до 100 ч. Остальные исходные условия соответствуют предыдущему сценарию. Суммарный сброс — 7940 м³ за 100 ч.

— *Сценарий 3.* Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие возникновения чрезвычайной ситуации (теракт, взрыв, цунами и пр.) вплоть до полного разрушения обваловки до уровня поверхности почвы на рассматриваемых картах. Остальные исходные условия соответствуют предыдущим сценариям. Суммарный сброс — 176985 м³ за 100 ч.

На рис. 15 приведены результаты расчетов степени разбавления загрязняющих веществ, поступивших в гидрографическую сеть водосбора Невы в соответствии

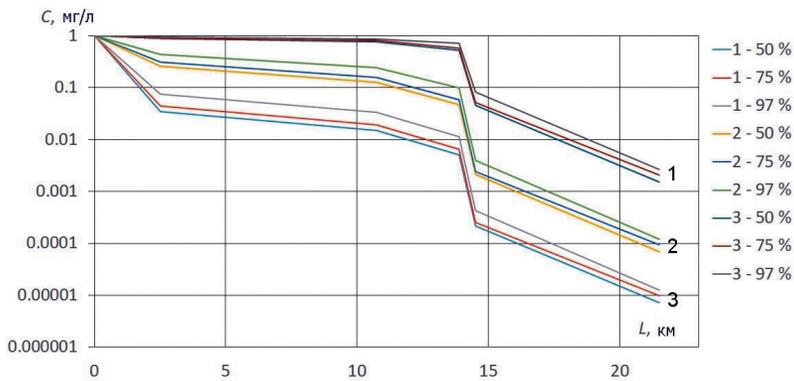


Рис. 15. Результаты расчетов степени разбавления загрязняющих веществ на участках трассы возможного распространения аварийного сброса по сценариям 1, 2 и 3 до ближайшего городского водозабора при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

Fig. 15. The results of calculations of the degree of dilution of pollutants in the sections of the route of possible distribution of emergency discharges according to scenarios 1, 2 and 3 to the nearest municipal water intake at water availability of 50, 75 and 97 % of availability.

с приведенными сценариями аварийного сброса с полигона, для магистрального канала, ручья Большой Ижорец, рек Большая Ижорка, Ижора и затем до ближайшего городского водозабора Северной водопроводной станции (СВС) на р. Неве при расходах воды разной обеспеченности. В качестве исходной концентрации сброса была принята единичная концентрация вещества. Для русла Невы, кроме распространения растворенной примеси, выполнялся расчет транспорта взвешенных частиц, поступивших со стоком Ижоры и являющихся потенциальным носителем сорбированных на них токсикантов. Характерной особенностью процесса переноса взвешенных и растворенных примесей основным течением Невы является то, что воды притока прижимаются к берегу и распространяются вдоль него при минимальном перемешивании с водными массами основного потока.

Показано, что наиболее неблагоприятная ситуация с разбавлением наблюдается при реализации третьего сценария возможного аварийного сброса с полигона, возникшего в результате полного разрушения обваловки карт-хранилищ токсичных отходов. Снижение водности также негативно сказывается на степени разбавления. Результаты расчетов, представленных на рис. 15, могут быть пересчитаны в любые реальные значения концентрации, так как представлены в долях единицы. Взвешенные частицы, попадающие в русло Невы со стоком Ижоры, не представляют непосредственной угрозы для водозаборов, так как до них не доходят.

В условиях средней водности аварийный сброс с полигона достигнет ближайшего городского водозабора примерно через 18 ч. Снижение водности приводит к возрастанию времени добегающего. Таким образом, имеется определенный запас времени для принятия необходимых мер по перехвату сброшенных стоков в гидрографической сети или защите водозабора. Кроме того, чтобы избежать

попадания загрязняющих веществ в водозаборы следует располагать их за пределами зоны вдольберегового распространения вод притоков.

Заключение

В соответствии с Водным Кодексом РФ (от 03.06.2006 № 74-ФЗ, ред. от 24.04.2020 с изм. и доп. 14.06.2020) и Положением об осуществлении государственного мониторинга водных объектов (постановление Правительства РФ № 219 от 10.04.2007) мониторинг представляет собой систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния водных объектов, находящихся в федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, физических и юридических лиц. Широкие возможности развития прогностической части государственного мониторинга крупных водоемов демонстрируются изложенными в настоящей работе результатами создания и практического применения методов математического моделирования [70]. По мнению авторов, в ближайшей перспективе следует организовать двухкомпонентную систему государственного мониторинга крупнейших уникальных водоемов Северо-Запада России, в том числе Ладожского, Онежского, Чудско-Псковского озер, в котором целесообразно иметь две части: базовую и индивидуальную [71, 72]. Цель базовой части государственного мониторинга крупнейших водоемов должна состоять в том, чтобы с помощью получаемых данных фиксировать основные процессы внутри водоема и их изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. Базовая часть мониторинга должна обеспечить сопоставимость и преемственность будущих данных мониторинга с имеющимися материалами наблюдений за прошлые годы. Индивидуальная часть государственного мониторинга должна быть ориентирована, прежде всего, на решение задач, связанных с обеспечением безопасного водоснабжения жителей. Именно в этой части мониторинга методам математического моделирования должна быть отведена ведущая роль выполнения научно-обоснованных оценок качества и количества водных ресурсов, прогноза их возможных изменений под воздействием климатических факторов и антропогенного воздействия.

