

УДК 556.555.7+574

МОДЕЛЬ ПОДЛЕДНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КРУПНОГО ОЗЕРА, ОСНОВАННАЯ НА ПРИМЕНЕНИИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В. В. Меншуткин¹, Н. Н. Филатов²

¹ Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Предлагается модель динамики экосистемы подо льдом крупного озера с использованием клеточных автоматов, позволяющая учитывать пространственные неоднородности, процессы перемешивания, подледной конвекции, локальные особенности окружающей среды. Использовались данные уникальных комплексных экспериментов подо льдом, проводимых на Онежском озере в период от устойчивого ледяного покрова до начала его разрушения.

Ключевые слова: модель; озеро; экосистема; зимний режим; клеточные автоматы.

V. V. Menshutkin, N. N. Filatov. A MODEL OF UNDER-ICE ECOLOGICAL SYSTEM OF A LARGE LAKE BASED ON THE APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA

A cellular automata model for under-ice dynamics of a large lake ecosystem is suggested, which enables taking into account spatial inhomogeneities, mixing processes, under-ice convections, local features of the environment. Data from unique integrated under-ice experiments performed on Lake Onego during steady ice cover period until the beginning of its degradation were employed.

Key words: model; lake; ecosystem; winter conditions; cellular automata.

Введение

Исследования биоты во льду и в подледном слое были начаты в 70-х годах XX века в морях Арктики и Антарктики [Мельников, 1989; Arrigo, 1997], которые показали, что в многолетних льдах развиваются многочисленные микроскопические водоросли и беспозвоночные животные, как пресноводные, так и морские. При этом водоросли в снегу и во льду при фотосинтезе образуют биомассу, которая может значительно превосходить биомассу фитопланктона

в воде подо льдом. При потеплении климата проявились заметные изменения в составе, структуре и функционировании биологических сообществ во льду и подо льдом.

Существенно меньше сведений имелось о функционировании озерных систем подо льдом; исследования были сосредоточены в основном на малых и средних озерах [Kirillin et al., 2012], в то время как подледный режим крупнейших озер мира до сих пор изучен в гораздо меньшей степени. Шуртер [Surter et al., 2012] образно написал по этому поводу: «Мы

знаем гораздо больше о тропических озерных экосистемах и даже о полярных озерах с постоянным ледяным покровом, чем о переносах вещества и энергии во время долгих зим в озерах умеренной зоны Евразии и Северной Америки». В исследованиях биологических сообществ льда оз. Байкал [Bondarenko et al., 2012] выявлено обилие и слоистое распределение микроводорослей. Также выявлена низкая концентрация диоксида кремния, фосфора и нитратов, что может быть обусловлено высокой метаболической активностью экстремофилов во льду озера. Таким образом, микроорганизмы во льду пресноводных озер поддерживают высокую активность, и это свидетельствует о том, что имеются достаточные условия для их жизни подо льдом глубоких озер. В работе [Митрофанова и др., 2006] по исследованию биоты подо льдом глубокого Телецкого озера были выявлены диатомовые комплексы с достаточно высоким удельным содержанием хлорофилла в клетках, что позволяет сохранять экосистему озера в устойчивом состоянии и поддерживать процессы самоочищения.

Важно отметить, что подо льдом крупных озер исследовались отдельные элементы экосистемы, в то время как комплекс физико-химико-биологических процессов оставался «белым пятном» лимнологии. Главной причиной недостатка зимних наблюдений на крупных, в особенности Великих американских озерах или великих озерах Европы, которые покрываются льдом не полностью, имеют трещины, разводья, промоины и полыньи [Kondratyev, Filatov, 1999; Assel, 2003], является практическая трудность организации долговременных комплексных полевых исследований с ледяного покрова. В последние 20 лет значительный

интерес вызывают проблемы реакции озерных экосистем на глобальное потепление, требуется более глубокое понимание функционирования озерных экосистем подо льдом, роли озер с ледовым покровом в глобальном углеродном балансе. Для Великих американских озер были изучены сдвиги в микробиологическом сообществе, связанные с потеплением климата и уменьшением площади и толщины ледяного покрова на озерах [McKay et al., 2011; Rozmarynowycz, 2014]. Для Ладожского и Онежского озер имелось очень мало экспериментальных сведений о жизни подо льдом [Petrova, 1986], а в развитых 3-D моделях экосистем крупных стратифицированных озер для сезонного и климатического масштабов принималось «отсутствие» жизни подо льдом [Rukhovets, Filatov, 2010; Меншуткин и др., 2014]. В марте 2013 г. в Петрозаводской губе Онежского озера в рамках совместного проекта ИВПС КарНЦ РАН и Университета Bowling Green State (США) были выполнены отборы проб на химический и биологический анализы как в самом ледовом покрове, так и в воде подо льдом. Анализ собранных данных позволил выявить значительные различия в видовом составе флоры во льду и в воде Великих американских озер и Онежского озера [Rozmarynowycz, 2014].

В марте 2015 г. были впервые начаты комплексные российско-швейцарские исследования по проекту «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений» [Филатов, Тержевик, 2015; Terzhevik, 2015] благодаря помощи фонда ЭЛЕМО (Швейцария), который выделил грант на 2015–2016 гг. В комплексных исследованиях 2015 г.



