

## ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.013

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ВОДОСБОР – ВОДОТОК – ВОДОЕМ»

**С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова, С. Д. Голосов, И. С. Зверев**

*Институт озераведения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Россия*

Цель исследования: создание системы моделей, описывающих процессы тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем» и обеспечивающих выполнение вычислительного эксперимента по оценке возможного воздействия на состояние водных объектов хозяйственной деятельности и изменений климата. Методы: компоновка модели водной системы с использованием разработанных и отлаженных моделей процессов выполняется в соответствии со следующими определяющими факторами: 1) требованиями поставленной задачи; 2) особенностями строения объекта исследования; 3) наличием и размещением пунктов измерительной сети, являющихся источником исходной информации для моделирования; 4) возможностями потребителя при реализации модели. Результаты: в состав разработанной системы моделей входят семь детерминированных моделей и одна стохастическая. К числу детерминированных относятся модель формирования стока на водосборе *ILHM*, модель выноса химических веществ с водосбора *ILLM*, модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D), 1D-модель теплового режима и перемешивания водоема *FLake*, 1D-модель динамики неконсервативной примеси в водоеме *FLakeEco*, 2D-модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме, 3D-модель тепло- и массопереноса в водоеме. Стохастической компонентой системы является модель погоды *SWM*, представляющая собой стохастический генератор метеоэлементов с заданными характеристиками.

Ключевые слова: система моделей; водосбор; водоток; водоем; антропогенное воздействие; климатические факторы.

**S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova, S. D. Golosov, I. S. Zverev.**  
**MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE “CATCHMENT – WATERCOURSE – RESERVOIR” SYSTEM**

Objective: Development of a system of models describing the processes of heat and mass transfer in the “catchment – watercourse – reservoir” system and enabling the assessment of the impact of economic activity and climate change on the state of bodies of water. Methods: A water system model is configured using the newly developed and working models of processes in accordance with the determining factors: 1) the requirements

of the task; 2) structural features of the research object; 3) the presence and locations of the observation network points as a source of input information for modeling. Results: The resultant system of models includes seven deterministic and one stochastic models. The deterministic models are the model of water runoff from the catchment *ILHM*, model of chemicals removal from the catchment *ILLM*, model of water flow, sediment transport and dissolved impurities in an open channel (1D, 2D, 3D), 1D model of reservoir's thermal regime and mixing *FLake*, 1D model of non-conservative impurity dynamics in reservoir *FLakeEco*, 2D model of currents and sediment transport in a shallow reservoir, 3D model of heat and mass transfer in reservoir. The stochastic component of the system is the *SWM* weather model, which is a stochastic generator of meteorological elements.

**Key words:** model system; catchment; watercourse; reservoir; anthropogenic impact; climatic factors.

Необходимым условием создания информационно-управляющей системы охраны и рационального использования ресурсов водных объектов является наличие инструментов (математических моделей), позволяющих количественно оценивать процессы, происходящие в реках, водоемах и на их водосборах, а также прогнозировать последствия воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях, выходящих за рамки возможного натурного изучения. В настоящей работе представлены результаты развития основ математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем», а также примеры практической реализации разработанных моделей, обеспечивающих выполнение вычислительного эксперимента по оценке возможного воздействия хозяйственной деятельности и изменений климата на состояние водных объектов.

Опыт предшествующих исследований [Румянцев и др., 1985] показывает, что для успешного решения разнообразных задач, связанных с моделированием процессов на водосборах, водотоках и водоемах, специалист должен иметь в своем распоряжении систему моделей, которые описывают сток и вынос взвешенных и растворенных веществ с водосбора, их перенос и трансформацию в гидрографической сети и в водоеме, принимающем сток. В данном случае уместно говорить о модельной системе, объединяющей модели перечисленных выше процессов, которые могут работать как в комплексе, так и самостоятельно. Построение модели сложной системы с использованием разработанных и отлаженных компонентов выполняется в соответствии со следующими определяющими факторами: 1) требованиями поставленной задачи; 2) особенностями строения объекта исследования; 3) наличием и размещением пунктов измерительной сети, явля-

ющихся источником исходной информации для моделирования; 4) возможностями потребителя при реализации модели [Румянцев и др., 1985]. Существенно расширить возможности моделирования процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем» удастся за счет привлечения детерминированно-стохастического (ДС) подхода, основанного на применении как детерминированных, так и стохастических компонентов в рамках единой системы моделей.

На сегодняшний день разработана и успешно используется ДС система моделей, ориентированная на количественную оценку процессов, происходящих в водных объектах и на их водосборах, а также на прогнозирование последствий воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений (рис. 1).

Компоненты системы могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее практического применения. Их краткое описание представлено ниже.

**Модель формирования стока на водосборе *ILHM*** предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора. Модель описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей площади [Becker, Pftzner, 1987; Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2010; Кондратьев, Шмакова, 2019].

**Модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект *ILLM*** предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной



Рис. 1. Структура системы моделей для оценки процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоток – водоем»

Fig. 1. The structure of the system of models for assessing the processes of heat and mass transfer in the "catchment – watercourse – reservoir" system

точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. Разработана с ориентацией на решение задач по оценке выполнения рекомендаций HELCOM по снижению нагрузки на Балтийское море [Guidelines..., 2005]. Модель позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью [Behrendt, Dappowski, 2005; Кондратьев и др., 2011; Кондратьев, Шмакова, 2019; Kondratyev et al., 2020].

**Математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D)** предназначена для расчетов характеристик двухфазного неустановившегося движения в русле реки. Модель основана на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы». Модель позволяет проследить перемещение взвешенного и растворенного вещества по длине русла и оценить скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока [Шмакова, 2013; Кондратьев, Шмакова, 2019].

