

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 80—112.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):80—112.

ЭКОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья

УДК 001.891.573:001.891.55:574.5:502.2(28)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-80-112

Математическое моделирование как средство выхода за рамки возможного натурного эксперимента при изучении и прогнозировании изменений водных объектов и их экосистем

Сергей Алексеевич Кондратьев

Институт озераведения РАН — Институт озераведения РАН — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН (ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия, 3718470@gmail.com

Аннотация. Аналитический обзор работ по моделированию процессов тепло и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем» выполнен с позиции оценки использования математических моделей в качестве средств выхода за рамки возможных натуральных исследований. Рассмотрены результаты нескольких проектов, реализованных с применением модельной системы, разработанной в Институте озераведения РАН. Математические модели, входящие в систему, использовались в ситуациях, когда решение поставленных задач на основе натуральных наблюдений затруднено или невозможно. В процессе моделирования были задействованы результаты дистанционного зондирования Земли, климатический реанализ и сценарии возможных климатических изменений в регионах исследований.

Ключевые слова: модельная система, водосбор, водоток, водоем, тепло и массоперенос.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках темы FFZF-2024-0001 Государственного задания Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН.

Для цитирования: Кондратьев С. А. Математическое моделирование как средство выхода за рамки возможного натурного эксперимента при изучении и прогнозировании изменений водных объектов и их экосистем // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 80—112. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-80-112.

Original article

Mathematical modelling as a means of going beyond possible field experiments in research and forecasting of changes in water bodies

Sergey A. Kondratyev

Institute of Limnology RAS — separate structural subdivision of St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russia, 3718479@gmail.com

Summary. The analytical review of works on modelling of heat and mass transfer processes in the system ‘catchment—watercourse—watershed’ is carried out from the position of evaluation of the use of mathematical models as a means of going beyond the limits of possible in-situ studies. The results of several projects implemented with the use of the model system developed at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences are considered. The system includes 0, 1, 2, 3-dimensional deterministic models describing the processes of runoff, water erosion and removal of nutrients from the catchment, formation of nutrient load on water bodies, internal load due to the removal of substances from bottom sediments, channel movement of two-phase flow, heat and mass transfer in the reservoir, as well as a stochastic generator of meteorological parameters. Mathematical models included in the system were used in situations when it is difficult or impossible to solve the set tasks on the basis of in-situ observations. The solution of problems of remote estimation of characteristics of unstudied lakes of northern territories, forecast of consequences of emergency situation at the landfill of especially hazardous waste, detailed study of three-dimensional heat and mass transfer in water and bottom sediments of a complex lake system, forecast of changes in runoff and nutrient load on the lake from the catchment under different scenarios of future climatic changes, as well as the use of a stochastic generator of meteorological parameters to obtain distribution functions of runoff and nutrient load on the lake under different scenarios of future climatic changes are considered. The results of remote sensing, climate reanalysis and scenarios of possible climatic changes in the study regions were used in the modelling process. It is shown that in the above and many other tasks computational experiment, simulation and predictive modelling can be successfully used to obtain important scientific and practical results beyond the limits of possible in-situ measurements.

Key words: model system, catchment, watercourse, water body, heat and mass transfer.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of Project FFZF-2024-0001 of the State Assignment of the St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Kondratyev S. A. Mathematical modelling as a means of going beyond possible field experiments in research and forecasting of changes in water bodies. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(80—112). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-80-112. (In Russ.).

Введение

Основной системы получения информации о состоянии окружающей среды является наблюдательная сеть, включающая в себя наземную систему стационарных и подвижных пунктов наблюдений, предназначенных для наблюдений за физическими и химическими процессами, происходящими в окружающей среде, определение ее гидрометеорологических и гелиогеофизических характеристик, а также уровня загрязнения атмосферного воздуха, почв и водных объектов, в том числе по гидробиологическим показателям, и космическую наблюдательную

систему [1]. Существующая в настоящее время плотность измерительной сети Росгидромета в большинстве районов нашей страны недостаточна для получения состоятельных оценок изменчивости природной среды. Так, в Арктической зоне Российской Федерации расстояние между пунктами гидрологических наблюдений достигает 800—1300 км, что в 2—3 раза ниже пределов, определенных руководящими документами Росгидромета и в 5 раз ниже рекомендованных Всемирной Метеорологической Организацией [2]. Едва ли можно надеяться на существенное улучшение ситуации в ближайшем будущем. В сложившейся ситуации потребность в количественном описании природных явлений и прогнозе естественных и антропогенных изменений окружающей среды привела к необходимости создания такого инструмента решения задач охраны и рационального использования природных ресурсов как математические модели. В современной системе мониторинга окружающей среды математические модели являются инструментом для расширения возможностей существующей системы измерения характеристик природных процессов и систем за счет проведения вычислительных экспериментов, выполнения имитационных и прогностических расчетов.

Постановка натуральных экспериментов на водных объектах (реках, озерах, водохранилищах) и их водосборных бассейнах обычно требует больших затрат времени и средств. Кроме того, как показывает многолетняя практика, если натурные эксперименты не были подкреплены результатами моделирования, то полученные на их основе выводы оказываются малоубедительными, нередко противоречивыми и плохо поддаются обобщению как во времени, так и в пространстве. В подобной ситуации насущной необходимостью становится проведение имитационного моделирования или вычислительного эксперимента с целью «изучения, прогнозирования, оптимизации сложных многопараметрических нелинейных процессов, теоретическое и экспериментальное исследование которых традиционными методами затруднено или невозможно» [3].

В настоящей статье представлен аналитический обзор результатов нескольких исследований водных объектов, их экосистем и водосборов, которые выполнял Институт озераведения РАН (ИНОЗ РАН) в последние годы, где методами математического моделирования получены результаты, выходящие за рамки возможных натуральных измерений.

Методика исследований

Современный уровень развития методов экспериментальных исследований и обобщения их результатов, компьютерных и геоинформационных технологий способствует созданию все более сложных и детальных моделей. Расширяется область их практического применения. Порой создается иллюзия возможности построения универсальной, учитывающей все многообразие описываемых процессов и пригодной для решения широкого спектра практических задач математической модели. Однако на настоящем этапе развития науки это вряд ли возможно и целесообразно, так как любое физическое явление, взятое во всей своей полноте, настолько сложно, что исследователь часто не имеет исчерпывающего представления даже о физических закономерностях изучаемых процессов. В такой

ситуации уровень математического моделирования не может превышать существующий уровень знаний. Очевидно, говорить о создании универсальной модели пока преждевременно [4].

В связи с этим необходимость создания методической основы и средств построения математических моделей, имеющих рациональную структуру, т. е. ориентированных на решение конкретных задач при минимальной сложности как информационной, так и вычислительной. Последнее достигается за счет использования «модульной архитектуры» компонентно-ориентированного моделирования, имеющего ряд существенных преимуществ по сравнению с обычной «монолитной» техникой моделирования [5]. Отсюда следует, что:

- Разработка и модификация отдельного компонента намного более легкая задача, чем разработка целой системы моделей.
- Модульная структура делает возможной постепенную разработку программ.
- Разные компоненты могут быть написаны разными группами исследователей, работающими независимо друг от друга. Необходимо лишь придерживаться определенных, заранее установленных стандартов, оговаривающих реализацию взаимодействия модулей для обеспечения их совместимости. Внутренняя реализация модуля (алгоритм работы подмодели) может быть произвольной.
- Разные компоненты могут быть написаны на разных языках программирования.
- Возможно повторное использование подмодели в составе других моделей.
- Компоненты могут легко заменяться на другие без необходимости перекомпиляции всей модели. Это позволяет проводить сравнительное тестирование разных моделей одного и того же процесса.
- Возможно создание систем, изменяющих свою функциональность в зависимости от предъявляемых к ним требований.
- Модульная архитектура облегчает распараллеливание вычислений. Это может быть реализовано как при одновременном исполнении нескольких подмоделей, так и запуске нескольких копий одной подмодели [6].

При использовании компонентно-ориентированного подхода необходимо найти разумный баланс между требованиями к стандартизации интерфейса модулей и оптимизацией каждого модуля под конкретную выполняемую им задачу [7]. В соответствии с результатами исследований, представленных в работе [4], для успешного решения разнообразных задач, связанных с моделированием процессов на водосборе и формированием внешней нагрузки на водные объекты, специалист должен иметь в своем распоряжении систему «частных моделей» или «под-моделей» (sub-models), которые описывают изучаемые процессы с различной степенью детализации. В упомянутой выше работе предложено понятие «банк моделей» (по аналогии с банками данных). Термин «банк моделей» означает в данном случае совокупность математических моделей различной степени сложности, описывающих отдельные составляющие процессов массопереноса. Модели, входящие в «банк моделей», могут работать как в комплексе, так и самостоятельно. Результатом многолетних исследований в области моделирования водных объектов является детерминированно-стохастическая модельная система



Рис. 1. Основные компоненты модельной системы Института озераведения РАН, описывающей тепло-массоперенос в системе «водосбор—водоток—водоем».

Fig. 1. Main components of the model system of the Institute of Limnology RAS describing heat and mass transfer in the «catchment-watercourse-watershed» system.

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 [8, 9]. Схема модельной системы представлена на рис. 1.

Компоненты системы, верифицированные и апробированные на практике, могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее прикладного применения. На сегодняшний день в состав модельной системы входят следующие компоненты:

- Модель формирования стока на водосборе *ILHM* [4, 8].
- Модель испарения с леса *EVAPFOR* [10].
- Модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект – *ILLM* [4, 8].
- Модель склоновой эрозии [11].
- Математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (*1D, 2D, 3D*) [8,12].

- Модель годового твердого стока [8, 11].
- Модель массообмена с дном [13, 14].
- Модель эвтрофирования озера (Фолленвайдера) [4].
- 1D-модель теплового режима и перемешивания водоема FLake [15, 16, 17, 18].
- 1D-модель динамики неконсервативной примеси в водоеме FLakeEco [19].
- 2D-модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме [8, 11, 12].
- 3D-модель тепло и массопереноса в водоеме МГВМ, адаптированная к озерным условиям [20, 21, 22].
- Стохастический генератор метеоэлементов (стохастическая модель погоды) [8, 23].