Рис. 1. Спутниковый снимок Ладожского и Онежского озер 13 марта 2015 г. (а) и схема расположения станций измерений и разрезов в Онежском озере (б)

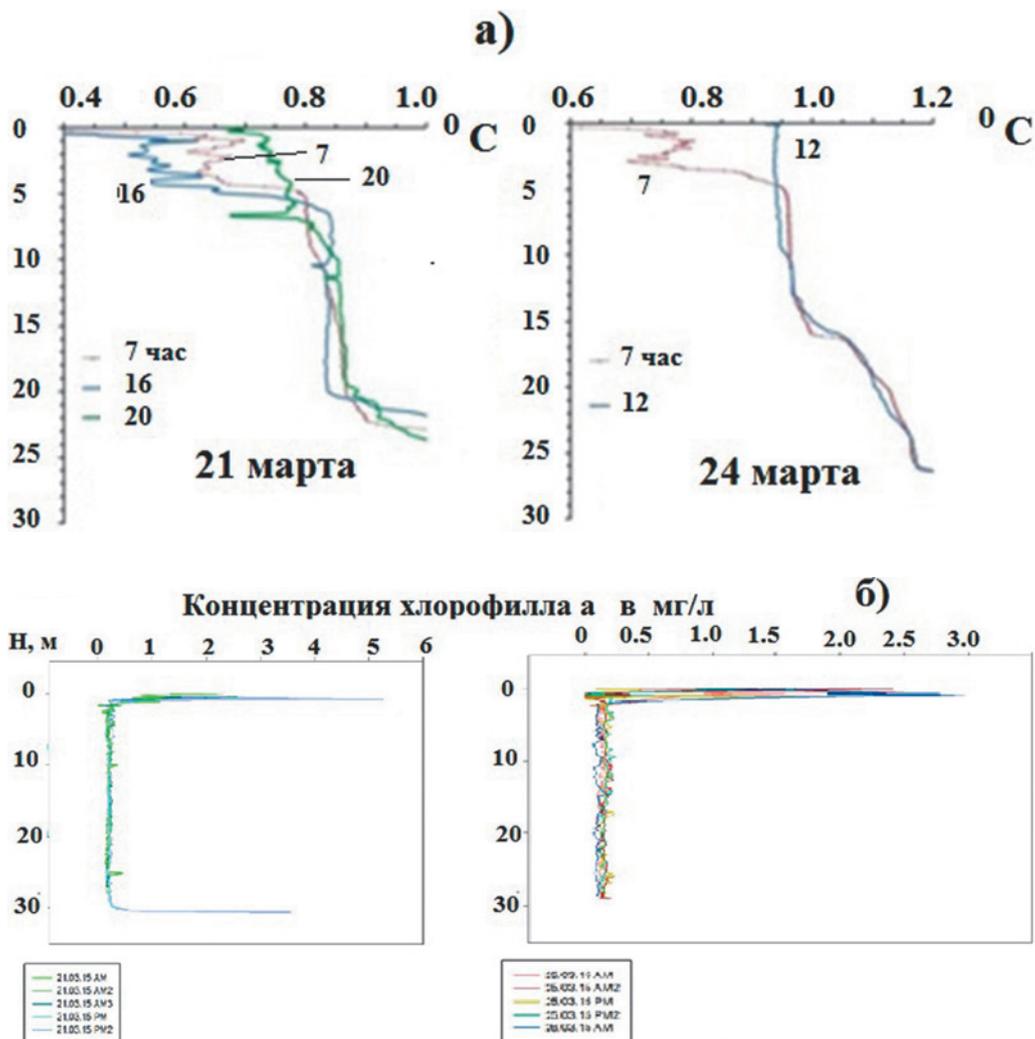


Рис. 2. Примеры распределения температуры воды (а) концентрации хлорофилла а (б) 21 и 24 марта 2015 г. в основной точке комплексных измерений

принимали участие около 40 специалистов из России, Швейцарии, Франции, Германии, Швеции и других стран. По программе исследований предполагалось изучение как Ладожского, так и Онежского озер, представляющих единую систему великих озер Европы [Rukhovets, Filatov, 2010]. Из-за отсутствия ледового покрова в северной части Ладожского озера комплексные мультидисциплинарные исследования были организованы на Онежском озере, полностью покрытом льдом. В месте измерений (рис. 1) толщина ледяного покрова была около 30 см, а период исследований характеризовался началом подледной конвекции, влияющей на распределение и трансформацию биоты и вещества в озере.

Основная идея комплексного российско-швейцарского проекта состоит в проведении в зимний период на Ладожском и Онежском озерах междисциплинарных комплексных

натурных наблюдений за гидрофизическими и химико-биологическими параметрами воды, включая контактный слой «вода-лед» и поверхностный слой воды (0–30 м), и собственно льда; в изучении структуры и функциональных характеристик сообществ гидробионтов в этих системах, с оценкой закономерностей формирования качества вод, а также изучением влияния изменений климата на экосистемы озер. Важной задачей проекта было описать сложные нелинейные процессы, происходящие в экосистемах озер подо льдом. Сделать это традиционным путем создания моделей, основанных на решении систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, – достаточно сложная задача [Меншуткин и др., 2014], поэтому в качестве альтернативы были использованы т. н. клеточно-автоматные модели, позволяющие моделировать сложные нелинейные процессы, в том числе и процессы

самоорганизации, используя сравнительно простые правила [Беркович, 2003; Афанасьев, 2012].