**1D-модель теплового режима и перемешивания водоема *FLake*** разработана сов-

местными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD). Предназначена для решения задач, связанных с расчетами термического режима в системе «снег – лед – вода – донные отложения» и условий перемешивания в период открытой воды. Модель служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в естественных и искусственных водоемах [Golosov et al., 2006, 2007; Kirillin et al., 2011].

**1D-модель динамики неконсервативной примеси в водоеме *FLakeEco*** способна описывать годовой цикл кислородного режима, сезонную динамику концентрации биогенных элементов, первичную продукцию фитопланктона, а также сезонную динамику общей биомассы фитопланктона, основана на параметрическом описании вертикального распределения концентрации растворенного кислорода в водной массе озера. Модель идейно и структурно является продолжением модели *FLake*, которая в данном случае выступает в роли гидротермодинамического блока [Terzhevik et al., 2007].

**2D-модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме** позволяет рассчи-

тивать не только пространственную структуру течений и траектории распространения примеси на акватории при различном ветровом воздействии и стоке с водосбора, но и вычислять изменения морфометрических характеристик ложа водоема. Модель основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов [Кондратьев, Шмакова, 2019].

**3D-модель тепло- и массопереноса в водоеме** основана на модели гидродинамики внутреннего моря, разработанной в Институте вычислительной математики РАН, дополненной биотическим блоком и адаптированной к озерным условиям. Модель позволяет исследовать термический и ледовый режимы крупных озерных систем в условиях среднеклиматических атмосферных воздействий и при возможных климатических изменениях. Модель является средством выполнения оценок изменений термогидродинамики озер, распространения вод притоков в акваториях, первичного продуцирования и внутренней нагрузки [Зверев и др., 2017; Motovilov et al., 2020].

**Стохастическая модель погоды SWM** является блоком генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных детерминированных моделей, входящих в моделирующую систему. Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы детерминированно-стохастического моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и тем более ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора и их транспорта в водоеме [Шмакова, Кондратьев, 2014; Кондратьев, Шмакова, 2019].

Ниже представлены примеры использования различных компонентов разработанной системы моделей при решении задач расчета траекторий распространения загрязненных вод притоков, поступающих в русло Невы перед городскими водозаборами, оценки эффективности проектов восстановления озера Неро, а также для расчета внешней биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро и выявления механизмов его загрязнения и эвтрофирования.

3D-модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле используется для оценки и прогноза распространения в русле р. Невы загрязняющих веществ, поступающих со стоком притоков. Река Ижора – один из наиболее загрязненных притоков Невы, расположенный выше водозабора Санкт-Петербурга. На водосборе Ижоры

находится одно из старейших промышленных предприятий России – Ижорские заводы, а также производственные фирмы «ТехноБалт», «Бахус», «Илком», «Энергобумпром», «Петролес», бумажная фабрика «Коммунар» и многие другие промышленные предприятия. В нижнем течении река принимает сток с полигона обезвреживания и захоронения токсичных отходов «Красный Бор», в могильниках которого находится около 2 млн тонн токсичных отходов I–V классов опасности. О возможной утечке с территории полигона, приводящей к загрязнению окружающей среды – расположенных вблизи полигона полей, рек и ручьев, а также атмосферы, стало известно еще в середине 90-х годов прошлого века. В настоящее время вода реки непригодна для купания, питья и рыбной ловли.

Перед проведением работ по моделированию проведен натурный эксперимент с целью выявления механизма распространения стоков Ижоры в русле Невы [Кондратьев и др., 2020]. В качестве индикатора распространения вод была использована общая минерализация (TDS) – интегральная характеристика водной массы, позволяющая достоверно различать воды Невы и воды притоков. TDS характеризует суммарное содержание всех найденных при химическом анализе воды минеральных веществ и определяет ее удельную электропроводность. Натурный эксперимент был проведен 14 июля 2019 г. в условиях средней водности реки Невы (расход воды 2500 м<sup>3</sup>/с). Измерения выполнялись *in situ* в 45 фиксированных точках, расположенных на акватории р. Ижоры, в том числе в ее устье, и в русле Невы. Измерения TDS проводились с использованием многоканального портативного анализатора Milwaukee (MW 802 pH/EC/TDSMeter), Eh – ОВП-метра San-XinORP-504. На рис. 2 (а) представлена схема распределения этих характеристик в исследуемом участке акватории.

На основе анализа результатов проведенного натурального эксперимента удалось показать, что воды одного из наиболее загрязненных притоков после поступления в русло Невы прижимаются основным течением реки к берегу и распространяются вдоль него в направлении течения. Влияние поперечной турбулентной диффузии на перемешивание водных масс крайне незначительно.

Расчеты переноса примеси в Неве с использованием разработанной модели выполнялись при среднем многолетнем значении расхода воды (2500 м<sup>3</sup>/с). Концентрация растворенной консервативной примеси при впадении Ижоры в Неву принималась равной 1, что позволяет провести последующий пересчет результатов