Объединение компонентов модельной системы в модель конкретного изучаемого объекта происходит в соответствии со следующими определяющими факторами [24]: требованиями поставленной задачи; особенностями строения объекта исследования; наличием и размещением пунктов измерительной сети, являющихся источником исходной информации для моделирования; возможностями потребителя при компьютерной реализации модели.

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», в которых наглядно реализовались возможности моделей по выходу за пределы возможных натурных наблюдений и измерений.

Результаты исследований

1. Оценка характеристик малоизученных водоемов северных территорий с использованием методов моделирования и дистанционного зондирования

На современных спутниковых снимках в пределах Российской Федерации дешифрируется примерно 3,8 млн естественных водоемов. Только в районах распространения многолетнемерзлых пород их 3,3 млн (Σ 88 % от общего числа по стране) [25]. Водные объекты этих территорий относятся к категории малоизученных и неизученных из-за их труднодоступности и невозможности выполнения регулярных контактных измерений морфометрических, термогидродинамических и других характеристик. В 2023 г. в Институте озероведения РАН выполнены исследования с целью разработки методики ретроспективной и прогностической оценки характеристик озер площадью до 100 км² на основе методов математического моделирования с использованием спутниковой информации [26, 27]. Схема предлагаемой методики представлена на рис. 2.

Основные этапы выполнения дистанционной оценки гидротермодинамических (ГТД) и химико-биологических параметров озер сводятся к следующему:

- С использованием средств дистанционного зондирования Земли дешифрируется интересующий водный объект, определяются его географические координаты и площадь водной поверхности.



Рис. 2. Схема ретроспективной и прогностической оценки характеристик неизученных озер с использованием методов дистанционного зондирования и математического моделирования.

Fig. 2. Scheme of retrospective and prognostic assessment of characteristics of unstudied lakes using remote sensing and mathematical modelling.

— С использованием доступных баз данных (например, HydroLAKES и WORDLAKE) строятся геостатистические взаимосвязи между морфометрическими характеристиками однородной группы водных объектов, прежде всего $H = f(A)$, где H — средняя глубина водоема, A — площадь его акватории.

— На основе полученной геостатистической зависимости рассчитывается средняя глубина водоема, которая является одним из входных параметров одномерных моделей FLake и FLakeEco.

— По географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа (например, ERA 5 или NCEP/NCAR), которые содержат ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, извлекается метеоинформация требуемого разрешения.

— Метеопараметры реанализа в совокупности с рассчитанной глубиной водоема являются основой для ретроспективной оценки характеристик водного объекта.

— Для оценки последствий возможных климатических изменений к концу XXI века могут быть использованы сценарии выбросов парниковых газов SSP (Shared Socio-economic Pathway) — SSP1-2.6 и SSP5-8.5.

— Прогностические сценарии изменения характеристик водоема основаны на результатах пересчета сценариев выбросов парниковых газов SSP в метеорологические параметры региона исследований по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.

— Метеопараметры, рассчитанные по моделям общей циркуляции атмосферы и океана в совокупности с рассчитанной глубиной водоема, являются основой для прогностической оценки характеристик водного объекта.

— Ретроспективные и прогностические расчёты гидротермодинамических характеристик неизученных водных объектов на основе модели FLake могут выполняться без дополнительной её верификации, так как модель априори применима для использования на территории России. Модель FLakeEco требует дополнительной верификации по данным натуральных наблюдений с целью определения химико-биологических параметров.

В работе [27] представлены результаты использования приведенной выше методики для оценки характеристик малоизученных и неизученных генетически разнотипных озер Якутии, морфометрия которых описана в работе [28]. В этой же работе представлены значения средней глубины озера, площади зеркала и объема водной массы озера для различных типов морфометрически изученных озер Якутии. Средством получения дистанционной оценки характеристик неизученных озер в годы различной водности могут служить каталоги данных Global Surface Water [29], полученные на основе проекта Copernicus [30] и снимков со спутников спутника Landsat.

Одним из основных элементов предлагаемой методики оценки характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты является гидрофизическая модель озера FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [16, 18, 17]. Модель представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ГТД процессов в озере, в которой реализованы результаты исследований, полученные в ходе многолетних натуральных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время *FLake* 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 [31]. Кроме того, прогностическая система COSMO [32], используемая и в нашей стране для составления прогнозов погоды

на всей территории РФ, также включает FLake в качестве средства оценки влияния пресноводных озер на локальный климат по всему миру. Из этого следует, что модель априори может использоваться на неизученных водоемах озерных регионов, рассматриваемых в настоящей работе без дополнительной верификации и апробации, что нельзя сказать про модель FLakeEco.

Модель FLake основана на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности как в водной массе, так и в донных отложениях. При этом вертикальные профили описываются автомодельными представлениями в обеих средах, что позволяет избежать расчета/задания коэффициентов турбулентного/молекулярного обмена, а саму систему уравнений свести к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Последнее делает модель высокоэффективной с точки зрения затрат вычислительного времени.

Несмотря на обширные возможности модели и ее универсальность, водные объекты, к которым применяется модель, должны удовлетворять следующим условиям:

— Протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и не настолько мала, чтобы вторичная ветровая циркуляция играла очень существенную роль.

— Дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью.

— Адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

Данные метеорологического реанализа использовались для задания атмосферного воздействия («форсинга») на озеро. Реанализ объединяет данные детерминированного моделирования с натурными наблюдениями по всему миру в глобально полный и согласованный набор данных. Принцип такого объединения данных основан на ассимиляции данных, используемых в центрах численного прогнозирования погоды, где каждые несколько часов предыдущий прогноз оптимальным образом комбинируется с новыми доступными наблюдениями для получения новой наилучшей оценки состояния атмосферы.

В настоящей работе в качестве входной информации для гидротермодинамического моделирования послужили данные реанализа семейства ERA5 [33]. Реанализы ERA5 содержат ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, которые обновляются ежедневно с задержкой около пяти дней. ERA5 — это пятое поколение реанализа для глобального климата и погоды за последние восемь десятилетий. Данные доступны с 1940 г. по настоящее время.

Для оценки последствий возможных климатических изменений и их влияния на характеристики водоемов в работе использованы так называемые SSP (Shared Socio-economic Pathway) сценарии эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу [34, 35]. Принималось, что до конца XXI в. выбросы парниковых газов будут осуществляться по сценариям SSP1-2.6 и SSP5-8.5, т. е. по лучшему и худшему с точки зрения воздействия на окружающую среду. Сценарий

SSP1-2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH_4) должны уменьшиться на половину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO_2) составит примерно 10 % от уровня 1980—1990 гг. В сценарии SSP5-8.5 выбросы продолжают расти в течение всего XXI в. теми же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2,6 и 8,5) указывают на дополнительное количество энергии (Вт/м^2), которое будет аккумулировано атмосферой в результате выбросов парниковых газов. Значения метеорологических параметров (осадков и температуры воздуха), соответствующих реализации сценариев социально-экономической деятельности человека SSP в изучаемом регионе на период до 2100 г., рассчитаны с использованием климатической модели MPI-ESM-MR (Институт Макса Планка, Германия).

Возможности математического моделирования при решении задач количественной оценки и прогноза возможных изменений гидротермодинамических (ГТД) характеристик озер различного происхождения на основе информации об их морфометрии продемонстрированы на примере решения следующих трех задач имитационного моделирования [27]:

— Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в различных климатических областях Якутии.

— Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в озерах различного происхождения.

— Ретроспективная и прогностическая оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик озер за период 1940—2100 гг.

Последняя задача представляется наиболее интересной с точки зрения демонстрации выхода методов математического моделирования за пределы возможностей натуральных измерений на изучаемых объектах.

Ретроспективная и прогностическая оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик озер проводились за период 1940—2100 гг. Расчеты выполнялись для озера ледникового происхождения ($66,934360^\circ$ с.ш., $130,522173^\circ$ в.д.), расположенного в климатической области умеренного континентального климата с достаточным увлажнением со средними морфометрическими характеристиками [28]. Ретроспективная динамика среднегодовой температуры водной массы и средней толщины ледового покрова за период 1940—2022 гг. моделировалась с использованием информации гидрометеорологического реанализа. Далее до 2100 г. в качестве входной информации в расчетах использовались данные климатических прогнозов (SSP1-2.6 и SSP5-8.5) для рассматриваемой климатической области. Результаты ретроспективных и прогностических расчетов для периода 1940—2022 гг. представлены на рис. 3.