Материалы и методы

Комплексные экспериментальные исследования

В семи подпроектах исследованы процессы перемешивания, переноса и трансформации вещества, выполнены исследования подледной конвекции, видовой состав фито- и зоопланктона и бактерий, даны оценки переноса углерода по трофической цепочке, изучался химический состав вод, донные отложения. Проведены климатические и палеоклиматические исследования, контактные и спутниковые измерения ледового покрова. Кроме зимних исследований для изучения сезонных изменений экосистем проводились комплексные исследования как на Ладожском, так и на Онежском озере в весенне-летний и осенний периоды – до и после ледостава. Результаты этих исследований важны для понимания функционирования озерных экосистем подо льдом великих озер Европы, которые несколько месяцев в году полностью или частично покрываются ледяным покровом. На рисунке 2 представлены примеры измерений распределения температуры воды (а) и концентрации хлорофилла *a* (б) в разные даты экспериментов (21 и 24 марта 2015 г.) и время суток (7, 16 и 20 час.).

Модель динамики экосистемы подо льдом крупного озера с использованием клеточных автоматов

Основная задача настоящей работы – описать синергетику комплекса физико-химико-биологических процессов в период от устойчивого ледяного покрова до начала его разрушения в условиях подледной конвекции для лучшего понимания функционирования сложной экосистемы подо льдом. Учитывая слабое горизонтальное перемешивание и относительную однородность происходящих подо льдом процессов, предлагается модель экологической системы подледного слоя воды в озере с использованием моделей клеточных автоматов [Wolfram, 2002; Астафьев и др., 2012]. По существу, это означает переход от «традиционного» метода описания экологической системы с помощью системы дифференциальных уравнений [Меншуткин и др., 2014] к использованию представлений дискретной математики. Поэтому метод численного решения нелинейных

уравнений при помощи клеточных автоматов представляет собой шаг в этом направлении. Метод нашел практическое применение при моделировании наземных сообществ, нейронных сетей, передаче энергии в пограничном слое движущегося газа или жидкости, а также был использован для моделирования биоты в оз. Байкал [Афанасьев, 2012]. Для работы клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое. На каждой итерации, используя правила перехода и состояния соседних ячеек, определяется новое состояние каждой ячейки. Так, например, область моделирования оз. Байкал составляла около 5 млн ячеек, для чего использовались мощные вычислительные средства для распараллеливания вычислительных процессов [Афанасьев, 2012].

В случае экологической системы подледного слоя воды пространство подо льдом разбивается на множество дискретных объемов воды, характеризующихся температурой, плотностью, освещенностью, концентрациями растворенного в воде кислорода, биогенов в виде неорганических соединений фосфора и азота, а также биомасс фито-, бактерио- и зоопланктонных организмов. Подобный подход уже предлагался в свое время Бернардом Паттеном [Patten, 1982], который ввел даже специальное понятие «энвирон». Основное свойство клеточных автоматов заключается в том, что каждый такой автомат может изменять свое состояние не только в зависимости от своего предыдущего состояния и внешних воздействий, но и в зависимости от состояния соседних автоматов.

Для подледного слоя воды основным процессом взаимодействия между элементарными водными массами является перемешивание, обусловленное подледной конвекцией, турбулентным перемешиванием [Меншуткин, 1964; Wuest et al., 2005; Terzhevik, 2015]. В крупных озерах описаны и другие процессы, влияющие на особенности распределения водных масс, например, подледные течения, внутренние волны, сейши, а также выделение газов из донных отложений и т. д. [Гранин и др., 1998; Филатов, 1983; Wuest et al., 2005; Terzhevik, 2015], но в первом приближении при создании комплексной модели для Онежского озера ими можно пренебречь. Для описания процесса перемешивания используем «наивное» представление о перемешивании, при котором два соседних элементарных объема воды в условиях плотностной неустойчивости или под влиянием внешних воздействий могут образовать некоторый элементарный вихрь. В настоящее

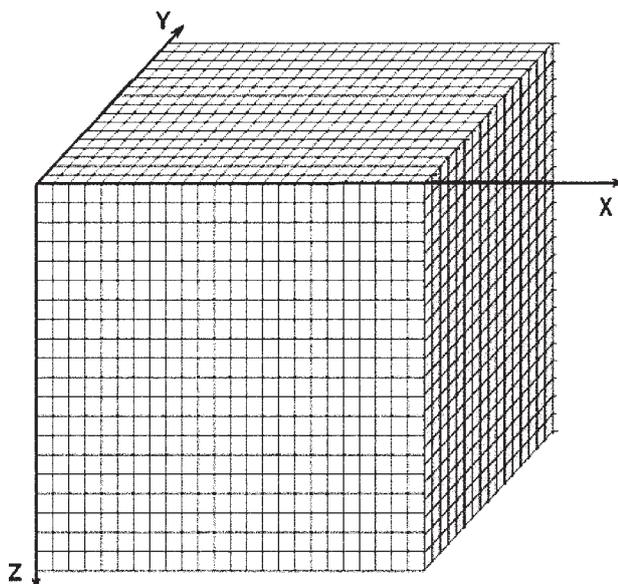


Рис. 3. Схема расположения клеточных автоматов в подледном слое воды

время с использованием быстродействующей вычислительной техники появилась возможность непосредственного моделирования вероятностных процессов. Такой подход получил название метода Монте-Карло или метода статистических испытаний. Это позволяет интерпретировать «элементарные вихри» не в метафорическом, а в самом буквальном смысле, что и было осуществлено в предлагаемой модели.