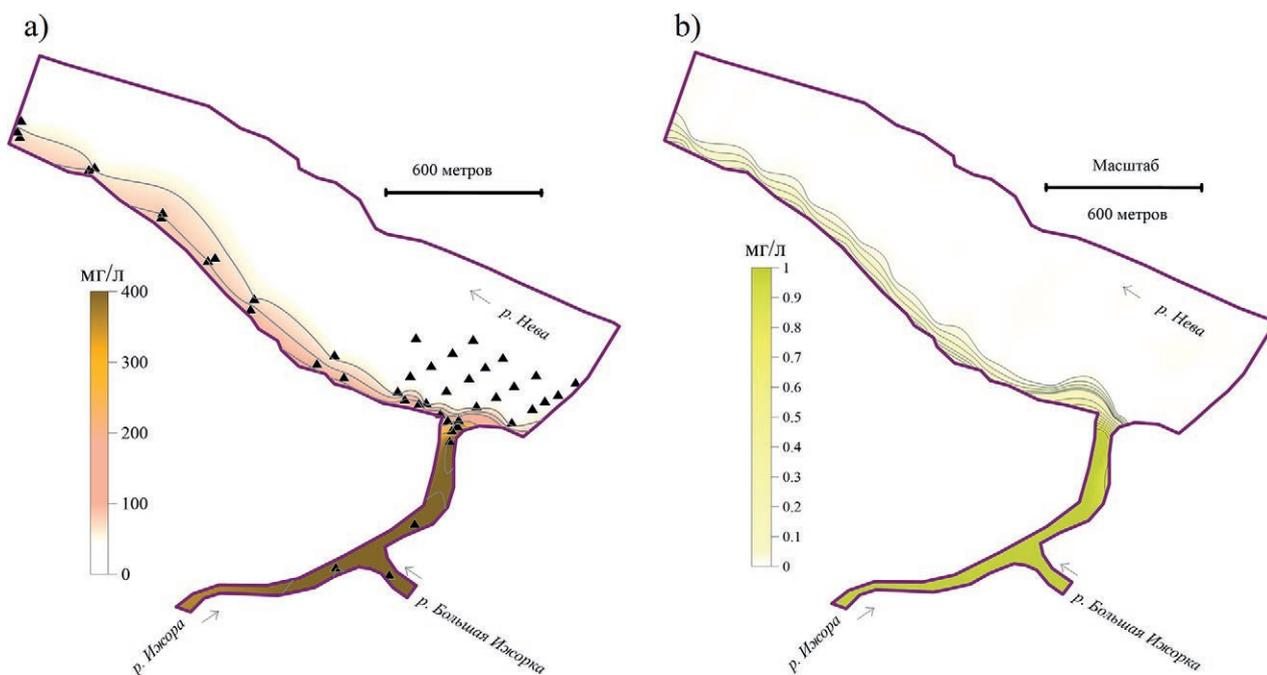


Рис. 2. Результаты натурного эксперимента по оценке общей минерализации в зоне смешения вод рек Ижоры и Невы 14.07.2019, ▲ – точки измерений (а); результаты расчета распространения примеси, поступившей в Неву со стоком Ижоры (б)

Fig. 2. Results of a field experiment to assess the total mineralization in the mixing zone of waters of the Izhora and Neva rivers on July 14, 2019, ▲ – measurement points (a); results of calculating the propagation of substances that entered the Neva with the Izhora runoff (b)

моделирования на любое конкретное значение концентрации. Фоновое значение концентрации примеси в Неве принималось равным нулю. Результаты расчетов, подтверждающие адекватность модели, представлены на рис. 2 (b) [Кондратьев и др., 2020].

В результате на настоящем этапе исследования показано, что через 4–5 часов после поступления примеси в основное русло Невы у ближайшего водозабора будет иметь место примерно семикратное разбавление вод Ижоры. Попадание растворенной примеси в конкретный водозабор будет определяться его конструкцией и расположением в акватории. В результате расчетов распространения твердых частиц-адсорбентов установлено, что поступившие со стоком притока наносы не достигнут первого по пути следования оголовка водозабора и осядут приблизительно в 0,5 км от устья Ижоры. Более детальная оценка попадания растворенной примеси в водозаборы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» может быть сделана после уточнения их расположения по ширине русла и глубине.

Озеро Неро – крупнейшее озеро Ярославского Поволжья. Средняя глубина озера составляет 1,5 м, площадь зеркала 54,5 км<sup>2</sup>. Неро является зарегулированным водоемом, единст-

венный сток из озера – р. Векса, перегородженная плотиной. Основной приток – р. Сара, впадающая в озеро с юга. На берегу озера расположен город Ростов Великий. В настоящее время устьевые участки рек, питающих озеро водой, заилены, замедлен озерный водообмен, ухудшены органолептические свойства и качественные характеристики водных масс, интенсивно идет процесс антропогенного эвтрофирования [Бикбулатов и др., 2003]. Для улучшения экологической ситуации в озере предложен комплекс мероприятий, включающий углубление участка акватории в пределах городской черты г. Ростова на 0,5 м (рис. 3, а). Оценка целесообразности выполнения указанных работ проводилась с использованием 2D-модели течений и транспорта наносов в мелководном водоеме, адаптированной к условиям оз. Неро. Расчеты выполнялись для периода средней водности, что соответствует расходу воды реки Сара 3,7 м<sup>3</sup>/с. Как показали результаты моделирования, для участка акватории с углубленным дном скорости течения уменьшатся в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений), что негативно скажется на водообмене. Увеличение глубины и уменьшение скорости течения при сохранении переносимого количества водных масс и наносов, поступающих со стоком