На представленном рисунке наглядно прослеживаются тенденции ретроспективного изменения термических характеристик озер в условиях меняющегося климата с 1940 г. по настоящее время. Средняя температура водной массы озера увеличилась на $0,7^\circ\text{C}$, при этом толщина ледового покрова уменьшилась на $0,06$ м. Далее изменение ГТД характеристик озера существенно зависит от сценариев развития климата. Согласно «худшему» сценарию (SSP5-8.5), когда выбросы парниковых газов продолжают расти в течение всего XXI в., возможно

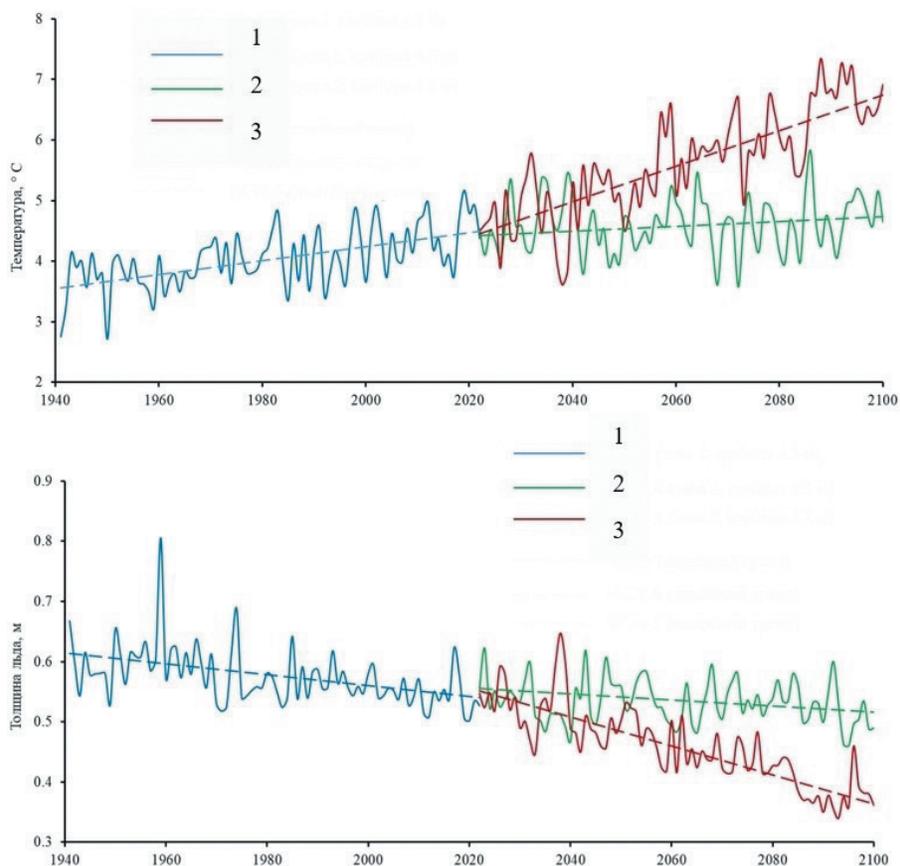


Рис. 3. Ретроспективные (1) и прогностические по сценариям 2 (SSP1-2.6) и 3 (SSP5-8.5) оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик среднегодовой температуры водной массы и средней толщины ледового покрова ледниковых озер зоны умеренного континентального климата с достаточным увлажнением за период 1940—2100 [27].

Fig. 3. Retrospective — 1, and prognostic — 2 (SSP1-2.6) and 3 (SSP5-8.5) assessments of the dynamics of mean annual GTD characteristics (mean annual water mass temperature and mean ice cover thickness) of glacial lakes of the temperate continental climate zone with sufficient moisture for the period 1940—2100 [27].

дальнейшее увеличение температуры водной массы озера еще на 1,5 °С к 2100 г. Толщина ледового покрова уменьшится на 0,10–0,15 м. «Лучший» климатический сценарий (SSP1-2.6), в соответствии с которым выбросы диоксида углерода в атмосферу достигнут нуля к 2100 г., может существенно стабилизировать динамику изменения ГТД характеристик рассмотренного гипотетического озера. Ситуация с толщиной льда разнотипных озер в рассматриваемых климатических областях Якутии полностью соответствует современным представлениям о потеплении в Арктике. Толщина льда уменьшается во всех водоемах, причем образование,

нарастание и таяние льда в озерах главным образом является результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.

Аналогичные расчеты как ретроспективные, так и прогностические могут быть выполнены для любого неизученного озера с площадью менее 100 км² (что объясняется адекватностью применения одномерной модели) без выполнения каких-либо контактных измерений.

2. Распространение загрязнения в русле р. Невы в результате возможной аварийной ситуации на полигоне токсичных отходов Красный Бор

Одним из потенциальных источников загрязнения реки Невы и Невской губы Финского залива Балтийского моря является полигон хранения высокотоксичных отходов I–V классов опасности «Красный Бор», расположенный в 30 км от Петербурга на водоразделе водосборов рек Тосны и Ижоры, являющихся левобережными притоками Невы. Устья Ижоры и Тосны расположены соответственно в 7 и 17 км выше по течению Невы от ближайшего водозабора Санкт-Петербурга (рис. 4).

Это единственное предприятие для захоронения опасных производственных отходов на территории Северо-Западного федерального округа. На полигоне находится около 2 млн тонн токсичных отходов, которые свозились сюда с 1969 г. с территории всей России и даже из Прибалтики [36, 37]. На момент выполнения исследования (2020 г.) на территории ГУПП «Полигон «Красный Бор» осталось 5 открытых карт-котлованов: №№ 59, 64, 66, 67 и 68. Их расположение представлено на рис. 5. Химический состав жидкости в картах-отстойниках авторам исследования неизвестен. Как отмечается в работе [36], фактические объемы карт значительно превышают проектные, поскольку карты-котлованы были обвалованы дамбами для увеличения их емкости.

Вокруг действующих котлованов № 64, 68, 66, 67, 59 высота обваловки составляет до 5 м. В том же источнике указывается [36], что обваловка карт была выполнена с нарушениями нормативов, поскольку не убран имеющийся на территории полигона повсеместное распространение прослой песков, залегающий непосредственно над кембрийскими глинами и водонепроницаемыми моренными отложениями. Эти пески служат коллекторами для перетока загрязненного фильтрата как между закрытыми картами, так и за их пределы [37].

Очевидно, что какие-либо натурные исследования возникновения аварийной ситуации на полигоне «Красный Бор» и её последствий исключены. Возможное решение задачи связано с использованием математического моделирования. Расчеты распространения загрязняющего вещества в гидрографической сети водосбора до основного русла Невы проводились по системе уравнений Сен-Венана в одномерной постановке, дополненной моделью распространения растворенных примесей, основанной на уравнении турбулентной диффузии. Перенос загрязненных вод рек Ижоры и Тосны в русле Невы рассчитывался по модели движения воды и твердого вещества в трехмерной постановке [8], основанной на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток–донные отложения–наносы», дополненной диффузионным уравнением распространения

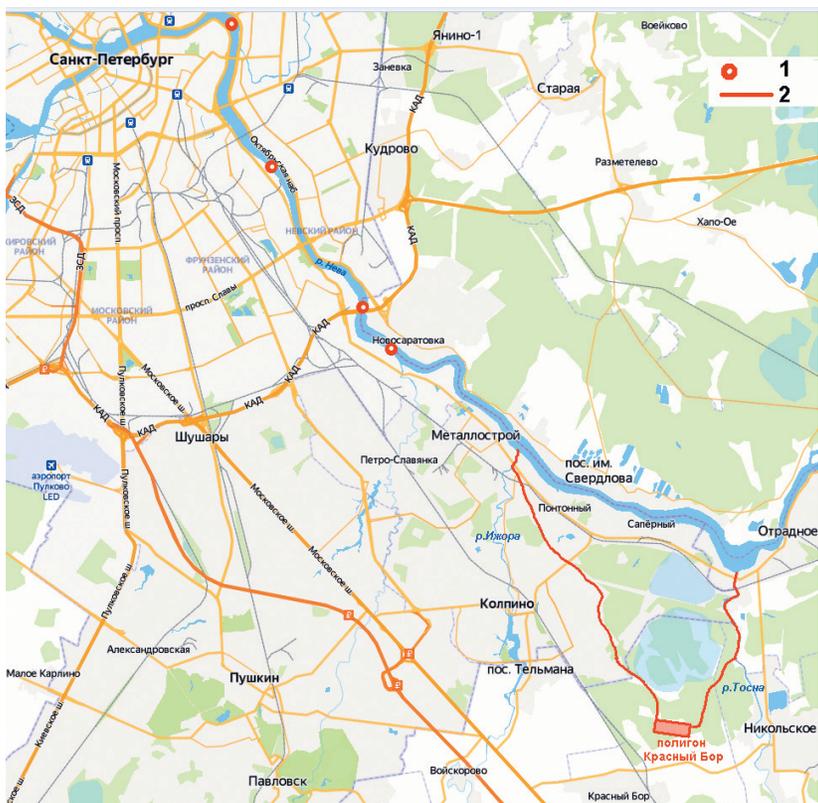


Рис. 4. Схема расположения полигона «Красный Бор».

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

Fig. 4. Location scheme of the Krasny Bor landfill.

1 — St. Petersburg water intake points,
2 — routes of possible emergency discharge spreading to the Neva river bed.

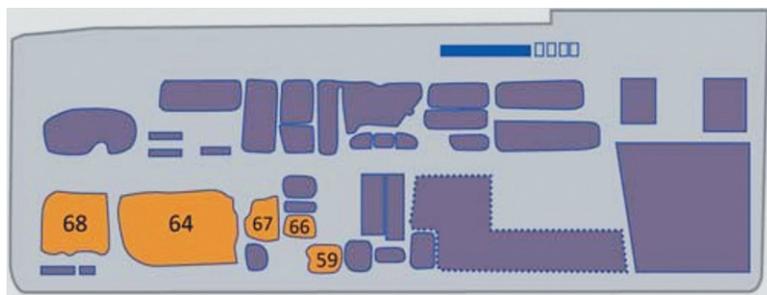


Рис. 5. Схема открытых карт хранения отходов на полигоне «Красный Бор» [36].

Fig. 5. Scheme of open waste storages at the Krasny Bor landfill site [36].

растворенных примесей [38]. Все расчеты выполнялись для единичной концентрации консервативного загрязняющего вещества в сбросе. Это позволяет без труда пересчитать полученные результаты моделирования на нужную концентрацию сброса. Неконсервативность загрязняющего вещества может быть учтена введением в модель турбулентной диффузии [38] экспоненциальной зависимости для оценки редукиции концентрации вещества [39].

На основе анализа инфраструктуры полигона определены основные возможные сценарии возникновения аварийной ситуации, связанной с попаданием токсичных веществ в гидрографическую сеть водосбора. Для выполнения последующих расчетов использовались следующие четыре сценария [39]:

— *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 (№№ 59, 66, 67) при непрерывных суточных максимумах осадков. Карты 64 и 68 укрыты плавучими понтонами, с которых откачиваются атмосферные осадки, и угроза перелива отсутствует. Время действия фактора риска — до 96 часов. Расчетные максимумы осадков на 96 часов: март — 0,104 м; апрель — 0,116 м; май — 0,224 м; июнь — 0,176 м; июль — 0,276 м; август — 0,312 м; сентябрь — 0,136 м. Снегозапас на начало марта — 0,66 м с водозапасом 0,08 м. 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: для карты № 59 — 142 м³; для карты № 66 — 260 м³; для карты № 67 — 392 м³. Суммарный сброс 794 м³ за 96 часов.