Благодарности

Работа выполнена при финансировании за счет средств федерального бюджета по теме № 0154-2019-0001 (№ госрегистрации АААА-А19-119031890106-5) «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Acknowledgments

The work was carried out with funding from the federal budget on theme № 0154-2019-0001 “Comprehensive assessment of the dynamics of the ecosystems of Lake Ladoga and water bodies of its basin under the influence of natural and anthropogenic factors.”

Список литературы

1. Крейман К.Д. Закон сопротивления для ветрового дрейфа при наличии волн // Доклады Академии наук. 1990. Т. 310, № 2. С. 316—319.
2. Крейман К.Д. Лабораторное моделирование турбулентного вовлечения в кольцевом бассейне с обдувом водной поверхности // Доклады Академии наук. 1988. Т. 303, № 2. С. 315—319.
3. Самарский А.А. Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент // Коммунист. 1983. № 18. С. 31—42.
4. Румянцев В.А., Бовыкин И.В. Пространственно-временные закономерности колебаний стока рек Евразии. Л.: Наука, 1985. 148 с.
5. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов // СПб.: Наука, 2008. 152 с.
6. Румянцев В.А., Бовыкин И.В. Математико-статистические основы совместного анализа временных гидрологических рядов. СПб.: Наука, 2009. 86 с.
7. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А., Григорьев А.С. Стохастические модели влияния климата на гидрологию озер. СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2001. 156 с.
8. Румянцев В.А., Разумов Е.В., Зилитинкевич С.С. Параметризованная модель сезонных изменений температуры и условий перемешивания в озере (с приложением к проблеме озера Севан). Л.: Институт озерадения АН СССР, 1986. 73 с.
9. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Капотова Н.И., Ливанова Н.А. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 93 с.
10. Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modeling thermal structure and heat transfer within water column and bottom sediments // Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, Lund University. 1998. V. 3220. 41 p.
11. Golosov S., Kirillin G. Modelling the lake response to an external phosphorus load. // Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000. № 129. P. 388—393.
12. Mironov D. Parameterization of lakes in numerical weather prediction // Deutscher Wetter Dienst, Technical Report. 2008. № 11. 44 p.
13. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2012. № 64. P. 17264.
14. Астраханцев Г.П., Егорова Н.Б., Руховец Л.А. Моделирование течений и термического режима Ладожского озера (препринт). Л.: Институт озерадения АН СССР, 1988. 44 с.
15. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Писулин И.В., Руховец Л.А. Математическая модель для исследования реакции экосистемы Ладожского озера на изменение антропогенной нагрузки (препринт). СПб., 1992. 44 с.
16. Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Петрова Н.А., Полосков В.Н., Руховец Л.А. Моделирование сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании Ладожского озера // Моделирование современного состояния экосистемы Ладожского озера (препринт). 1998. С. 29—53.
17. Rukhovets L., Astrakhantsev G., Menshutkin V., Minina T., Petrova N., Poloskov V. Development of models for the lake Ladoga ecosystem // Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000. № 129. P. 453—460.
18. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 127 с.
19. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Поздняков Ш.Р., Коноплев В.Н., Игнатьева Н.В., Крючков А.М., Каретников С.Г. Теоретические и натурные исследования воздействия сточных вод Санкт-Петербурга на качество воды Невской губы // Инженерная экология. 2005. № 3. С. 15—28.
20. Gribin S., Assaul V., Andreev V., Kondratyev S. Problems of modeling the sewage discharge in shallow water areas: experimental and theoretical study // Proc. XVIII Int. Oceanographic Conf. Spb. 1994. P. 172—181.
21. Rutyantsev V., Gribin S., Kondratyev S. Mathematical modelling of consequences of waste discharges into shallow water // Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu, Finland. № 112. 1995. P. 102—105.
22. Рябченко В.А., Коноплев В.Н., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Лыскова У.С. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию Юго-западных очистных

- сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) // Изв. РГО. 2006. Вып. 5. С. 48—57.
23. Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Коноплев В.Н., Поздняков Ш.Р., Шмакова М.В. Формирование ливневых сбросов части неочищенных сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга // Изв. РГО. 2006. Вып. 4. С. 47—54.
 24. Исследование влияния местоположения выпусков Юго-западных очистных сооружений, Красносельской станции аэрации, Центральной станции аэрации, Северной станции аэрации, КОС г. Петродворца, КОС г. Сестрорецка, КОС г. Зеленогорска на состояние Невской губы. СПб.: ИНОЗ РАН, 2005. 268 с.
 25. Кармазинов Ф.В., Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Поздняков Ш.Р. Оптимизация расположения водовыпусков очистных сооружений как способ оздоровления акватории Невской губы // Теория и практика восстановления внутренних водоемов / Под ред. Румянцева В.А., Кондратьева С.А. СПб.: Лема, 2007. С. 167—179.
 26. Кондратьев С.А. Математическое моделирование стока и выноса вещества с водосбора: дис. на соиск. уч. степ. д-ра физ.-мат. наук. СПб.: Институт озерадения РАН, 1992. 301 с.
 27. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 255 с.
 28. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. Моделирование абнотических процессов в системе водосбор—водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Нестор-История, 2010. 116 с.
 29. Ливанова Н.А., Капотова Н.И., Кондратьев С.А., Герасимова И.П., Чешева И.Л. Рекомендации по использованию радиолокационной информации об осадках в оперативном прогнозировании дождевых паводков. Л.: ВФ ГГИ, 1987. 55 с.
 30. Гаврилица А.О., Папук В.В., Кондратьев С.А. Рекомендации по обоснованию эрозионно допустимых норм, противоэрозионных мероприятий и расчету стока от естественных осадков. Кишинев: Карта Молдовеняскэ, 1990. 62 с.
 31. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор—водоток—водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
 32. Kondratyev S.A., Ignatyeva N.V., Shmakova M.V., Ershova A.A., Minakova E.A., Terekhov A.V. Model-based assessment of nutrient load into water bodies from different landscape types // Landscape Modelling and Decision Support. Ser. «Innovations in Landscape Research» CHAM, SWITZERLAND, 2020. P. 299—310.
 33. Кондратьев С.А., Максимов Д.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Моделирование биогенной нагрузки на водные объекты // Ученые записки РГМУ. 2014. № 35. С. 165—177.
 34. BaltHazAR II project, Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations. Appendix 3a Testing the nutrient load model for the River Luga catchment // HELCOM. 2012. 29 p.
 35. An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes // Rus NIP II. Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation / Swedish Environmental Protection Agency. 2015. V. 6645. 138 p.
 36. Шмакова М.В. Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. СПб.: ГГИ, 2000. 25 с.
 37. Кондратьев С.А. Использование данных дистанционного зондирования при математическом моделировании водосборов. Л.: ИНОЗ РАН, 1987. 59 с.
 38. Котрехов Е.П. Численное моделирование гидравлического режима сложных озерно-речных систем (на примере р. Вуоксы) // Водные ресурсы. 2000. Вып. 27, № 3. С. 273—285.
 39. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рыбакин В.Н., Крючков А.М., Моисеенков А.И., Шмакова М.В., Еришова А.А. Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева // Изв. РГО. 2010. Т. 142, № 2. С. 24—31.
 40. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Голосов С.Д., Зверев И.С. Моделирование тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем» // Труды Кар НЦ РАН. Серия: Лимнология и Океанология. 2021. № 4. С. 40—52.