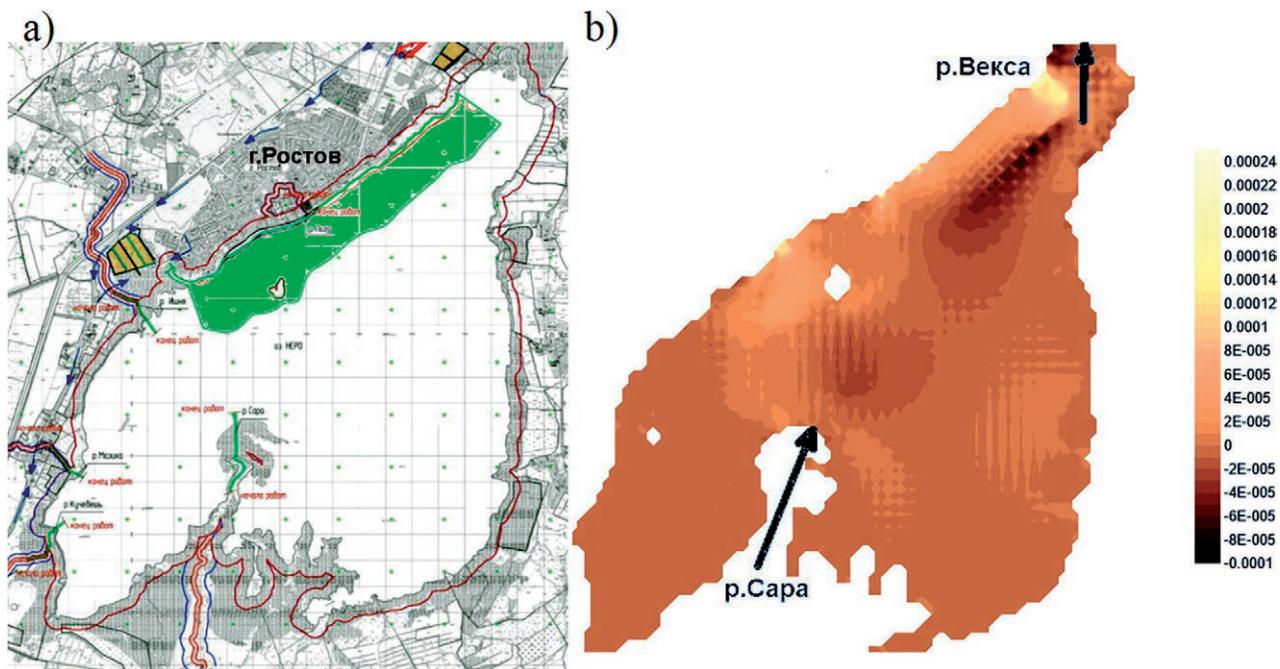


Рис. 3. Схема оз. Неро с обозначенным участком дноуглубительных работ (выделено зеленым цветом) (a); распределение по акватории разности значений расхода наносов при естественном режиме и расхода наносов, полученного в результате численного эксперимента, кг/с (b)

Fig. 3. Lake Nero with a designated dredging area (highlighted in green) (a); distribution over the water area of the difference between the values of sediment discharge under natural conditions and sediment discharge obtained as a result of a numerical experiment, kg/s (b)

притоков, приведет к снижению интенсивности переноса частиц наносов и заилению углубленной области. На рис. 3 (b) приведено распределение по акватории разности расходов наносов (расход наносов при естественном режиме за вычетом расхода наносов, полученного при численном эксперименте), иллюстрирующее снижение значений расхода наносов в области углубления. На основании изложенного сделан вывод о нецелесообразности реализации указанного проекта восстановления озера ввиду его сомнительной эффективности.

Чудско-Псковское озеро – четвертый по величине пресноводный водоем Европы и крупнейший европейский трансграничный водоем, расположенный на границе между Россией и Эстонией [Nutrient..., 1999; Lake..., 2001; Кондратьев и др., 2010]. Площадь озера составляет 3555 км<sup>2</sup>, водосбора – 44 000 км<sup>2</sup>. Российская часть водосбора Чудско-Псковского озера включает территорию Псковской области, затрагивая Сланцевский, Лужский и Кингисеппский районы Ленинградской области. Основной приток озера – река Великая, водосбор которой занимает около 59 % всей площади водосбора. Наиболее крупный приток с эстонской стороны – река Эмайыги с водосбором, составляющим 22 % общей площади. Озеро иг-

рает существенную роль в экономике Эстонии и Северо-Запада России, поэтому рациональное использование его биоресурсов и сохранение условий для их воспроизводства является приоритетной задачей обеих стран. Современные требования водной рамочной директивы ЕС (Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза № 2000/60/ЕС от 23 октября 2000 г.) указывают на необходимость разработки более детальной совместной российско-эстонской программы рационального использования и охраны водных ресурсов Чудско-Псковского озера. Кроме того, Чудско-Псковское озеро и его водосборный бассейн – один из источников формирования нагрузки на Финский залив Балтийского моря, уровень которой регламентируется Планом действий по Балтийскому морю [HELCOM..., 2007, 2013].

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. При решении задачи детерминированно-стохастической

(ДС) оценки стока и выноса биогенных элементов с российской части водосбора Чудско-Псковского озера использовалась система моделей *SWM-ILHM-ILLM*. Моделирование проводилось по следующим основным этапам:

1. Оценка параметров стохастической модели погоды 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 (100 лет) с параметрами распределения, соответствующими современным климатическим условиям.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
4. Моделирование месячных слоев стока с водосбора реки Великой по детерминированной модели формирования стока *ILHM*.
5. Построение кривой распределения значений слоя стока с изучаемого водосбора в современных климатических условиях на основе рассчитанного ряда. 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 *ILLM*.
8. Построение кривой распределения значений выноса биогенных веществ с изучаемо-

го водосбора на основе смоделированного ряда. 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 условиях современного климата. Результаты расчетов стока и выноса биогенных веществ с водосбора представлены в таблице. 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 многолетних (обеспеченностью 1 и 5 %) и мало-водных (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.