— *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. Время действия фактора риска — до 100 часов. Остальные исходные условия соответствуют предыдущему сценарию. Суммарный сброс — 7940 м³ за 100 часов.

— *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 — 176 985 м³ за 100 часов.

— *Сценарий 4.* Подземная фильтрация токсикантов из карт-хранилищ токсичных отходов вследствие возможной фильтрации содержимого карт при возникновении тектонических разломов в массивах кембрийских глин (тектонические нарушения магнитудой до 4,0 баллов были зафиксированы в районе Санкт-Петербурга). Объем токсикантов, попадающих во внешнюю среду, составляет 50 000 м³ за 12 часов.

На рис. 6 и 7 приведены степень разбавления загрязняющих веществ C (мг/л) и время продвижения сброса T (час) в направлении ближайшего городского водозабора L (км) Северной водопроводной станции (СВС), рассчитанные для

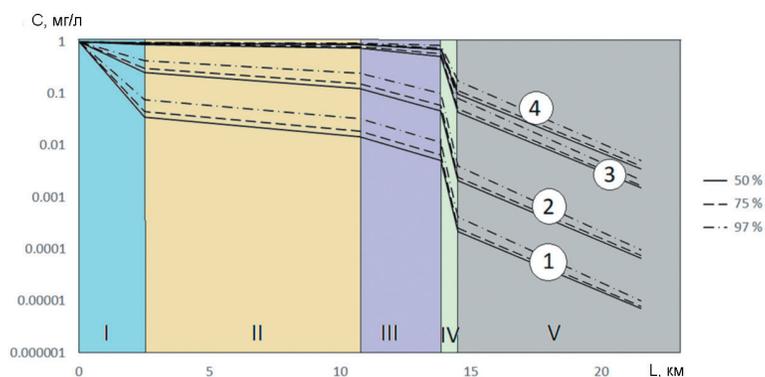


Рис. 6. Результаты расчетов снижения начальной единичной концентрации загрязняющих веществ в аварийном сбросе на участках трассы его возможного распространения по сценариям 1, 2, 3 и 4 до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — магистральный канал, *II* — ручей Большой Ижорец, *III* — река Большая Ижорка, *IV* — река Ижора, *V* — река Нева.

Fig. 6. Results of calculations of reduction of the initial unit concentration of pollutants in the emergency discharge on the sections of the route of its possible spread under scenarios 1, 2, 3 and 4 up to the CBC water intake at water availability of 50, 75 and 97 %.

I — main canal, *II* — Bolshaya Izhora Creek, *III* — Bolshaya Izhora River, *IV* — Izhora River, *V* — Neva River.

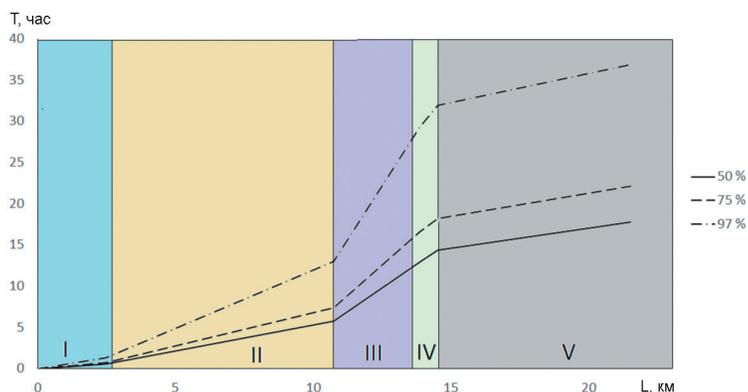


Рис. 7. Результаты расчетов времени продвижения аварийного сброса до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — магистральный канал, *II* — ручей Большой Ижорец, *III* — река Большая Ижорка, *IV* — река Ижора, *V* — река Нева.

Fig. 7. Results of calculations of the time of emergency discharge progression to the CBC intake under 50, 75 and 97 % water availability.

I — main canal, *II* — Bolshaya Izhora Creek, *III* — Bolshaya Izhora River, *IV* — Izhora River, *V* — Neva River.

магистрального канала, ручья Большой Ижорец, рек Большая Ижорка, Ижора и Нева при расходах воды разной обеспеченности в соответствии с приведенными выше сценариями аварийного сброса. Рис. 8 и рис. 9 иллюстрируют те же

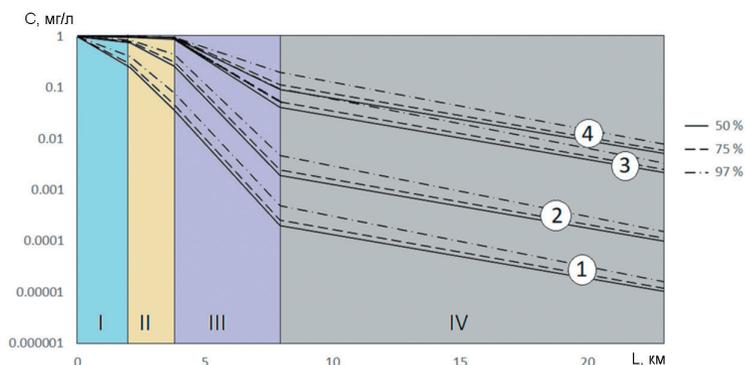


Рис. 8. Результаты расчетов снижения начальной единичной концентрации загрязняющих веществ в аварийном сбросе на участках трассы его возможного распространения по сценариям 1, 2, 3 и 4 до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — ручей без названия, *II* — ручей Хованов, *III* — река Тосна, *IV* — река Нева.

Fig. 8. Results of calculations of reduction of the initial unit concentration of pollutants in the emergency discharge in the sections of the route of its possible spread under scenarios 1, 2, 3 and 4 up to the CBC water intake at 50, 75 and 97 % water availability.

I — unnamed brook, *II* — Khovanov brook, *III* — Tosna river, *IV* — Neva river.

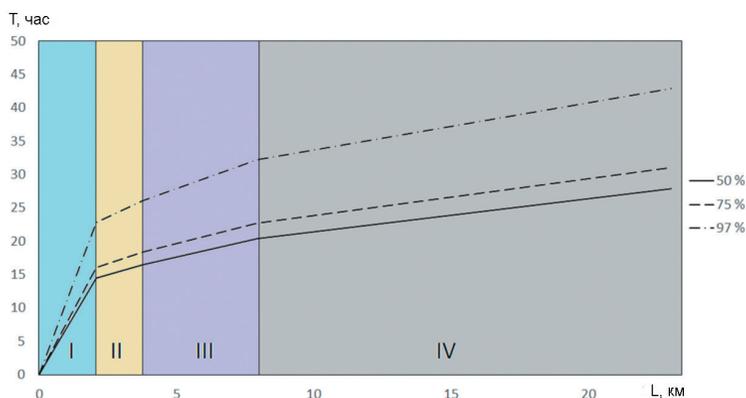


Рис. 9. Результаты расчетов времени продвижения аварийного сброса до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — ручей без названия, *II* — ручей Хованов, *III* — река Тосна, *IV* — река Нева.

Fig. 9. Results of calculations of the time of emergency discharge progression to the CBC intake at 50, 75 and 97 % water availability.

I — unnamed brook, *II* — Khovanov brook, *III* — Tosna river, *IV* — Neva river.

характеристики движения сброса по водной системе ручей без названия с восточной стороны от полигона, ручей Хованов, реки Тосна и Нева.

Если сравнивать продвижение возможного аварийного сброса от полигона до ближайшего водозабора Санкт-Петербурга по маршрутам Полигон — Ижора — Нева и Полигон — Тосна — Нева, то оказывается, что протяженность траектории через водосбор Ижоры на 3,45 км короче, чем через водосбор Тосны. Соответственно, время добега сброса (при водности 50 % обеспеченности) через гидрографическую сеть Ижоры составляет 17,8 часов, Тосны — 28,8 часов. До Невской губы Финского залива аварийный сброс дойдет через Ижору через 31,6 часа, через Тосну — через 42,6 часа. По результатам моделирования наилучшее разбавление в створе ближайшего водозабора выявлено при реализации 4-го сценария сброса, рассматривающего возникновение тектонических разломов в массивах кембрийских глин в районе полигона. При этом рассчитанные итоговые значения степени разбавления примеси в условиях средней водности при движении сброса как через водосбор Ижоры, так и через водосбор Тосны между собой различаются незначительно и составляют от 0,005 до 0,000007 в долях исходной единичной концентрации в зависимости от сценария сброса. Снижение водности негативно сказывается на степени разбавления. Результаты расчетов 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 [39]. Показано, что имеется определенный запас времени (15—25 часов) для принятия необходимых мер по защите ближайшего водозабора или перехвату сброшенных стоков в гидрографической сети. Поступление растворенной примеси в конкретный водозабор будет определяться его конструкцией и расположением в акватории. Чтобы избежать попадания загрязняющих веществ в водозаборы, следует располагать их за пределами зоны вдольберегового распространения вод притоков [39].

Представленные результаты являются итогом вычислительного эксперимента, основанного на проведении имитационных расчетов по хорошо апробированному на практике моделям, входящим в состав модельной системы Института озера РАН.

3. Моделирование Чудско-Псковской озерной системы

Данная система является трансграничным водным объектом, состоящим из трех озер: Чудского, Псковского и соединяющего их Теплого. Моделирование выполнено в рамках ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012—2020 годах» [9, 40]. В данном исследовании в полной мере проявились широчайшие возможности 3D-моделирования при описании процессов тепло- и массопереноса в водной массе и донных отложениях системы из трех соединяющихся озер. Очевидно, что в современных условиях никакая система контактного мониторинга (рис. 10) не способна дать полноценную количественную оценку происходящим в этой сложной водной системе процессам.