41. *Becker A., Pflutzner B.* EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling // *ActaHydrophys.* 1987. V. 31, № 3—4. P. 125—141.
42. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климата // *Ученые записки РГГМУ.* 2016. № 42. С. 24—32.
43. *Behrendt H., Dannowski R. (eds.)* Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes. Berlin, Germany: Weissensee Verlag, 2005. 353 p.
44. *Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В.* Метод оценки выноса биогенных веществ с водосборов и биогенной нагрузки на водные объекты Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Лема, 2011. 20 с.
45. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Еришова А.А., Обломкова Н.С.* К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // *Ученые записки РГГМУ.* 2018. № 51. С. 109—120.
46. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Лема, 2013. 142 с.
47. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А., Маркова Е.Г.* Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // *Ученые записки РГГМУ.* 2016. № 44. С. 61—69.
48. *Golosov S., Maher O.A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G.* Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes // *Oecologia, Springer* 2007. V. 151. P. 331—340.
49. *Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E.* Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling // *Spain: Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters / Ed.: Francisco J. Rueda Valdivia.* 2006. P. 209—215.
50. *Golosov S., Zverev I., Terzhevik A.* Thermal Structure and Heat Exchange in Ice-Water Column-Sediment System // *Proc. 7th Int. Symp. Physical Processes in Natural Waters.* Petrozavodsk. 2003. P. 28—34.
51. *Golosov S., Kirillin G.* A parameterized model of heat storage by lake sediments // *Environmental Modelling and Software.* 2010. № 25. P. 793—801.
52. *Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G.* FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling & Software.* V. 26. Issue 5. 2011. P. 683—685.
53. *Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., Palshin N., Potakhin M., Zdorovenov R., Zdorovenova G.* Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes // *Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters / Eds. L. Umlauf, G. Kirillin.* Germany. 2007. P. 147—156.
54. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Гидродинамический режим мелководного водоема: опыт математического моделирования // *Ученые записки РГГМУ.* 2018. № 52. С. 89—101.
55. *Зверев И.С., Ушаков К.В., Шутунова Е.А., Голосов С.Д., Ибраев Р.А.* Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования // *Материалы I Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути решения».* Петрозаводск. 2017. С. 228—233.
56. *Motovilov Y.G., Golosov S.D., Datsenko Y.S.* Information—Modeling Complex for Assessing the Hydroenvironmental Conditions of Reservoirs // *Water Resource.* 2020. № 47. P. 751—762.
57. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А.* Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки // *Метеорология и гидрология.* 2014. № 9. С. 74—84.
58. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А.* Гидродинамическое моделирование течений и транспорта наносов в водоеме при наличии макрофитов (на примере Сестрорецкого Разлива) // *Ученые записки РГГМУ.* 2017. № 49. С. 108—113.
59. *Голосов С.Д., Зверев И.С., Шутунова Е.А.* Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D модели гидродинамики Внутреннего моря (МГВМ) // *Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н.Н. Филатова.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 166—196.

60. Kalnay E. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. V. 77, № 3. P. 437—470.
61. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego — Great European Lakes. Observation and Modelling / Eds L. Rukhovets, N. Filatov. Chester: Springer Praxis, 2010. 302 p.
62. Гагарина О.В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 199 с.
63. Лепихин А.П., Головачева С.И. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2015. № 1. С. 4—13.
64. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Бассейн Ладожского озера как источник воздействия на экологическое состояние озера // *Региональная экология*. 2010. № 4 (30). С. 27—35.
65. Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998—1999 // *Jordforsk: Norwegian Centre for Soil and Environmental Research*. № 4/01. 1999. 66 p.
66. Lake Peipsi // *Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry / Ed. T Nõges*. Tartu: Sulemees Publ., 2001. 163 p.
67. Брюханов А.Ю. Методы проектирования и критерии оценки технологий утилизации навоза, помета, обеспечивающие экологическую безопасность: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. СПб., 2016. 39 с.
68. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Минакова Е.А., Брюханов А.Ю., Игнатьева Н.В., Шмакова М.В., Иванова Е.В., Обломкова Н.С., Терехов А.В. Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора // *География и природные ресурсы*. 2019. № 3. С. 67—76.
69. Мотовилов Ю.Г., Голосов С.Д., Даценко Ю.С., Зверев И.С., Кондратьев С.А., Пужлаков В.В., Фацевская Т.Б. Информационно-моделирующий комплекс на основе математических моделей формирования водного и химического стока в системе «водосбор—водоем» (на примере Куйбышевского водохранилища) // *Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Под рук. В.И. Данилова-Данильяна*. М.: НИСО РАН, 2020. С. 456—473.
70. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Расулова А.М., Коробченкова К.Д. Ладожское озеро — геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // *Гидрометеорология и Экология*. 2021. № 62. С. 139—161. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161.
71. Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Новая парадигма государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Тр. Четвертой всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 15—18 сентября 2015 г. / Под ред. М.В. Болгова*. М.: ИВП РАН, 2015. С. 20—23.
72. Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Актуальность оптимизации государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера // *Ученые записки РГГМУ*. 2017. № 48. С. 110—119.

References

1. Kreiman K.D. Resistance law for wind drift in the presence of waves. *Doklady Akademii nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 1990, 310 (2): 316—319. [In Russian].
2. Kreiman K.D. Laboratory modeling of turbulent entrainment in an annular basin with blowing of the water surface. *Doklady Akademii nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 1988, 303 (2): 315—319. [In Russian].
3. Samarskiy A.A. Modern Applied Mathematics and Computational Experiment. *Kommunist*. Communist. 1983, 18: 31—42. [In Russian].
4. Rumyantsev V.A., Bovykin I.V. *Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti kolebaniy stoka rek Evrazii*. Spatial-temporal patterns of fluctuations in the flow of rivers in Eurasia. Leningrad: Nauka, 1985: 148. [In Russian].
5. Rumyantsev V.A., Trapeznikov Yu.A. *Stokhasticheskie modeli gidrologicheskikh protsessov*. Stochastic models of hydrological processes. Leningrad: Nauka, 2008: 152 p. [In Russian].
6. Rumyantsev V.A., Bovykin I.V. *Matematiko-statisticheskie osnovy sovmestnogo analiza vremennykh gidrologicheskikh riadov*. Mathematical and statistical foundations of joint analysis of hydrological time series. Leningrad: Nauka, 2009: 86 p. [In Russian].