Выполнен расчет по оценке перспектив снижения фосфорной нагрузки за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в сельскохозяйственное производство на российской части водосбора Чудско-Псковского

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока  $H$ , рассредоточенной ( $LP_{distr}$  и  $LN_{distr}$ ) и природной ( $LP_{nat}$  и  $LN_{nat}$ ) составляющих биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора

Distribution parameters of the calculated annual runoff  $H$ , dispersed ( $LP_{distr}$  and  $LN_{distr}$ ) and natural ( $LP_{nat}$  and  $LN_{nat}$ ) components of nutrient load on Lake Peipsi from the Russian part of the catchment

	$X_{50\%}$	$\sigma$	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
$H$ , мм/год (mm/year)	242,41	57,02	375	336	281	204	148	110
$LP_{distr}$ , т/год (t/year)	400	81,52	590	535	455	345	265	210
$LP_{nat}$ , т/год (t/year)	269	50,67	387	353	303	235	185	151
$LN_{distr}$ , т/год (t/year)	8549	2013	13239	11870	9898	7200	5228	3859
$LN_{nat}$ , т/год (t/year)	3573	841	5533	4961	4136	3010	2185	1613

Примечание. Среднее –  $X_{50\%}$ , среднее квадратичное отклонение –  $\sigma$ , значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % –  $X_{\%}$ .

Note. Mean –  $X_{50\%}$ , mean square deviation –  $\sigma$ , values of probability 1, 5, 25, 75, 95 and 99 % –  $X_{\%}$ .

озера. Нагрузка, сформированная на полях сельскохозяйственных предприятий, оценивалась по методу, предложенному специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства [Брюханов, 2016]. 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 расчета явилась прогностическая оценка снижения фосфорной нагрузки на 10,7 т/год за счет внедрения НДТ.

С использованием модели *FLake* выполнены расчеты с целью получения прогностической оценки возможных изменений температурного и кислородного режимов озер Псковского и Чудского в условиях изменяющихся климатических и антропогенных воздействий на период по конец 2100 г. [Кондратьев и др., 2010].

Основой для оценки изменения регионального климата служил сценарий A2 (модель ECHAM5\_MPI-OM). Из результатов расчета следует, что температура воды в Чудском озере будет иметь тенденцию к возрастанию, которое составит 2,2 °C для поверхности и всего лишь 0,5 °C для придонной области. В Псковском озере температура поверхности и в придонной области вырастет одинаково – на 2,2 °C. Различный рост придонной температуры в изучаемых озерах объясняется тем, что Псковское озеро ввиду меньшей глубины практически всегда является перемешанным от поверхности до дна, что приводит к более эффективному прогреву придонной области. Продолжительность ледостава на Чудском озере уменьшится практически вдвое – с 150–160 до 80–85 дней (рис. 4, а). Также будет уменьшаться и толщина ледового покрова с 40 см в начале XXI века до 20 см в его конце. В Псковском озере продолжительность ледостава уменьшится с 160 до 100 дней, а толщина льда – с 60–70 до 20–30 см.

В Чудском озере ожидаются отрицательные тренды в динамике концентрации растворен-

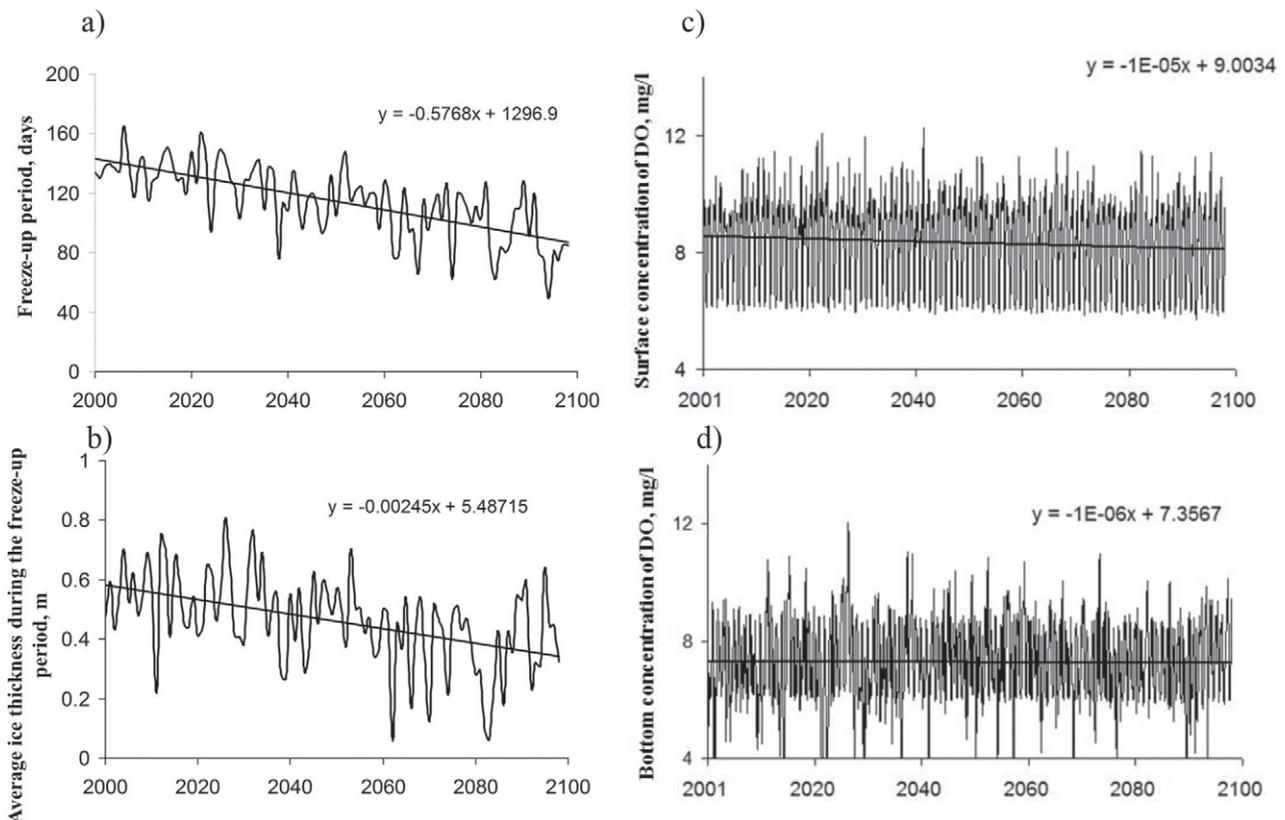


Рис. 4. Продолжительность периода ледостава (а), динамика толщины ледового покрова (б), динамика концентрации РК на поверхности (с) и у дна (д) в Чудском озере в XXI веке в соответствии со сценарием изменения климата A2