Рис. 10. Схема расположения станций отбора проб на российской акватории Чудско-Псковского озера [9].

Fig. 10. Location of sampling stations in the Russian water area of Lake Peipus [9].

В последние годы все большее распространение (по крайней мере, в Российской Федерации) получает распространение математическая модель гидродинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН [20]. Данная модель прошла успешную апробацию при моделировании ГТД Каспийского моря, являющегося характерным представителем класса внутренних морей. Состояние термогидродинамики внутреннего моря описывается трехмерными функциями температуры, солёности, компонент скорости течений, а также двумерной функцией высоты поверхности уровня внутреннего моря. МГВМ включает в себя трехмерные полные уравнения геофизической гидротермодинамики.

Для выполнения расчетов МГВМ была адаптирована для использования ее в озерных условиях. Так, для учета наличия у пресной воды температуры максимальной плотности уравнение состояния морской воды заменено на квадратичное уравнение состояния пресной воды. Выполнены работы по построению расчетной сетки для Чудско-Псковской озерной системы. Для описания химико-биологических процессов гидротермодинамическая часть модели дополнена уравнениями, описывающими сезонную динамику фитопланктона, седиментацию органического вещества на поверхность донных отложений, захоронение и минерализацию органического вещества, механическую ресуспензию верхнего слоя донных осадков. Модель верифицирована по данным многолетних наблюдений, выполняемых на озерах Чудско-Псковской системы сотрудниками Псковского отделения ГосНИОРХа, а именно, данными наблюдений за температурой воды,

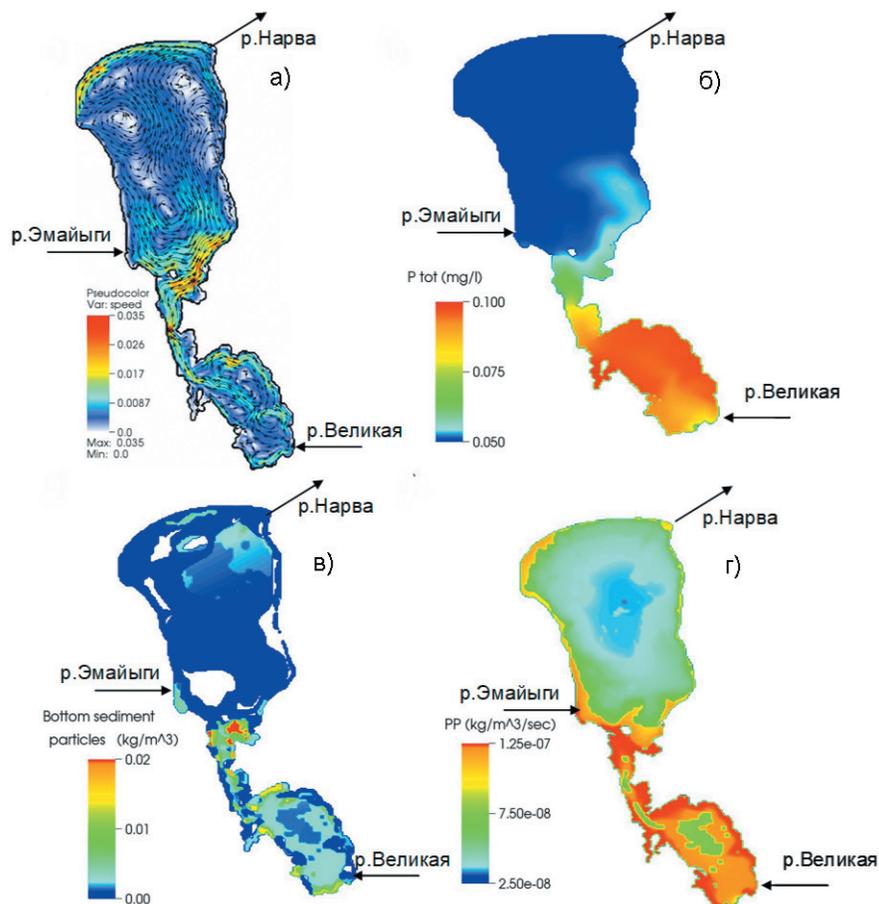


Рис. 11. Результаты 3D-моделирования Чудско-Псковской озерной системы.

- a* — 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;
- г* — пространственное распределение первичной продукции фитопланктона в середине июля [40].

Fig. 11. Results of 3D-modelling.

- a* — current velocity field in mid-April; *б* — spatial distribution of total phosphorus concentration in mid-July; *в* — spatial distribution of sediment particle concentration in mid-July;
- г* — spatial distribution of phytoplankton primary production in mid-July [40].

концентрацией основных биогенных элементов (азота и фосфора), биомассой фитопланктона, процессами первичного продуцирования и т.д. [9, 40].

Как следует из результатов 3D-моделирования, формирование полей течений в Чудско-Псковской озерной системе характерно для больших мелководных озер умеренных широт (рис. 11 *a*). В подледный период течения в обоих озерах системы в основном носят бароклинный характер, обусловленный неравномерным

распределением плотности воды по пространству. Максимальные скорости невелики, примерно 1,5—2,0 см/с в наиболее мелководных прибрежных районах. С окончанием периода ледостава в апреле—мае основным фактором, влияющим на течения, становится ветер. В озерах (особенно в Чудском) наблюдается частая смена антициклонической циркуляции на циклоническую и наоборот. Пространственное распределение фосфора в Псковском озере определяется двумя процессами — циркуляцией водной массы в Чудском озере и «разбавляющим» влиянием стока р. Великой (рис. 11 б).

В период ледостава взмучивание донных отложений практически отсутствует. Наиболее активно ресуспензия донных осадков протекает в летний период, когда оба озера достаточно часто перемешиваются до дна (рис. 11 в). В период осеннего охлаждения процесс ресуспензии теряет свою интенсивность. Особенно это заметно в Чудском озере. Процессы первичного продуцирования (ПП) в Чудско-Псковском озере также, как и ресуспензия, лимитируются продолжительностью ледостава. Сразу после вскрытия Псковского озера резко возрастает поток фотосинтетически активной радиации на поверхность озера. В условиях отсутствия биогенного лимитирования в нем начинает активно развиваться фитопланктон. 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. 11 г).

Результаты расчетов внутренней фосфорной нагрузки на Чудско-Псковское озеро свидетельствуют о том, что гидродинамические процессы являются важнейшим фактором формирования внутренней биогенной нагрузки. Биогенная нагрузка минимальна в зимний период, когда гидродинамические процессы протекают подо льдом с минимальной интенсивностью. В период открытой воды, когда ветровое и волновое воздействие на поверхность донных отложений резко возрастает, внутренняя биогенная нагрузка принимает свои максимальные значения. 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. Как следует из результатов расчетов, 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 среднесезонным 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 [9, 40].

Представленные результаты моделирования и вычислительного эксперимента гораздо шире той информации, которая может быть получена на основе данных контактного мониторинга, который выполняется в Российской и в Эстонской частях акватории озерной системы.

4. Оценка и прогноз стока и выноса биогенных элементов с водосбора Онежского озера

Объектом исследования в данной работе является Онежское озеро — второе по величине пресноводное озеро Европы, испытывающее антропогенное влияние вследствие поступления сточных вод, сельско- и лесохозяйственной деятельности на его водосборе, развития форелеводства и поступления веществ со свалок и селитебных территорий [41]. Еще в прошлом десятилетии по содержанию общего фосфора озеро достигло верхней границы для олиготрофных водоемов [42]. Онежское озеро и его крупнейший приток Илекса — Водла является верхним звеном самой большой европейской озерно-речной системы Невы. Озеро дренирует значительную территорию различную по геологическому строению, рельефу, орографии и гидрографии. Бассейн Онежского озера вытянут в широтном направлении и асимметричен: озеро делит его на две неравные части: западную (64 %) и восточную (36 %), что определяет неравномерность времени добегаания воды для разных притоков (рис. 12).

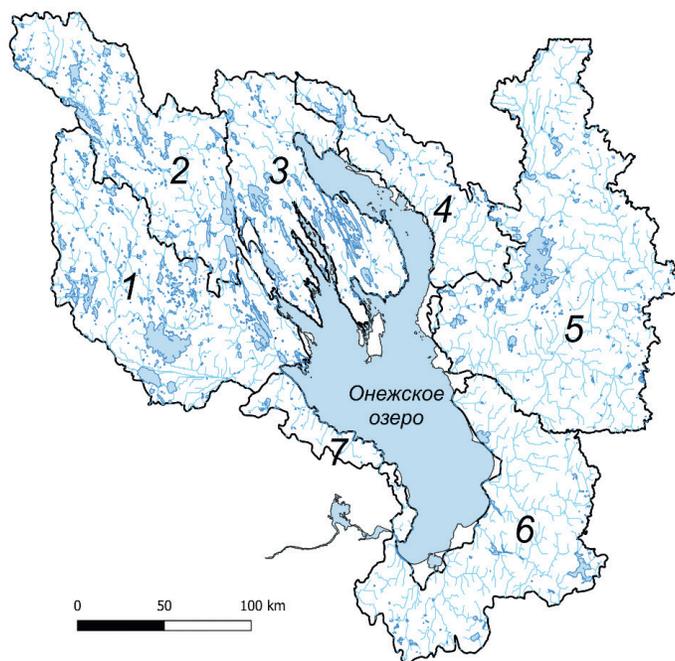


Рис. 12. Гидрографическая структура бассейна Онежского озера: водосборы рек Шуи (1) и Суны (2), Заонежье (3), водосборы восточных притоков (4), реки Водлы (5), южных (6) и западных притоков (7).

Fig. 12. Hydrographic structure of the Onega Lake basin: catchments of the Shuya (1) and Suna (2) rivers, Zaonezhye (3), catchments of eastern tributaries (4), Vodla (5), southern (6) and western tributaries (7).