Результаты

Пространство подо льдом было представлено в виде ячеек – клеточных автоматов. На первом этапе не ставилась задача точно воспроизвести комплекс процессов подо льдом Онежского озера по результатам измерений 14–27.03.2015 г., тем более такие тонкие процессы и явления, которые были выявлены в ходе зимних исследований 2015 г.: микроструктура, внутренние волны, когда в течение суток величина скорости диссипации турбулентной энергии менялась на два порядка, а данные наблюдений в подледном слое не выявили четкой закономерности в вертикальном распределении хлорофилла *a* в разных фазах подледной конвекции [Zdorovenov et al., 2015]. Более того, общая концентрация хлорофилла *a*, профили его концентрации не показали существенных изменений в течение суток, также небольшие вариации были характерны для распределения концентрации биогенов как по вертикали в течение дня, так и за весь период измерений 14–27.03.2015 г. [Annual Report...

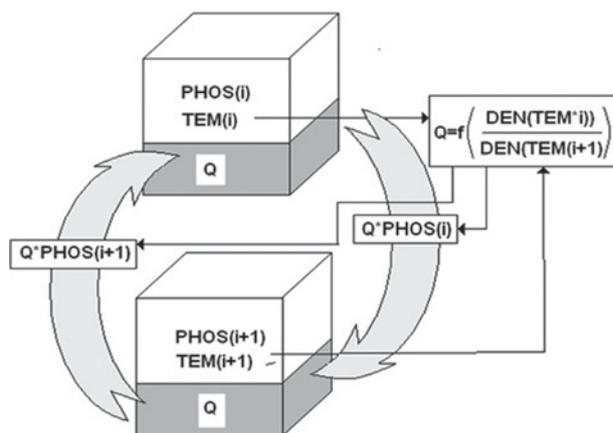


Рис. 4. Схема переноса вещества элементарным вихрем между двумя клеточными автоматами в вертикальном направлении

2015; Terzevik, 2015]. Важной при создании модели была оценка увеличения толщины конвективного перемешанного слоя со скоростью примерно 1 м/сут. Неожиданными стали предварительные выводы в комплексном отчете [Annual Report..., 2015] о возможной лимитирующей роли азота в экосистеме озера, которые были получены в 2015 г. Эти сведения будут проверяться в экспериментах на Ладожском и Онежском озерах в 2016 г.

На рисунке 3 представлена схема расположения клеточных автоматов в подледном слое воды. В первом приближении рассматривается прямоугольная сетка из 18000 автоматов (20 по глубине и 30 на 30 по горизонтали). Верхний ряд автоматов примыкает к нижней поверхности льда, а нижний – к дну водоема. То есть вертикальный масштаб сетки составлял примерно 1 м. Состояние автомата описывается температурой воды (TEM), концентрацией неорганического фосфора, растворенного в воде (PHOS), и биомассой фитопланктона (PHYTO).

На рисунке 4 представлена схема элементарного вихря, участвующего во взаимодействии двух клеточных автоматов, расположенных по вертикали.

Предполагается, что в течение одного временного шага доля *Q* от объема ячейки, занимаемой верхним автоматом, переместится в нижнюю ячейку, а аналогичная доля *Q* от объема нижней ячейки переместится в верхнюю ячейку. После такого перемещения внутри каждой ячейки происходит полное перемешивание с выравниванием температуры, концентрации

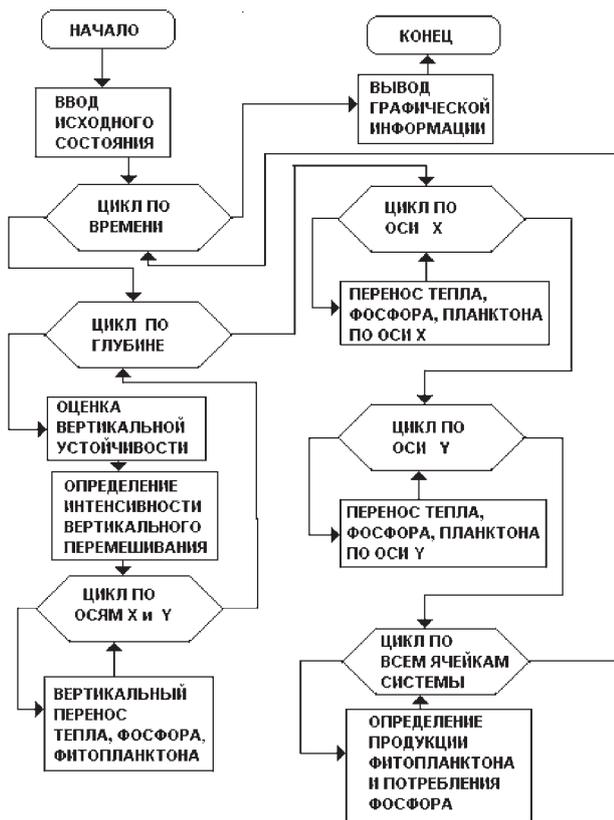


Рис. 5. Блок-схема моделирующего алгоритма

неорганического фосфора и биомассы фитопланктона. Например, для фосфора это выражается в виде следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \text{PHOS}(i, t + 1) &= (1 - Q) * \text{PHOS}(i, t) + \\ &+ Q * \text{PHOS}(i + 1, t), \\ \text{PHOS}(i + 1, t + 1) &= (1 - Q) * \text{PHOS}(i + 1, t) + \\ &+ Q * \text{PHOS}(i, t). \end{aligned}$$