Fig. 4. The duration of the freeze-up period (a), the dynamics of the ice cover thickness (b), the dynamics of DO surface concentration (c), and bottom concentration (d) in Lake Peipsi-Chudskoye in the XXI century according to A2 scenario

ного кислорода (РК) как в поверхностных слоях, так и у дна (рис. 4, b). Скорее всего, такое развитие событий будет вызвано уменьшением поступления РК из атмосферы вследствие снижения растворимости газа при повышении температуры воды. В Псковском озере отрицательный тренд будет наблюдаться только в поверхностных слоях. В придонном слое можно ожидать слабовыраженный положительный

тренд концентрации РК, вызванный изменениями в условиях перемешивания озера и аэрации придонной области.

Как следует из результатов 3D-моделирования, формирование полей течений в Чудско-Псковской озерной системе характерно для больших мелководных озер умеренных широт (рис. 5, a). В подледный период течения в обоих озерах в основном носят бароклинный

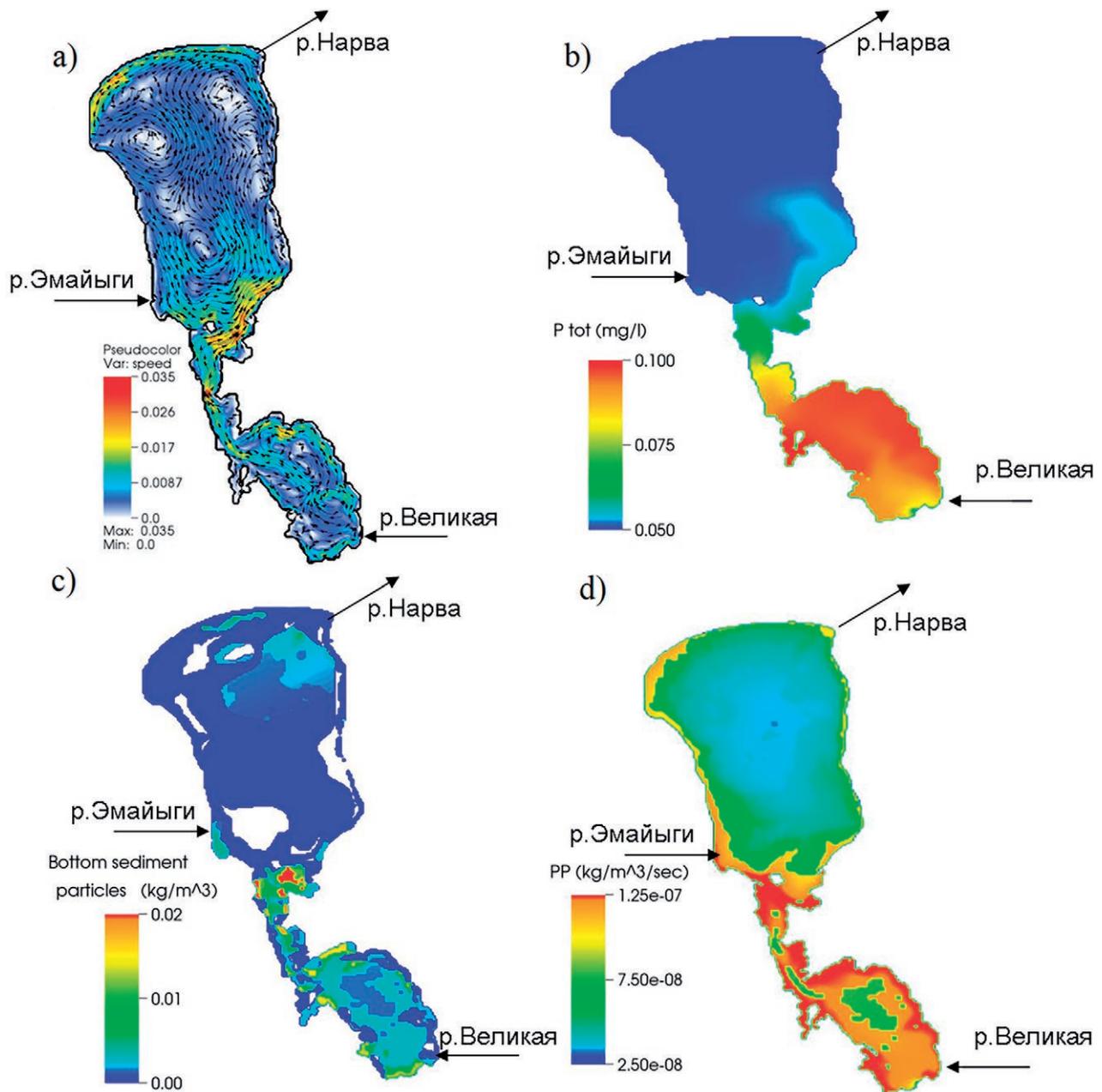


Рис. 5. Результаты 3D-моделирования: а – поле скоростей течений в середине апреля (м/с); б – пространственное распределение концентрации общего фосфора в середине июля; в – пространственное распределение концентрации частиц донных отложений в середине июля; г – пространственное распределение первичной продукции фитопланктона в середине июля