7. Rumyantsev V.A., Trapeznikov Yu.A., Grigoriev A.S. *Stokhasticheskie modeli vliianiia klimata na gidrologiiu ozer*. Stochastic models of the influence of climate on the hydrology of lakes. St. Petersburg: NII Khimii SPbGU, 2001: 156 p. [In Russian].
8. Rumyantsev V.A., Razumov E.V., Zilitinkevich S.S. *Parametrizovannaia model' sezonnykh izmenenii temperatury i uslovii peremeshivaniia v ozere (s prilozheniem k probleme ozera Sevan)*. Parametrized model of seasonal changes in temperature and mixing conditions in the lake (with an application to the problem of Lake Sevan). Leningrad: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1986: 73 p. [In Russian].
9. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Kapotova N.I., Livanova N.A. *Opyt razrabotki i primeneniia matematicheskikh modelei basseinov malykh rek*. Experience in the development and application of mathematical models of small river basins. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985: 93 p. [In Russian].
10. Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modeling thermal structure and heat transfer within water column and bottom sediments. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, Lund University. 1998, 3220: 41 p.
11. Golosov S., Kirillin G. Modelling the lake response to an external phosphorus load. Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000, 129: 388—393.
12. Mironov D. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Deutscher Wetter Dienst, Technical Report. 2008, 11: 44 p.
13. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2012, 64: 17264 p.
14. Astrakhansev G.P., Egorova N.B., Rukhovets L.A. *Modelirovanie techenii i termicheskogo rezhima Ladozhskogo ozera (preprint)*. Modeling of currents and thermal regime of Lake Ladoga (preprint). Leningrad: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1988: 44 p. [In Russian].
15. Astrakhansev G.P., Menshutkin V.V., Pisulin I.V., Rukhovets L.A. *Matematicheskaiia model' dlia issledovaniia reaktcii ekosistemy Ladozhskogo ozera na izmenenie antropogennoi nagruzki (preprint)*. Mathematical model for studying the response of the ecosystem of Lake Ladoga to changes in anthropogenic load (preprint). St. Peterburg, 1992: 44 p. [In Russian].
16. Astrakhansev G.P., Minina T.R., Petrova N.A., Poloskov V.N., Rukhovets L.A. Modeling the succession of phytoplankton during anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga. *Modelirovanie sovremennogo sostoiianiia ekosistemy Ladozhskogo ozera (preprint)*. Modeling of the current state of the ecosystem of Lake Ladoga (preprint). St. Petersburg, 1998: 29—53. [In Russian].
17. Rukhovets L., Astrakhansev G., Menshutkin V., Minina T., Petrova N., Poloskov V. Development of models for the lake Ladoga ecosystem. Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000, 129: 453—460.
18. Ibraev R.A. *Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov v Kaspiiskom more*. Mathematical modeling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea. Moscow: GEOS, 2008: 127 p. [In Russian].
19. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Ryabchenko V.A., Pozdnyakov Sh.R., Konoplev V.N., Ignatieva N.V., Kryuchkov A.M., Karetnikov S.G. Theoretical and field studies of the impact of St. Petersburg wastewater on the water quality of the Neva Bay. *Inzhenernaia ekologiia*. Engineering ecology. 2005, 3: 15—28. [In Russian].
20. Gribin S., Assaul V., Andreev V., Kondratyev S. Problems of modeling the sewage discharge in shallow water areas: experimental and theoretical study. Proc. XVIII Int. Oceanographic Conf. SPb., 1994: 172—181.
21. Rumyantsev V., Gribin S., Kondratyev S. Mathematical modelling of consequences of waste discharges into shallow water. Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu, Finland. 1995, 112: 102—105.
22. Ryabchenko V.A., Konoplev V.N., Kondratyev S.A., Pozdnyakov Sh.R., Lyskova U.S. Assessment of changes in the water quality of the Neva Bay after the commissioning of the South-West treatment facilities of St. Petersburg (according to mathematical modeling). *Izv. RGO*. Proc. RGO. 2006, 5: 48—57. [In Russian].
23. Kondratyev S.A., Ryabchenko V.A., Konoplev V.N., Pozdnyakov Sh.R., Shmakova M.V. Formation of storm discharges of a part of untreated wastewater at treatment facilities of St. Petersburg. *Izv. RGO*. Proc. RGO. 2006, 4: 47—54. [In Russian].
24. *Issledovanie vliianiia mestopolozheniia vypuskov lugo-zapadnykh ochistnykh sooruzhenii, Krasnosel'skoi stantsii aeratsii, Tsentral'noi stantsii aeratsii, Severnoi stantsii aeratsii, KOS g. Petrodvortska, KOS g. Sestrovetska, KOS g. Zelenogorska na sostoiianie Nevskoi guby*. Investigation of the influence of the location of