Величина Q полагается функцией разности плотностей воды в верхней и нижней ячейках. Как известно, в диапазоне от 0 до 4 °C с увеличением температуры воды ее плотность DEN увеличивается. Поэтому нагревание верхних слоев воды подо льдом приводит к уменьшению устойчивости. В модели принято линейное эмпирическое соотношение:

$$Q = \exp(-0,69 * DEN(TEM(i)) / DEN(TEM(i + 1))).$$

Это соотношение основывается на упрощенном представлении числа Ричардсона. Величина Q полагается шумящим параметром, что естественно при описании процессов турбулентного перемешивания.

$$QQ = Q + 0,1 * (RND - 1),$$

где QQ – результирующая величина, используемая в модели, RND – случайное число, равномерно распределенное в диапазоне от 0 до 1.

На рисунке 5 представлена блок-схема моделирующего алгоритма.

Работа модели начинается с ввода начального распределения температур и концентраций фосфора по всем автоматам системы. Начальные значения биомасс фитопланктона полагаются нулевыми. Интенсивность проникающей под лед солнечной радиации полагается убывающей по экспоненте с глубиной.

Время работы модели предполагается равным периоду от начала прогрева воды подо льдом до установления гомотермии и разрушения ледяного покрова. В первом приближении, как показали измерения, это время принимается равным для исследуемых озер 40 суткам. Продолжительность временного шага принята равной 2 часам, причем на первом этапе суточные колебания освещенности и теплового потока не принимаются во внимание.

Внутри временного цикла сначала осуществляется моделирование вертикального переноса тепла и растворенных веществ, как это было описано выше. Следует отметить, что концентрация неорганического фосфора в придонном слое полагается постоянной, что соответствует постоянному притоку фосфора из донных отложений в воду. Результаты моделирования вертикального переноса распространяются на все автоматы системы.

Следующим этапом в работе модели является имитация горизонтального переноса тепла, растворенных веществ и фитопланктона. В этом случае интенсивность вихревого обмена полагается постоянной и не зависящей от плотности воды в соседних ячейках. Моделирование осуществляется в два приема, сначала по оси X , а затем по оси Y .

Заключительным этапом обработки одного временного шага модели является определение продукции и биомассы фитопланктона. При определении продукции ($PROD$) применяется закон минимума Либиха, широко используемый в моделях водных экосистем [Меншуткин, 2010].

$$\begin{aligned} \text{PROD} &= K1 * \min(K2 * \text{LIGHT}(i), \text{PHOS}(i)), \\ \text{PHYTO}(i, t + 1) &= (1 - M) * \text{PHYTO}(i, t) + \text{PROD}, \\ \text{PHOS}(i, t + 1) &= \text{PHOS}(i, t + 1) - \text{PROD}. \end{aligned}$$

Здесь M – коэффициент естественной смертности фитопланктона (потребление фитопланктона зоопланктонными фильтраторами не учитывается), $K1$ и $K2$ – коэффициенты согласования размерностей переменных.

После прохождения временного цикла происходит вывод графиков вертикального распределения величин TEM , $PHOS$ и $PHYTO$ как по времени, так и по глубине, а также диаграмм