Fig. 5. Results of 3D modeling: а – field of current velocities in mid-April (m/s); б – spatial distribution of total phosphorus concentration in mid-July; в – spatial distribution of the concentration of bottom sediment particles in mid-July; г – spatial distribution of the primary production of phytoplankton in mid-July

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. 5, b). 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 водной массе Псковского озера. 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 в озере 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. Иногда при смене ветровой ситуации происходит проникновение водной массы Псковского озера в восточные и центральные районы Чудского озера. В этих случаях в Чудском озере возникают локальные максимумы концентрации фосфора в соответствующих районах акватории. Пространственное распределение общего азота не имеет таких особенностей. Оно носит зональный характер в течение всего года. Концентрация увеличивается от истока р. Великой в северном направлении.

В период ледостава взмучивание донных отложений практически отсутствует. Это объясняется тем, что в отсутствие волнения напряжение трения 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 начинает активно 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. 5, c). 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 (ПП) 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. 5, d). 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.

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 и на 0,95 % для азотной по отношению к рассчитанным среднесуточным значениям. 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 запаздыванием.

Таким образом, представленные в настоящей работе результаты свидетельствуют о том, что к настоящему времени разработана и успешно используется на практике система моделей тепло- и массопереноса в водоемах, водотоках и на их водосборах, которая является инструментом для принятия управленческих решений в области охраны и рационального использования ресурсов водных объектов в ситуациях, когда натурные исследования затруднены или невозможны. Перспективы развития научных работ в области совершенствования созданной системы моделей заключаются прежде всего в расширении спектра детерминированных моделей и совершенствовании детерминированно-стохастических методов моделирования процессов стока, выноса взвешенных частиц и растворенных примесей с водосбора и в русловом потоке, а также тепло- и массопереноса на акватории водоема. Прогресс исследований зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натурных исследований с целью уточнения параметров моделей. Перспективы практического расширения области внедрения разработанной системы связаны с созданием автоматизированных информационно-управляющих систем охраны и рационального использования ресурсов водных объектов с применением ГИСТехнологий, а также средств обработки и анализа аэрокосмической информации об акваториях и подстилающей поверхности водосборов.

*Работа выполнена за счет средств темы № 0154-2019-0001 Плана НИР ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН.*

## Литература

*Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М., Литвинов А. С., Поддубный С. А.* Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2003. 192 с.

*Брюханов А. Ю.* Методы проектирования и критерии оценки технологий утилизации навоза, помета, обеспечивающие экологическую безопасность: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2016. 39 с.

*Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова 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 // Озера Евразии: проблемы и пути решения: Матер. I Междунар. конф. (Петрозаводск, 11–15 сент. 2017 г.). Петрозаводск, 2017. С. 228–233.

*Кондратьев С. А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.

*Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С., Рябченко В. А., Дворников А. Ю.* Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Нестор-История, 2010. 116 с.

*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.

*Кондратьев С. А., Шмакова М. В.* Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.

*Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Игнатьева Н. В., Иванова Е. В., Гузиватый В. В.* Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 3. С. 83–92.

*Румянцев В. А., Кондратьев С. А., Капотова Н. И., Ливанова Н. А.* Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 93 с.

*Шмакова М. В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Лема, 2013. 142 с.

*Шмакова М. В., Кондратьев С. А.* Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 9. С. 74–84.

*Becker A., Pfitzner B.* EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling // *Acta Hydrophys.* 1987. Vol. 31, no. 3–4. P. 125–141.

*Behrendt H., Dannowski R. (eds.)* Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scena-

rio calculations on possible changes. Berlin, Germany: Weissensee Verlag, 2005. 353 p.

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G. Physical background of oxygen depletion development in ice-covered lakes // *Oecologia*. 2007. Vol. 151. P. 331–340.

Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling // Proceed. 10<sup>th</sup> European Workshop on Physical Processes in Natural Waters, June 26–28 2006, University of Granada, Spain. P. 209–215.

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM, Helsinki, 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan – Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea. Copenhagen, Denmark, 2013. 19 p.

Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling & Software*. 2011. Vol. 26, iss. 5. P. 683–685.

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 // Mirschel W., Terleev V., Wenkel K. (eds). *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*. Springer, 2020. P. 299–310.

Lake Peipsi. Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry / Ed. T Nõges. Tartu: Sulemees Publ., 2001. 163 p.

Motovilov Y. G., Golosov S. D., Datsenko Y. S., Zverev I. S., Puklakov V. V., Fashchevskaya T. B. Information – modeling complex for assessing the hydroenvironmental conditions of reservoirs // *Water Resources*. 2020. Vol. 47. P. 751–762. doi: 10.1134/S0097807820050139

Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–1999 / Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, Jordforsk Report N4/01, 1999. 66 p.

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 // Proceed. 11<sup>th</sup> Symp. Physical Processes in Natural. Warnemunde, Germany, 3–6 September, 2007. P. 147–156.

Поступила в редакцию 17.02.2021

## References

Bikbulatov E. S., Bikbulatova E. M., Litvinov A. S., Poddubnyi S. A. *Gidrologiya i gidrokimiya ozera Nero* [Hydrology and hydrochemistry of Lake Nero]. Rybinsk: Rybinsk Printing House, 2003. 192 p.

Brukhanov A. Yu. *Metody proektirovaniya i kriterii otsenki tekhnologii utilizatsii navoza, pometa, obespechivayushchie ekologicheskuyu bezopasnost'* [Design methods and criteria for assessing technologies for the utilization of manure, droppings, ensuring environmental safety]: Summary of DSc (Dr. of Tech.) thesis. St. Petersburg, 2016. 39 p.