- the outlets of the Southwest Wastewater Treatment Plant, Krasnoselskaya Aeration Station, Central Aeration Station, Northern Aeration Station, WWTP in Petrodvorets, WWTP in Zelenogorsk on the state of the Neva Bay. St. Petersburg: Institut ozerovedeniya, 2005: 268 p. [In Russian].
25. Karmazinov F.V., Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Ryabchenko V.A., Pozdnyakov Sh.R. Optimization of the location of wastewater outlets as a way to improve the water area of the Neva Bay. *Teoriia i praktika vosstanovleniia vnutrennikh vodoemov. Pod red. Rumiantseva V.A., Kondratyeva S.A.* Theory and practice of restoration of internal water bodies. Ed. Rumyantseva V.A., Kondratyeva S.A. St. Petersburg: Lema, 2007: 167—179. [In Russian].
 26. Kondratyev S.A. *Matematicheskoe modelirovanie stoka i vynosa veshchestva s vodosbora: dis. na soisk. uch. step. d-ra fiz.-mat. nauk.* Mathematical modeling of runoff and removal of matter from the catchment area: dis. for a job. Grand PhD (Phys.-Math. Sci.). St. Petersburg: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1992: 301 p. [In Russian].
 27. Kondratyev S.A. *Formirovanie vneshnei nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniia.* Formation of external load on water bodies: modeling problems. St. Petersburg: Nauka, 2007: 255 p. [In Russian].
 28. Kondratyev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Ryabchenko V.A., Dvornikov A.Yu. *Modelirovanie abioticheskikh protsessov v sisteme vodosbor-vodoem (na primere Chudsko-Pskovskogo ozera).* Modeling of abiotic processes in the catchment-reservoir system (on the example of Lake Chudsko-Pskovskoye). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010: 116 p. [In Russian].
 29. Livanova N.A., Kapotova N.I., Kondratyev S.A., Gerasimova I.P., Chesheva I.L. *Rekomendatsii po ispol'zovaniiu radiolokatsionnoi informatsii ob osadkakh v operativnom prognozirovanii dozhdevykh pavodkov.* Recommendations for the use of radar information on precipitation in operational forecasting of rain floods. Leningrad: VF GGI, 1987: 55 p. [In Russian].
 30. Gavrilitsa A.O., Papuk V.V., Kondratyev S.A. *Rekomendatsii po obosnovaniiu erozionno dopustimyykh norm, protiverozionnykh meropriiati i raschetu stoka ot estestvennykh osadkov.* Recommendations for the substantiation of erosion permissible norms, anti-erosion measures and the calculation of runoff from natural precipitation. Chisinau: Kartya Moldoveneaske, 1990: 62 p. [In Russian].
 31. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. *Mathematical modeling of mass transfer in the catchment — watercourse — water body system.* St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2019: 246 p. [In Russian].
 32. Kondratyev S.A., Ignatyeva N.V., Shmakova M.V., Ershova A.A., Minakova E.A., Terekhov A.V. *Model-based assessment of nutrient load into water bodies from different landscape types. Landscape Modeling and Decision Support. Innovations in Landscape Research.* CHAM, Switzerland, 2020: 299—310.
 33. Kondratyev S.A., Maksimov D.A., Shmakova M.V., Ulichev V.I. *Modeling the biogenic load on water bodies. Uchenyye zapiski RGGMU.* Scientific notes of the RSHU. 2014, 35: 165—177. [In Russian].
 34. BaltHazAR II project, Component 2.2: *Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations. Appendix 3a Testing the nutrient load model for the River Luga catchment.* HELCOM, 2012: 29 p.
 35. *An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes. Rus NIP II. Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation. Swedish Environmental Protection Agency.* 2015, 6645: 138 p.
 36. Shmakova M.V. *Stokhasticheskaia model' pogody v sisteme determinirovanno-stokhasticheskogo modelirovaniia kharakteristik stoka: dis. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk.* Stochastic Weather Model in the System of Deterministic-Stochastic Modeling of Runoff Characteristics: dis. for a job. PhD (Tech. Sci.). St. Petersburg: GGI. 2000: 25 p. [In Russian].
 37. Kondratyev S.A. *Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniia pri matematicheskom modelirovanii vodosborov.* Using remote sensing data in mathematical modeling of catchments. Leningrad: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1987: 59 p. [In Russian].
 38. Kotrekhov E.P. *Numerical modeling of the hydraulic regime of complex lake-river systems (on the example of the Vuoksa river). Vodnyye Resursy.* Water resources. 2000, 27 (3): 273—285. [In Russian].
 39. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Pozdnyakov Sh.R., Rybakov V.N., Kryuchkov A.M., Moiseenkov A.I., Shmakova M.V., Ershova A.A. *Experimental studies and modeling of the formation of water quality in the Neva River. Izv. RGO.* Proc. RGO. 2010, 142 (2): 24—31. [In Russian].
 40. Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Golosov S.D., Zverev I.S. *Modeling of heat and mass transfer in the "catchment-watercourse-water body" system. Trudy Kar NTS RAN. Seriya: Limnologii i Okeanologiya.* Proceedings Kar SC RAS. Series: Limnology and Oceanology. 2021, 4: 40—52. [In Russian].