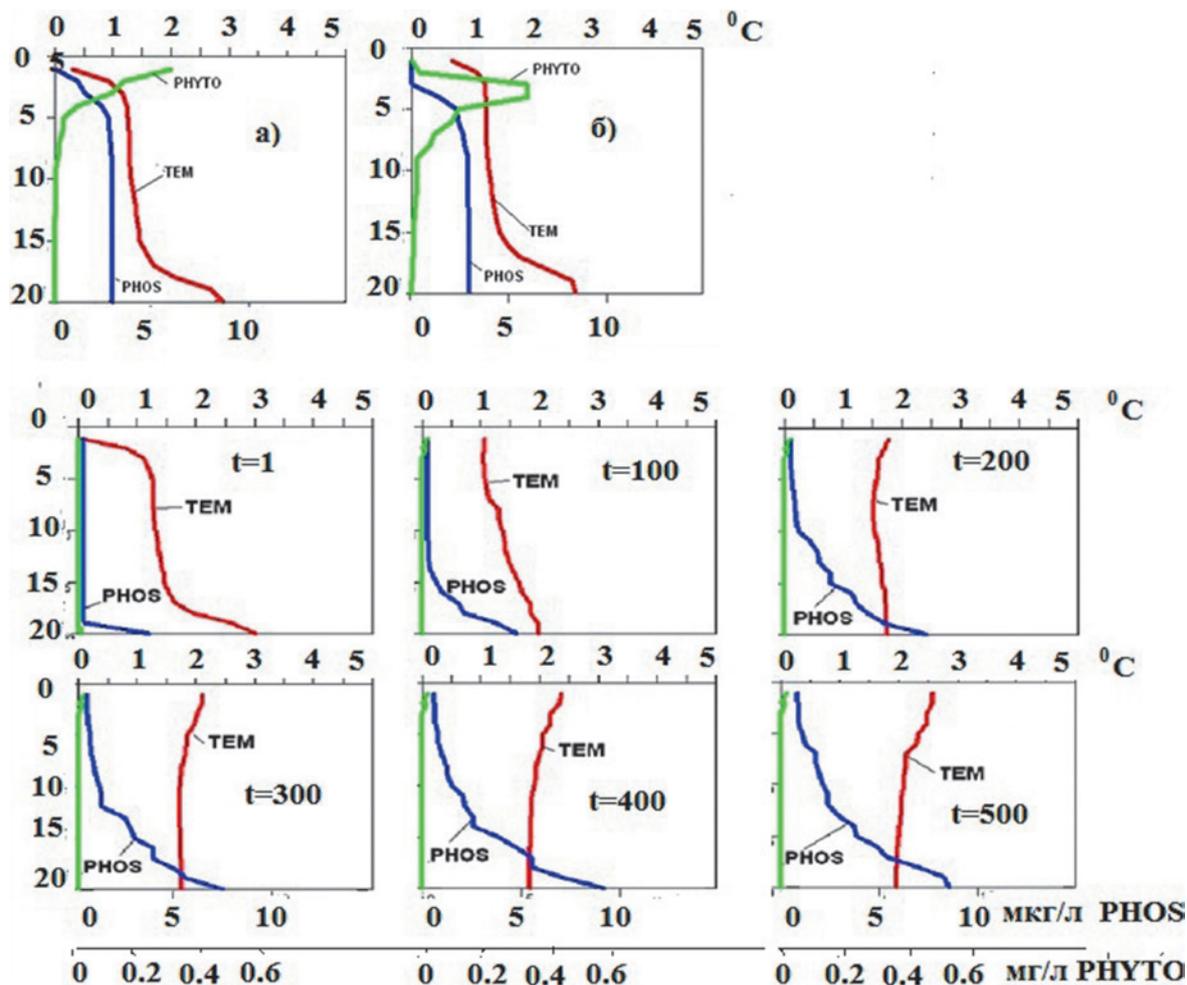


Рис. 6. Динамика вертикального распределения температуры (а) и концентрации (б) неорганического фосфора

неоднородностей горизонтального распределения этих величин в координатах X и Y.

Перейдем к описанию результатов моделирования. На рисунке 6 представлена динамика вертикального распределения температуры и концентраций неорганического фосфора при отключении блока имитации развития фитопланктона. Эта серия компьютерных экспериментов преследовала цель отладки модели и уточнения значений переходных эмпирических коэффициентов. Задача имитации конкретной природной ситуации в марте 2015 г. на Онежском озере не ставилась.

На рисунке 6 представлены неоднородности поля температур воды в подледном слое воды ($z = 1$) в различные моменты времени. Характер конфигураций неоднородностей, кроме случайного распределения, что характерно для систем клеточных автоматов, не претерпевает заметных изменений во времени. В придонном слое воды (рис. 7) наблюдалась иная картина. В начальные моменты времени распределение

температуры воды над поверхностью дна было равномерным или испытывало медленные крупномасштабные изменения. По мере проникновения до дна конвективных токов от нагревающейся в верхних слоях воды масштаб неоднородностей уменьшается со временем. К достижению состояния гомотермии эта неоднородность достигает крайней степени.

На рисунке 8 представлена неоднородность поля температур воды в придонном слое воды на $z = 19$ в различные моменты времени.

На рис. 9 представлена динамика развития фитопланктона с течением времени. Обращает на себя внимание увеличение глубины максимума биомассы фитопланктона по мере прогревания водоема. Сходное явление наблюдается и на открытой воде уже после окончания периода гомотермии. Что это – природная закономерность или результат применения одной и той же формы модели, – вопрос, который можно выяснить только на основе натуральных, а не модельных экспериментов.