Рис. 13. Схема модели формирования стока с водосбора Онежского озера, выноса биогенных элементов и биогенной нагрузки на водные объекты.

Fig. 13. Schematic diagram of the model of flow formation from the catchment, nutrient removal and nutrient load on water bodies.

Основным инструментом решения поставленной задачи явилась модель формирования стока с водосбора, выноса биогенных элементов и формирования биогенной нагрузки на водные объекты, разработанная в Институте озераведения РАН и модифицированная при участии сотрудников Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [41, 42]. Схема модели представлена на рис. 13.

Для оценки последствий воздействия возможных климатических изменений на вынос азота и фосфора с водосбора Онежского озера использованы результаты моделирования стока с использованием двух RCP-сценариев [43]. Сценарии RCP 2.6 и RCP 8.5 (аналоги сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5, упомянутых выше) — это лучший и худший, с точки зрения воздействия на окружающую среду, сценарии эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу в будущем. Сценарий RCP 2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали

неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. В сценарии RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего XXI в. теми же темпами, что и сейчас. Результаты расчетов стока, а также выноса общего фосфора с водосбора Онежского озера при реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 проиллюстрированы на примере трех основных подбассейнов — водосборов рек Суны, Шуи и Водлы на рис. 14.

Количественная оценка возможного изменения стока и соответствующих изменений выноса фосфора и азота (%) с изучаемых водосборов при условии реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 для периода 2022–2050 гг. представлена в табл. 1. Изменения расхода воды, выноса азота и фосфора по сравнению с наблюдаемыми данными рассчитывались относительно 2021 года с использованием линейных аппроксимационных зависимостей, полученных методом наименьших квадратов. Так как аппроксимация проводилась линейным трендом, для сравнения наблюдаемых и прогнозируемых значений достаточно двух точек, показывающих максимальную разницу изменений. В качестве таких значений были выбраны точка в начале прогнозного периода (2022 г.) и в его конце (2050 г.). Разница между значениями отношения наблюдаемых значений 2021 г. к прогнозируемым в 2022 г. и наблюдаемых значений 2021 г. к прогнозируемым в 2050 г. показывает прогностическое изменение расходов воды, выноса азота и фосфора по моделям RCP 2.6 и RCP 8.5 по сравнению с последними наблюдаемыми значениями.

Таблица 1

Рассчитанные изменения стока и соответствующие изменения выноса фосфора и азота (%) с изучаемых водосборов при условии реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 для периода 2022—2050 гг.

Calculated changes in runoff and corresponding changes in phosphorus and nitrogen export (%) from the study catchments under RCP 2.6 and RCP 8.5 climate scenarios for the period 2022—2050

Объекты	Расход воды		Вынос P		Вынос N	
	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
р. Суна	-19,60	10,01	-10,49	2,25	-34,95	17,74
р. Шуя	-14,91	14,59	-15,10	14,55	-14,51	13,97
р. Водла	-15,58	20,25	-13,12	16,64	-17,70	22,46

Видно, что реализация «лучшего» сценария антропогенного воздействия на окружающую среду (RCP 2.6) на всех объектах может привести к повсеместному снижению биогенной нагрузки на озеро со стороны основных притоков за счет снижения стока, которое составит 10,5—15,1 % по фосфору и 14,5—40,0 % по азоту относительно выноса 2021 г. При реализации экологически неблагоприятного сценария (RCP 8.5) следует ожидать увеличения стока и соответствующего увеличения выноса фосфора на 2,3—16,6 % и азота на 14,0—22,5 %.

На основе результатов выполненных расчетов был сделан вывод о том, что скорее всего ситуация с изменением климата в результате деятельности человека

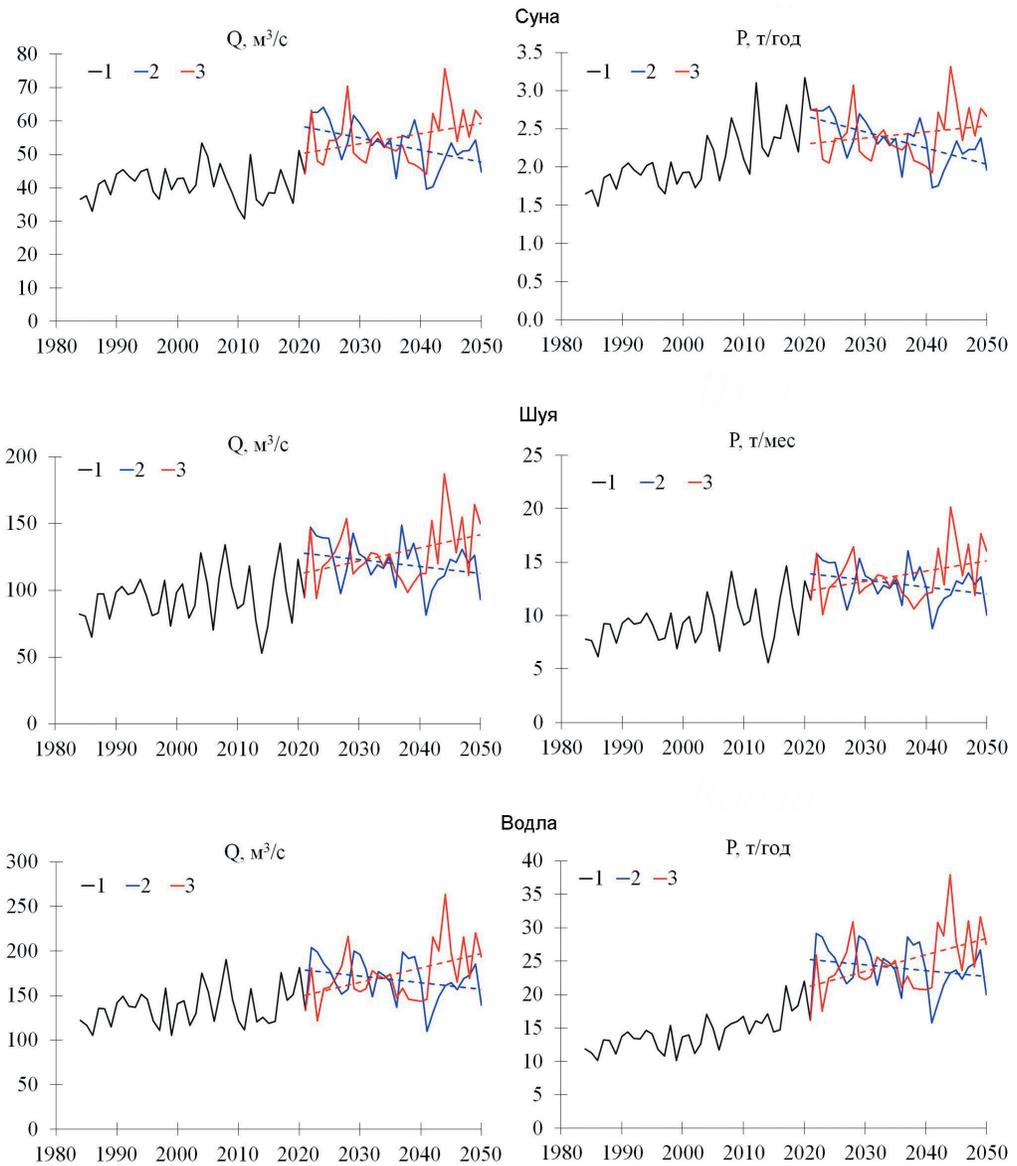


Рис. 14. Расход воды Q рек Суна, Шуя и Водла и вынос общих форм фосфора P для периода 1984—2021 гг. (1) и их прогностические оценки на период 2022—2050, рассчитанные по сценариям RCP 2.6 (2) и RCP 8.5 (3).

Fig. 14. Water discharge Q of the rivers Suna, Shuya and Vodla and removal of total phosphorus P for the period 1984—2021 (1) and their forecast estimates for the period 2022—2050 calculated under RCP 2.6 (2) and RCP 8.5 (3) scenarios.

будет протекать по некоему промежуточному сценарию: с одной стороны, человечество предпринимает значительные усилия по снижению выбросов в атмосферу, с другой — едва ли удастся даже к концу XXI в. достигнуть абсолютного внедрения «зеленых технологий» во все сферы хозяйственной деятельности на всей планете. Следовательно, прогностическая оценка последствий климатических изменений будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящей работе по двум экстремальным сценариям.

В то же время, как отмечено в работе [42], составление каких-либо оценок и прогнозов развития социально-экономической деятельности человека на перспективу до 2100 г. является весьма неблагоприятным занятием. Как упоминалось выше, ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию между двумя крайними сценариями, рассмотренными в этой работе. Поэтому прогностическая оценка изменений стока и биогенной нагрузки на озеро будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящем исследовании по экстремальным сценариям.

5. Детерминированно-стохастическое (ДС) моделирование биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро

Для моделирования биогенной нагрузки задействована система моделей, состоящая из стохастического генератора метеоэлементов, а также моделей формирования стока ПЛНМ и биогенной нагрузки ПЛЛМ [9, 40]. В рассматриваемой задаче ДС моделирование является средством получения параметров распределения искомым характеристикам при недостатке данных натуральных наблюдений. Стохастический генератор метеоэлементов (стохастическая модель погоды), схема которого представлена на рис. 15, генерирует ряды метеоэлементов требуемой длины и обеспечивает, таким образом, последующие детерминированные блоки модели входной информацией, заменяющей недостающие данные натуральных наблюдений [23].

Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что в основном ряды измеренных метеорологических параметров, по которым происходит настройка модели погоды, существенно более продолжительны, чем ряды наблюдений за гидрологическими и гидрохимическими характеристиками водосборов и водоемов. ДС моделирование формирования биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской территории водосбора проводилось по следующим основным этапам:

1. Оценка параметров стохастического генератора метеоэлементов для наблюдаемых рядов метеорологических элементов в изучаемом регионе (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков, факт выпадения осадков) по данным наблюдений на метеостанции Псков.

2. Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой длины (500 – 1000 лет) с параметрами, соответствующими современным климатическим условиям.