41. Becker A., Pfitzner B. EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling. *ActaHydrophys.* 1987, 31 (3-4): 125—141.
42. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. Mathematical modeling of the Neva river runoff under conditions of possible climate change. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2016, 42: 24—32. [In Russian].
43. Behrendt H., Dannowski R. (eds.) Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes. Germany: Weissensee Verlag, Berlin, 2005: 353 p.
44. Kondratyev S.A., Kazmina M.V., Shmakova M.V. *Metod otsenki vynosa biogenykh veshchestv s vosborov i biogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty Severo-Zapadnogo regiona Rossiiskoi Federatsii*. Method for assessing the removal of nutrients from watersheds and nutrient load on water bodies of the North-Western region of the Russian Federation. St. Petersburg: Lema, 2011: 20 p. [In Russian].
45. Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Bryukhanov A.Yu., Viktorova N.V., Ershova A.A., Oblomkova N.S. To the assessment of biogenic runoff into the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2018, 51: 109—120. [In Russian].
46. Shmakova M.V. *Teoriia i praktika matematicheskogo modelirovaniia rechnykh potokov*. Theory and practice of mathematical modeling of river flows. St. Petersburg: Lema, 2013: 142 p. [In Russian].
47. Shmakova M.V., Kondratyev S.A., Markova E.G. Spatio-temporal regularities of siltation of the Sestroretsk reservoir by river sediments (based on the results of mathematical modeling). *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2016, 44: 61—69. [In Russian].
48. Golosov S., Maher O.A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes. *Oecologia*, Springer. 2007, 151: 331—340.
49. Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling. Spain: Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Ed.: Francisco J. Rueda Valdivia, 2006: 209—215.
50. Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Thermal Structure and Heat Exchange in Ice-Water Column-Sediment System. Proc. 7th Int. Symp. Physical Processes in Natural Waters. Petrozavodsk, 2003: 28—34.
51. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling and Software*. 2010, 25: 793—801
52. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. FLake—Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software*. 2011, 26 (5): 683—685.
53. Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., Palshin N., Potakhin M., Zdorovennov R., Zdorovennova G. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes. Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters. Eds. L. Umlauf, G. Kirillin. Germany, 2007: 147—156.
54. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. Hydrodynamic regime of a shallow reservoir: an experience of mathematical modeling. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2018, 52: 89—101. [In Russian].
55. Zverev I.S., Ushakov K.V., Shipunova E.A., Golosov S.D., Ibraev R.A. Assessment of the influence of the main tributaries of Lake Ladoga on the formation of the water mass of the Petrokrepost Bay (the source of the Neva River) based on the results of mathematical modeling. *Materialy I Mezhdunarodnoi konferentsii «Ozera Evrazii: problemy i puti resheniia»*. Proceedings of the I International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions”. Petrozavodsk, 2017: 228—233. [In Russian].
56. Motovilov Y.G., Golosov S.D., Datsenko Y.S. Information—Modeling Complex for Assessing the Hydroenvironmental Conditions of Reservoirs. *Vodnyye Resursy*. Water Resource. 2020, 47: 751—762.
57. Shmakova M.V., Kondratyev S.A. Stochastic weather model in the system of deterministic-stochastic modeling of runoff and biogenic load. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2014, 9: 74—84. [In Russian].
58. Shmakova M.V., Kondratyev S.A. Hydrodynamic modeling of currents and sediment transport in a reservoir in the presence of macrophytes (on the example of the Sestroretsk Razliv). *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2017, 49: 108—113. [In Russian].
59. Golosov S.D., Zverev I.S., Shipunova E.A. Modeling of thermohydrodynamic processes and ecosystems of Ladoga and Onega lakes on the basis of a 3D model of hydrodynamics of the Inner Sea (MGVM). *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii*. Pod red. N.N. Filatova. Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia. Ed. N.N. Filatov. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2020: 166—196. [In Russian].