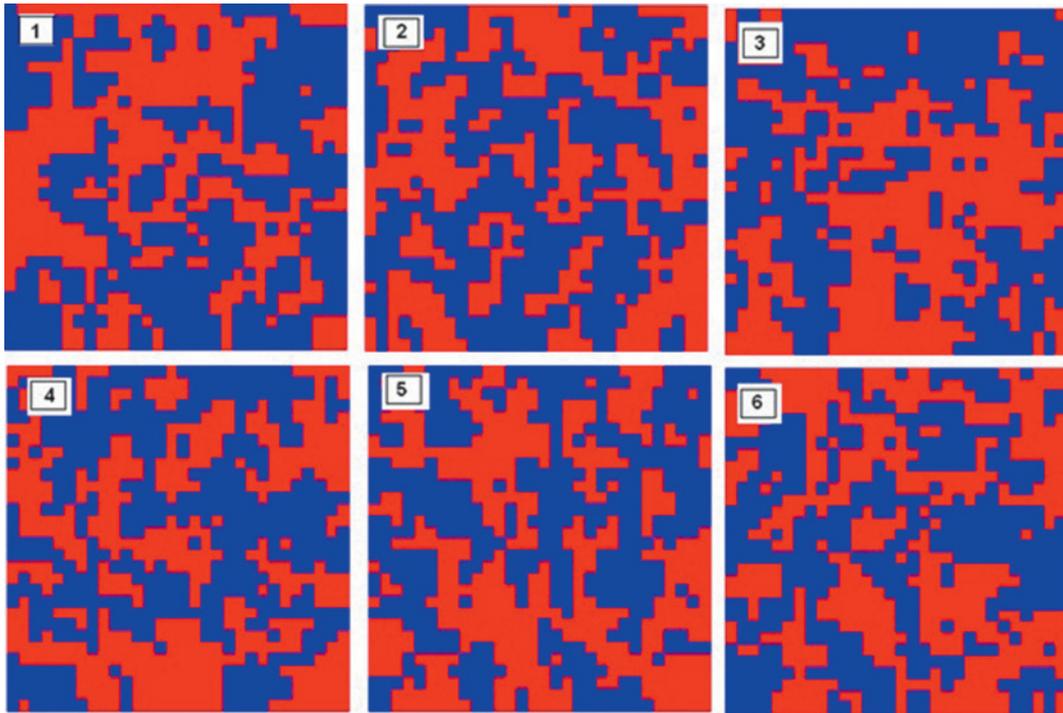


Рис. 7. Неоднородность поля температур воды в подледном слое воды ($z = 1$) в различные моменты времени (1-й шаг 34, 2-й шаг 42, 3-й шаг 85, 4-й шаг 187, 5-й шаг 415, 6-й шаг 496). Красным цветом отмечены ячейки, в которых температура воды превышает среднюю величину температуры по всей горизонтальной плоскости в данный момент времени. Синим цветом – ячейки с более низкой температурой воды

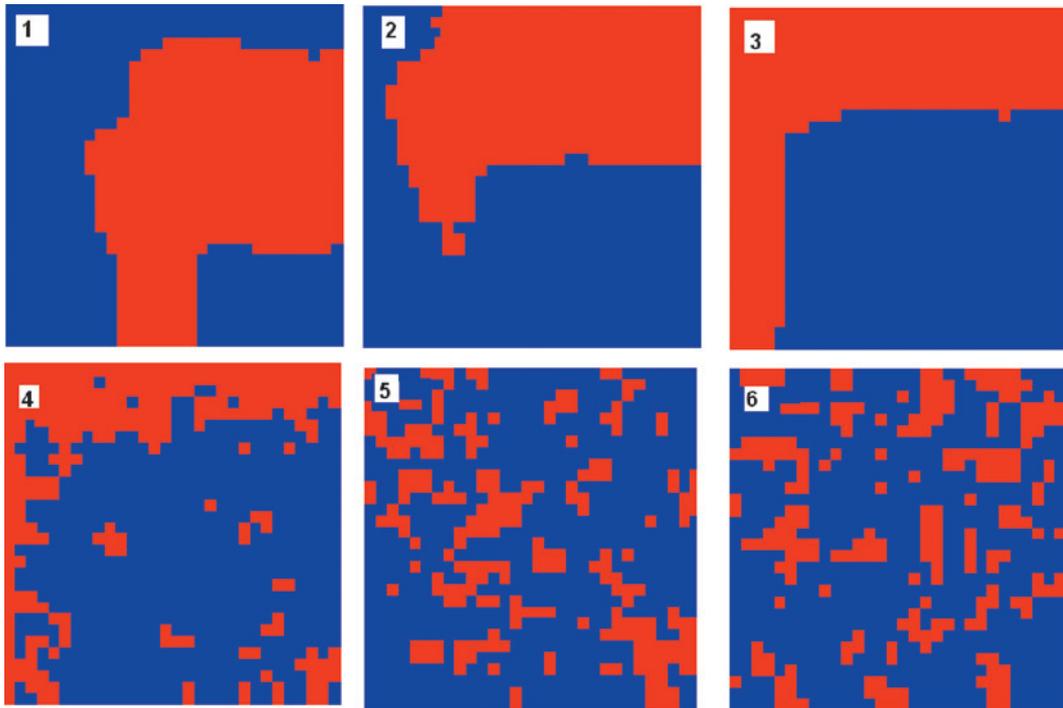


Рис. 8. Неоднородность поля температур воды в придонном слое воды ($z = 19$) в различные моменты времени (1-й шаг 34, 2-й шаг 42, 3-й шаг 85, 4-й шаг 187, 5-й шаг 415, 6-й шаг 496)

Распределение биомассы фитопланктона в горизонтальной плоскости (рис. 10), по существу, идентично распределению температуры (рис. 8), хотя и не повторяет его.