3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.



Рис. 15. Схема стохастического генератора метеоэлементов (стохастической модели погоды) [8].

Fig. 15. Schematic diagram of the stochastic generator of meteorological elements (stochastic weather model) [8].

4. Моделирование месячных слоев стока с водосбора реки Великой по детерминированной модели формирования стока ПЛМ.

5. Построение кривой распределения значений слоя стока с изучаемого водосбора в современных климатических условиях. Оценка параметров распределения слоя стока (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

6. Пересчет среднемесячных значений слоя стока в среднегодовые значения.

7. Моделирование среднегодового выноса биогенных веществ с Российской части водосбора Чудско-Псковского озера (с учетом составляющих) по детерминированной модели формирования нагрузки ПЛМ.

8. Построение кривой распределения значений выноса биогенных веществ с изучаемого водосбора. Оценка параметров распределения среднегодового выноса биогенных веществ с водосбора (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

Итогом ДС-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 современных условиях.

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. 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 (LP_{np} и LN_{np}) и природной (LP_{nat} и LN_{nat}) составляющих биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озера с Российской части водосбора: среднее (X_{cp}), среднее квадратичное отклонение (σ), значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % ($X_{\%}$).

Distribution parameters of calculated annual runoff H , dispersed (LP_{nat} и LN_{nat}) and natural (LP_{nat} и LN_{nat}) components of nutrient load on Lake Peipus from the Russian part of the catchment area: mean (X_{cp}), mean square deviation (σ), probability values of 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	57,02	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	13239	11870	9898	7200	5228	3859
LN_{nat} , т/год	3573	841	5533	4961	4136	3010	2185	1613

Иного пути получения параметров распределения слоев стока, биогенной нагрузки на озеро и её составляющих в условиях крайнего дефицита данных натурных наблюдений просто нет. ДС-моделирование, безусловно, является одним из очень эффективных механизмов выхода за пределы доступных в настоящее время контактных методов измерения гидрологических и гидрохимических параметров водных объектов. Не оцениваемые ранее значения биогенной нагрузки различной обеспеченности ориентированы, прежде всего, на решение задач планирования мероприятий по снижению поступления биогенных веществ в Чудско-Псковское озеро из различных источников, расположенных на территориях неконтролируемых системой государственного мониторинга. Наличие информации не только о среднем уровне нагрузки, но также ее значениях в различные по водности годы,

позволяет существенно расширить область применения математических методов при регламентировании хозяйственной деятельности на водосборе, избежать интенсивного поступления биогенных веществ в водные объекты, снизить скорость их антропогенного эвтрофирования [8].

Заключение

Количество практических задач, решенных на основе имитационных и прогностических расчетов с использованием компонентов модельной системы ИНОЗ РАН, не ограничивается приведенными выше примерами. В частности, в работах [8, 9, 40] представлены прогностические оценки возможных изменений стока и выноса фосфора под воздействием климатических факторов для водосборов малых водных объектов, расположенных на частном водосборе Финского залива, к числу которых относятся Дудергофские озера и водохранилище Сестрорецкий Разлив. Возможные климатические изменения, приводящие к снижению водности, повлекут за собой уменьшение твердого стока притоков и, как следствие, снижение заиления Сестрорецкого Разлива. Выполнена оценка возможного снижения биогенной нагрузки и выноса азота и фосфора с российской части водосбора р. Иртыш за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) ведения сельскохозяйственного производства. Показано, что наибольшее снижение сельскохозяйственной биогенной нагрузки в результате внедрения НДТ может быть достигнуто на российской части водосбора р. Тобол. С использованием той же 2D-модели, адаптированной к условиям озера Неро, проведены численные эксперименты с целью оценки возможных последствий реализации нескольких проектных решений, имеющих целью улучшение водообмена и оздоровления озера Неро. Показано, что 3D-модель позволяет воспроизводить пространственно-временную неоднородность распределения гидрофизических и химико-биологических параметров в Куйбышевском водохранилище, где при отсутствии лимитирования развития фитопланктона биогенными элементами особое влияние оказывают другие факторы, включая температуру воды. Кроме того, во многих других задачах вычислительный эксперимент, имитационное и прогностическое моделирование успешно использовано для получения важных научных и практических результатов, выходящих за рамки возможных натуральных измерений.

Список литературы

1. Гидрометцентр России 2025: Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/53-strategy-2030/3332--1-3>(дата обращения: 27.01.2025).
2. Модернизация системы гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания в акватории Северного морского пути: Электронный ресурс. Режим доступа: <http://council.gov.ru/media/files/AR2IwjJhAAWfAq40NK5xRSQg7r1kGty.pdf> (дата обращения: 27.01.2025).
3. Самарский А. А. Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент // Коммунист. 1983. №18. С. 31—42.
4. Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 255 с.
5. He H. S., Larsen D. R., Mladenoff D. J., et al., Exploring component-based approaches in forest landscape modeling. *Environmental Modeling & Software*. 2002. Vol. 17(6). P. 519—529.

6. Антонов А.С. Введение в параллельные вычисления (методическое пособие). М.: Изд-во МГУ, 2002. 69 с.
7. Veryard R. The Component-based Business: Plug And Play. Gateshead: Athenaecum Press, 2001. 216 p.
8. Кондратьев С. А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор—водоток—водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
9. Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С. Опыт моделирования в Институте озераедения / 80 лет развития лимнологии в Институте озераедения Российской академии наук. М.: Изд-во РАН, 2023. С. 202—222.
10. Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Родионов В. З., Шмакова М. В. Особенности формирования испарения в различных по возрасту, условиям произрастания и продуктивности лесах // Гидрометеорология и экология (Ученые записки РГГМУ). 2020. № 1. (58). С. 49—67. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-49-67.
11. Шмакова М. В. Речные наносы и почвенная эрозия: методы и модели. М.: ИНФРА-М, 2024. 292 с.
12. Шмакова М. В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Издательство «ЛЕМА», 2013. 142 с.
13. Игнатьева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме / Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука. 2002. С. 148—157.
14. Игнатьева Н. В. Оценка потоков фосфора в пограничной зоне осадков – вода в Псковско-Чудском озере // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 71 —78.
15. Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling / Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters. University of Granada, Spain, 2006. P. 209—215.
16. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental Modelling & Software. 2010. Vol. 25 (6). P. 793—801.
17. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal environ. Res. 2010. Vol. 15. P. 218—230.
18. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environmental Modelling & Software. 2011. Vol. 26 (5). P. 683—684.
19. Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A. et al. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes / Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters. Warnemunde, Germany, 2007. P. 147—156.
20. Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: Изд-во «ГЕОС», 2008. 127 с.
21. Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А. и др. 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.
22. Мотовилов Ю. Г., Голосов С. Д., Даценко Ю. С. и др., Информационно-моделирующий комплекс для оценки гидроэкологического состояния водохранилищ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47(5). С. 567—578.
23. Шмакова М. В. Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: специальность 11.00.07/ автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. ГТИ. Санкт-Петербург. 2000. 25 С.
24. Румянцев В. А., Кондратьев С. А., Капотова Н. И. и др. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 93 с.
25. Измайлова А. В. Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5—14.
26. Зверев И. С., Голосов С. Д., Кондратьев С. А. и др., Методика дистанционной оценки характеристик неизученных озер материковой части российской тундры // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2023. Т. 511(2). С. 120—126. DOI: 10.31857/S2686739723600650.
27. Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S. et al. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia). Limnology and Freshwater Biology. 2024. №6. P. 1380—1398. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1380.

28. Балащенко М. И. Транзитно-аккумуляционные особенностей озер Якутии / Диссертация на соискание степени к.г.н. СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена. 2016. 130 с.
29. Global Surface Water Explorer 2021. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://global-surface-water.appspot.com> (дата обращения 27.01.2024).
30. Copernicus Global Climate Report 2024. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.copernicus.eu/en> (дата обращения 27.01.2024).
31. Mironov D. V. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model. COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service. 2008. 44 P.
32. Карты прогнозов модели COSMO 2025. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (дата обращения 27.01.2024).
33. ERA5 2023. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://confluence.ecmwf.int/display/СКВ/ERA5> (дата обращения 27.01.2025).
34. IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 2391 p.
35. Семенов С. М., Гладильщикова А. А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т8 (1). С. 75—106.
36. Объект накопленного экологического вреда полигон токсичных отходов «Красный Бор». Докл. ЭПЦ «БЕЛЛОНА». СПб.: АНО содействия охране окружающей среды «Экспертно-правовой центр ЭкоПраво», 2020. 87 с.
37. Сольский С. В., Герасимова Е. В., Дубровская Н. В. и др. Практика рекультивации полигона промышленных токсичных отходов ГУПП «Полигон Красный бор» // *Изв. ВНИИГ*. 2009. Т. 253. С. 62—72.
38. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 288 с.
39. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Распространение загрязнения в русле реки Невы в результате возможной аварийной ситуации на полигоне токсичных отходов Красный Бор // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49(6). С. 728—738. DOI: 10.31857/S0321059622060074.
40. Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Голосов С. Д. и др. Моделирование в озероведении. Опыт ИНОЗ РАН // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 65. С. 607—647. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647.
41. Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Оглуздин А. С. Методика расчета диффузной нагрузки азота, фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности // *Сборник материалов XVII Международного экологического форума «День Балтийского моря»*. СПб., 2016. С. 17—19.
42. Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В. и др. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // *Труды Карельского научного центра*. Лимнология. 2016. №5. С. 35—52.
43. Кондратьев С. А., Брюханов А. Ю., Шмакова М. В. и др. Оценка возможных изменений биогенной нагрузки на Онежское озеро под воздействием антропогенных и климатических факторов // *Водные ресурсы*. 2024. Т. 51 (3). С. 157—169. DOI: 10.31857/S0321059624030056.
44. Сабылина А. В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965—2008 годах // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2016. № 9. С. 68—77.
45. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Воздействие будущих климатических изменений на сток с водосбора Онежского озера // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2022. № 6. С. 41—49. DOI: 10.17076/lim1581.