Kondratyev S. A. *Formirovanie vneshnei nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniya* [Formation of external load on water bodies: modeling problems]. St. Petersburg: Nauka, 2007. 253 p.

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 Peipsi-Pskov)]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010. 116 p.

Kondratyev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V. *Metod otsenki vynosa biogenykh veshchestv s vodosborov i biogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty Severo-Zapadnogo regiona Rossiiskoi Federatsii* [A 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.

Kondratyev S. A., Shmakova M. V. *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v sisteme vodosbor – vodotok – vodoem* [Mathematical modeling of mass transfer in the catchment – watercourse – water body system]. St. Petersburg: Nestor-History, 2019. 246 p.

Kondratyev S. A., Shmakova M. V., Ignat'eva N. V., Ivanova E. V., Guzivatyi V. V. *Eksperimental'nye i model'nye issledovaniya rasprostraneniya vod reki Izhory v rusle reki Nevy* [Experimental and model studies of the Izhora River waters spreading in the Neva River]. 2020. Vol. 13, no. 3. P. 83–92.

Rumyantsev V. A., Kondratyev S. A., Kapotova N. I., Livanova N. A. *Opyt razrabotki i primeneniya matematicheskikh modelei basseinov malykh rek* [Experience in the development and application of mathematical models for small river basins]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985. 93 p.

Shmakova M. V. *Teoriya i praktika matematicheskogo modelirovaniya rechnykh potokov* [Theory and practice of mathematical modeling of river flows]. St. Petersburg: Lema, 2013. 142 p.

Shmakova M. V., Kondratyev S. A. *Stokhasticheskaya model' pogody v sisteme determinirovanno-stokhasticheskogo modelirovaniya stoka i biogennoi nagruzki* [Stochastic weather model in the system of deterministic-stochastic modeling of runoff and biogenic load]. *Meteorology and Hydrology*. 2014. No. 9. P. 74–84.

Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A., Golosov S. D., Ibraev R. A. *Otsenka vliyaniya osnovnykh pritokov Ladozhskogo ozera na formirovanie vodnoi massy bukhty Petrokrepost' (istok r. Nevy) po rezul'tatam matematicheskogo modelirovaniya* [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]. *Ozera Evrazii: probl. i puti resheniya: Mater. I mezhdunar. konf. (Petrozavodsk, 11–15 sent. 2017 g.)* [Lakes of Eurasia: Probl. and solu-

tions: Proceed. 1<sup>st</sup> int. conf. (Petrozavodsk, Sept. 11–15, 2017)]. Petrozavodsk, 2017. P. 228–233.

Becker A., Pftzner B. EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling. *Acta Hydrophys.* 1987. Vol. 31, no. 3–4. P. 125–141.

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. Weissensee Verlag, Berlin, Germany, 2005. 353 p.

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G. Physical background of oxygen depletion development in ice-covered lakes. *Oecologia.* 2007. Vol. 151. P. 331–340.

Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling. *Proceed. 10<sup>th</sup> European Workshop on Physical Processes in Natural Waters*, June 26–28 2006, University of Granada, Spain. P. 209–215.

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM, Helsinki, 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan – *Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea*. Copenhagen, Denmark, 2013. 19 p.

Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. Flake-Global: Online lake

model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software.* 2011. Vol. 26, iss. 5. P. 683–685.

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. *Mirschel W., Terleev V., Wenkel K. (eds). Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research.* Springer, 2020. P. 299–310.

Lake Peipsi. *Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry.* Ed. T. Nõges. Tartu: Sulemees Publ., 2001. 163 p.

Motovilov Y. G., Golosov S. D., Datsenko Y. S., Zverev I. S., Puklakov V. V., Fashchevskaya T. B. Information-modeling complex for assessing the hydroenvironmental conditions of reservoirs. *Water Resources.* 2020. Vol. 47. P. 751–762. doi: 10.1134/S0097807820050139

Nutrient loads to Lake Peipsi. *Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–1999.* Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, Jordforsk Report N4/01, 1999. 66 p.

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. *Proceed. 11<sup>th</sup> Symp. Physical Processes in Natural Waters.* Warnemunde, Germany, 3–6 September, 2007. P. 147–156.

Received February 17, 2021

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Кондратьев Сергей Алексеевич

заместитель директора по научной работе, д. ф.-м. н.  
Институт озероведения РАН  
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: kondratyev@limno.org.ru  
тел.: +79213718470

### Шмакова Марина Валентиновна

старший научный сотрудник, д. г. н.  
Институт озероведения РАН  
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: m-shmakova@yandex.ru  
тел.: (812) 3870260

### Голосов Сергей Дмитриевич

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.  
Институт озероведения РАН  
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: sergey\_golosov@mail.ru

### Зверев Илья Сергеевич

научный сотрудник, к. ф.-м. н.  
Институт озероведения РАН  
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: iliazverev@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Kondratyev, Sergey

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences  
9 Sevastyanov St., 196105 St. Peterburg, Russia  
e-mail: kondratyev@limno.org.ru  
tel.: +79213718470

### Shmakova, Marina

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences  
9 Sevastyanov St., 196105 St. Peterburg, Russia  
e-mail: m-shmakova@yandex.ru  
tel.: (812) 3870260

### Golosov, Sergey

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences  
9 Sevastyanov St., 196105 St. Peterburg, Russia  
e-mail: sergey\_golosov@mail.ru

### Zverev, Ilya

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences  
9 Sevastyanov St., 196105 St. Peterburg, Russia  
e-mail: iliazverev@mail.ru