60. Kalnay E. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996, 77 (3): 437—470.
61. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego — Great European Lakes. *Observation and Modelling*. Eds. L. Rukhovets, N. Filatov. Chester: Springer Praxis, 2010: 302 p.
62. Gagarina O.V. *Otsenka i normirovanie kachestva prirodnykh vod: kriterii, metody, sushchestvuiushchie problemy*. Assessment and regulation of the quality of natural waters: criteria, methods, existing problems. Izhevsk: Udmurtskiy universitet, 2012: 199 p. [In Russian].
63. Lepikhin A.P., Golovacheva S.I. On the problem of regulating the discharge of suspended solids into natural watercourses. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*. Water industry of Russia: problems, technologies, management. 2015, 1: 4—13. [In Russian].
64. Alyabina G.A., Sorokin I.N. Lake Ladoga basin as a source of impact on the ecological state of the lake. *Regionalnaya ekologiya*. Regional ecology. 2010, 4 (30): 27—35. [In Russian].
65. Nutrient loads to Lake Peipsi. *Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998—1999*. Jordforsk: Norwegian Centre for Soil and Environmental Research. 1999, 4 (01): 66 p.
66. Lake Peipsi. *Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry*. Ed. T Nöges. Tartu: Sulemees Publ., 2001: 163 p.
67. Bryukhanov A.Yu. *Metody proektirovaniia i kriterii otsenki tekhnologii utilizatsii navoza, pometa, obespechivaiushchie ekologicheskuiu bezopasnost': Avtoref. diss. na soisk. uch. st. d-ra tekhn. nauk*. Design methods and criteria for assessing technologies for the utilization of manure, droppings, ensuring environmental safety: Abstract of the thesis for the degree of Grand Phd (Tech. Sci.). St. Petersburg, 2016: 39 p. [In Russian].
68. Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A., Minakova E.A., Bryukhanov A.Yu., Ignatieva N.V., Shmakova M.V., Ivanova E.V., Oblomkova N.S., Terekhov A.V. Assessment of the biogenic load on the Kuibyshev reservoir from the side of the catchment. *Geografiya i prirodnyye resursy*. Geography and natural resources. 2019, 3: 67—76. [In Russian].
69. Motovilov Yu.G., Golosov S.D., Datsenko Yu.S., Zverev I.S., Kondratyev S.A., Puklakov V.V., Fashchevskaya T.B. Information-modeling complex based on mathematical models of the formation of water and chemical runoff in the «catchment — reservoir» system (on the example of the Kuibyshev reservoir). *Diffuznoe zagriaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniia. Pod ruk. V.I. Danilova-Danil'iana*. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions. Under the direction of V.I. Danilov-Danilyan. Moscow: NISO RAN, 2020 : 456—473. [In Russian].
70. Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A., Rasulova A.M., Korobchenkova K.D. Lake Ladoga is a geostrategic water body in the North-West of Russia and its zone of environmental risk. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 62: 139—161. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161.
71. Rumyantsev V.A., Kryukov L.N. A new paradigm of state monitoring of the largest water bodies in Russia on the example of Lake Ladoga. *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov: Tr. Chetvertoi vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem, Moskva, 15—18 sentiabria 2015 g. Pod red. M.V. Bolgov*. Fundamental problems of water and water resources: Tr. Fourth all-Russia. conf. with int. participation, Moscow, September 15—18, 2015. Ed. M.V. Bolgov. Moscow: IVP RAN, 2015: 20—23. [In Russian].
72. Rumyantsev V.A., Kryukov L.N. The relevance of optimization of state monitoring of the largest water bodies in Russia on the example of Lake Ladoga. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2017, 48: 110—119. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 13.08.2021

Принята в печать 25.10.2021

Сведения об авторах

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р. физ.-мат. наук, заместитель директора ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН по научной работе, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией математических методов моделирования, kondratyev@limno.org.ru.

Шмакова Марина Валентиновна, д-р. геогр. наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, m-shmakova@yandex.ru.

Голосов Сергей Дмитриевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, sergey_golosov@mail.ru.

Зверев Илья Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, iliazverev@mail.ru.

Коробченкова Ксения Дмитриевна, младший научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, korobchenkova14@mail.ru.

Information about authors

Kondratyev Sergey Alekseevich, Grand PhD (Phys.-Math. Sci.), Deputy Director of IL RAS, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods, 3718470@gmail.com.

Shmakova Marina Valentinovna, Grand PhD (Geogr. Sci.), Leading Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods of IL RAS, m-shmakova@yandex.ru.

Golosov Sergey Dmitrievich, PhD (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods of IL RAS, sergey_golosov@mail.ru.

Zverev Ilya Sergeevich, PhD (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods of IL RAS, iliazverev@mail.ru.

Korobchenkova Ksenia Dmitrievna, Junior Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods, IL RAS, korobchenkova14@mail.ru.