References

1. Hydrometeorological Centre of Russia 2025. Electronic resource. Access mode: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/53-strategy-2030/3332--1-3> (date of access: 27.01.2025).

2. Modernisation of the system of hydrometeorological support of navigation safety in the waters of the Northern Sea Route: Electronic resource. Access mode: <http://council.gov.ru/media/files/AR2Iwj-p-JhAAWfAq40NK5xRSQg7r1kGty.pdf> (date of access: 27.01.2025).
3. Samarskiy A. A. Modern applied mathematics and computational experiment. *Kommunist = Communist*. 1983; (18): (31—42). (In Russ.).
4. Kondratyev S. A. *Formirovaniye vneshnei nagruzki na vodoyemi: problemi modelirovaniya = Formation of an external load on water bodies: modelling problems*. SPb.: Nauka, 2007: 255 p. (In Russ.).
5. He H. S., Larsen D. R., Mladenoff D. J. et al. Exploring component-based approaches in forest landscape modelling. *Environmental Modelling & Software*. 2002; 17(6): 519—529.
6. Antonov A. S. *Vvedeniye v parallel'nyye vychisleniya (metodicheskoye posobiye) = Introduction to parallel calculations (methodical manual)*. Moscow: MSU Publ., 2002: 69 p. (In Russ.).
7. Veryard R. *The Component-based Business: Plug And Play*. Gateshead: Athenaem Press, 2001: 216 p.
8. Kondratyev S. A., Shmakova M. V. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v sisteme vodosbor-vodotok-vodoyem = Mathematical modelling of mass transfer in the system catchment — water-course — water body*. SPb.: Nestor-Istoria Publ., 2019: 246 p. (In Russ.).
9. Kondratiev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S. Modelling experience at the Institute of Lake Science/ 80 years of limnology development at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. Moscow: RAS Publ., 2023: 202—222. (In Russ.).
10. Karpechko Yu. V., Kondratyev S. A., Rodionov V. Z., Shmakova M. V. Features of evaporation formation in different in age, growing conditions and productivity forests. *Gidrometeorologia I ecologia = Hydrometeorology and Ecology*. 2020. 1(58): (49—67). DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-49-67 (In Russ.)
11. Shmakova M. V. *Rechniye nanosi i pochvennaya erosiya: metodi i modeli = River sediment and soil erosion: methods and models*. M.: INFRA-M, 2024: 292 p. (In Russ.).
12. Shmakova M. V. *Teoriya i practica modelirovaniya rechnih potokov = Theory and practice of mathematical modelling of river flows*. SPb.: LEMA Publ., 2013: 142 p. (In Russ.).
13. Ignatieva N. V. Role of bottom sediments in phosphorus cycling in the lake ecosystem. *Ladoga Lake — past, present, future*. SPb.: Nauka, 2002:(148—157). (In Russ.).
14. Ignatieva N. V. Estimation of phosphorus fluxes in the sediment-water boundary zone in Lake Pskov-Chudskoe. *Ucheniye zapiski RGGMU = Scientific Notes of RSHU*. 2014; (34):(71—78). (In Russ.).
15. Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling. *Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters*. University of Granada, Spain, 2006. P. 209—215.
16. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software*. 2010; 25 (6): 793—801.
17. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res*. 2010; 15: 218—230.
18. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software*. 2011; 26(5): 683—684.
19. Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., et al. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes. *Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters*. Warnemunde, Germany, 2007: 147—156.
20. Ibraev R. A. *Matematicheskoye modelirovanie termogidrodinamicheskikh processov v Kaspiyskom more = Mathematical modelling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea*. Moscow: GEOS Publ., 2008: 127 p. (In Russ.).
21. Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A. et al. Assessment of the influence of the main tributaries of Lake Ladoga on the formation of the water mass of the Petrokrepost Bay (source of the Neva River) based on the results of mathematical modelling. *Proceedings of the 1st International Conference 'Eurasia Lakes: Problems and Solutions'*. Petrozavodsk, 2017: 228—233. (In Russ.).
22. Motovilov Yu. G., Golosov S. D., Datsenko Y. S. et al. Information-modelling complex for assessment of hydroecological state of reservoirs. *Vodniye Resursi = Water Resources*. 2020; 47(5): (567—578). (In Russ.).
23. Shmakova M. V. *Stokhasticheskaya model pogody v sisteme deterministicheskoye-stokhasticheskoye modelirovaniya characteristic stoka: specialnost 11.00.07 = Stochastic weather model in the system*

- of deterministic-stochastic modelling of runoff characteristics: speciality. 11.00.07. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. GGI, St. Petersburg. 2000: 25 p. (In Russ.).*
24. Rumyantsev V. A., Kondratyev S. A., Kapotova N. I., Livanova N. A. *Opit razrabotki i primeneniya matematicheskikh modeley basseynov malih rek = Experience of development and application of mathematical models of small river basins*. L.: Gidrometeoizdat. 1985: 93 p. (In Russ.).
 25. Izmailova A. V. Water resources of lakes in the Russian Federation. *Geografya i prirodnye resursi = Geography and Natural Resources*. 2016; (4): (5—14). (In Russ.).
 26. Zverev I. S., Golosov S. D., Kondratyev S. A., Rasulova A. M. Methodology of remote assessment of the characteristics of unstudied lakes of the mainland Russian tundra. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2023; 511(2): (120—126). DOI: 10.31857/S2686739723600650. (In Russ.).
 27. Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S. et al. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia). *Limnology and Freshwater Biology*. 2024; (6):1380—1398. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1380.
 28. Balatsenko M. I. *Transitno-akkumulacionniye osobennosti ozer Yakutii = Transit-accumulation features of lakes in Yakutia. Dissertation for the degree of Candidate of Geological Sciences*. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A. I. Herzen, 2016: 130 p. (In Russ.).
 29. Global Surface Water Explorer 2021. Electronic resource. Access mode: <https://global-surface-water.appspot.com> (date of access 27.01.2024).
 30. Copernicus Global Climate Report 2024. Electronic resource. Access mode: <https://www.copernicus.eu/en> (date of address 27.01.2024).
 31. Mironov D. V. *Parameterisation of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model*. COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service. 2008: 44 p.
 32. COSMO 2025 model forecast maps. Access mode: <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (accessed 27.01.2024).
 33. ERA5 2023. Electronic resource. Access mode: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (accessed 27.01.2025).
 34. *IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021: 2391.
 35. Semenov S. M., Gladilshchikova A. A. Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the XXI century. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya = undamental and Applied Climatology*. 2022; 8 (1): (75—106). (In Russ.).
 36. *Object of the accumulated environmental damage of the toxic waste landfill 'Krasny Bor'*. Report of ELC 'BELLONA'. SPb.: Autonomous Nonprofit Organization for Environmental Protection 'Expert Legal Centre "EcoPravo". 2020: 87 p. (In Russ.).
 37. Solskiy S. V., Gerasimova E. V., Dubrovskaya N. V. et al. Practice of reclamation of the landfill of industrial toxic waste GUPP 'Polygon "Krasny Bor"'. *Izv. VNIIG=VNIIG Rep*. 2009; (253): (62—72). (In Russ.).
 38. *Methodical bases of assessment and regulation of anthropogenic impact on surface water quality*. L.: Gidrometeoizdat. 1987: 288 p. (In Russ.).
 39. Kondratyev S. A., Shmakova M. V. Distribution of pollution in the Neva River bed as a result of a possible emergency situation at the toxic waste landfill Krasny Bor. *Wodniye Resursi = Water Resources*. 2022; 49(6): (728—738). DOI: 10.31857/S0321059622060074. (In Russ.).
 40. Kondratyev S. A., Shmakova M. V., Golosov S. D. et al. Modeling in Limnology. Experience of IL RAS. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (65): (607—647). DOI: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647. [In Russ.].
 41. Brukhanov A. Yu., Kondratyev S. A., Ogluzdin A. S. Methodology of calculation of diffuse nitrogen, phosphorus load to the catchment under agricultural activities. *XVII International Environmental Forum 'Baltic Sea Day'*. SPb, 2016:(17—19). (In Russ.).
 42. Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Y. V. et al. Nutrient load on Lake Onega according to field observations. *Trudi Karelskogo Nauchnogo Centra RAN. Limnologia i oceanologia = Proceedings of the Karelian Scientific Centre RAS. Limnology and Oceanology*. 2016; (5): (35—52). (In Russ.).

43. Kondratyev S. A., Brukhanov A. Yu., Shmakova M. V. et al. Assessment of possible changes in the biogenic load on Lake Onega under the influence of anthropogenic and climatic factors. *Wodniye Resursi = Water Resources*. 2024; 51(3): (57—169). DOI: 10.31857/S0321059624030056. (In Russ.).
44. Sabylina, A. V. Input into Onega Lake of organic carbon, total phosphorus and total nitrogen with river runoff and removal with the waters of the Svir River in 1965—2008. *Trudi Karelskogo Nauchnogo Centra RAN. Limnologia i oceanologia = Proceedings of the Karelian Scientific Centre RAS, Limnology and Oceanology*. 2016; (9): (68—77). (In Russ.).
45. Kondratyev S. A., Shmakova M. B. Impact of future climatic changes on runoff from the catchment of Lake Onega. *Trudi Karelskogo Nauchnogo Centra RAN. Limnologia i oceanologia = Proceedings of the Karelian Scientific Centre RAS, Limnology and Oceanology*. 2022; (6): (41—49). DOI: 10.17076/lim1581. (In Russ.).

Информация об авторе

Кондратьев Сергей Алексеевич, доктор физико-математических наук, Институт озераведения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, 3718470@gmail.com.

Information about author

Sergey A. Kondratyev, doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher Institute of Limnology RAS – separate structural subdivision of St. Petersburg Federal Research Centre of RAS, chief scientist, head of laboratory.

Статья поступила 14.01.2025

Принята к печати 16.02.2025

The article was received on 14.01.2025

The article was accepted on 16.02.2025