При сопоставлении данных модельного исследования и натуральных измерений, полученных на Ладожском и Онежском озере в 2015 г. [Annual report..., 2015], следует принимать во

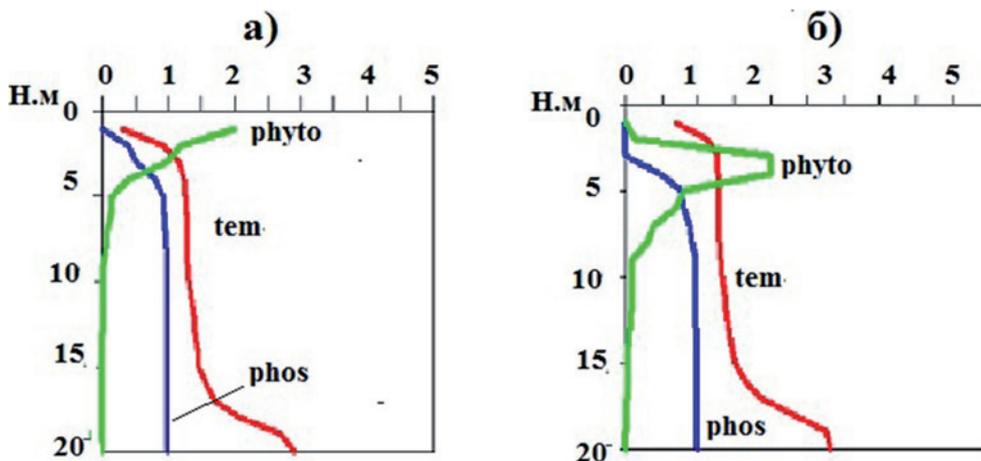


Рис. 9. Вертикальные распределения температуры (ТЕМ), концентрации неорганического фосфора (PHOS) и фитопланктона (PHYTO) в начальный (а) и развитый (б) период прогрева подледного слоя воды

внимание принятые упрощения и допущения в интерпретации природных процессов при формировании динамики подледной экологической системы. В модели при описании термического режима подледного слоя воды учитывался только прогрев воды за счет проникающей через лед солнечной радиации. В реальности это только одна из составляющих теплового баланса в системе «атмосфера – ледяной покров – подледный слой воды». Как показали многолетние исследования на Байкале [Меншуткин, 1964; Гранин и др., 1998; Wuest et al., 2005], существенную роль в тепловом балансе играет турбулентный теплообмен с воздушной средой и испарение с верхней поверхности льда. Допущение о процессе турбулентной конвекции в виде системы одинаковых вихревых ячеек клеточными автоматами является не более чем гипотезой. Представление о иерархической структуре вихрей разного размера [Филатов, 1983] имеет право на рассмотрение, в пользу этого говорит различие масштабов неоднородностей поля температур, полученное при исследовании данной модели (рис. 8 и 10).

В рассматриваемой модели не учитывается влияние на функционирование экосистемы постоянных подледных течений, наличие которых, во всяком случае на Байкале, не вызывает сомнений [Жданов и др., 2002], а в Ладожском и Онежском озерах такие течения зимой очень слабые, менее 2 см/с [Филатов, 1983; Annual report..., 2015]. Градиент скорости течения может существенно повлиять на оценку перемешивания. Игнорирование в модели суточных колебаний подводной освещенности и тепловых потоков при относительно коротком временном шаге также могут привести

к определенным искажениям, которые желательно учесть в дальнейшем развитии модели при наличии новых экспериментальных данных и более совершенной сеточной области.

Выводы

Модель динамики экосистемы подо льдом крупного озера с использованием клеточных автоматов дает возможность описать синергетику процессов в сложной экосистеме озера. Позволяет учитывать пространственные неоднородности, процессы перемешивания, подледной конвекции, локальные особенности происходящих подо льдом процессов, характерные для такого крупного озера, как



Рис. 10. Неоднородность распределения биомассы фитопланктона в подледном слое воды

Онежское, описание которых было получено по результатам комплексных экспериментов подо льдом, проведенных на Онежском озере в 2015 г.

Экспериментальные исследования на озерах выполнены в рамках российско-швейцарского проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений» за счет гранта, предоставленного фондом ELEMО (Лозанна, Швейцария), а моделирование экосистемы озера – за счет гранта РФ № 14-17-00740.

Литература

Астафьев Г. Б., Короновский А. А., Хромов А. Г. Клеточные автоматы. Саратов: Саратовский ун-т, 2003. 24 с.

Афанасьев И. В. Клеточно-автоматная модель динамики численности организмов озера Байкал // Прикладная дискретная математика. 2012. № 1. С. 261–267.

Гранин Н. Г., Гнатовский Р. Ю., Жданов А. А. и др. Конвекция и перемешивание подо льдом озера Байкал // Сибирский экологический журнал. 1998. № 6. С. 597–600.

Жданов А. А., Гранин Н. Г., Шимараев М. Н. Подледные течения Байкала на основе новых экспериментальных данных // География и природные ресурсы. 2002. № 3. С. 79–83.

Митрофанова Е. Ю., Кириллов В. В., Котовщиков А. В. Подледный фитопланктон глубокого олиготрофного озера // Ползуновский вестник. 2006. № 2. С. 327–333.

Меншуткин В. В. Имитационное моделирование водных экологических систем. СПб.: Наука, 1993. 156 с.

Меншуткин В. В. Гидрология подледного слоя воды в Байкале // Элементы гидрометеорологического режима озера Байкал // Труды ЛИН. 1964. Т. 5 (25). С. 52–63.

Меншуткин В. В. Теплообмен через ледяной покров Южного Байкала // Элементы гидрометеорологического режима озера Байкал // Труды ЛИН. 1964. Т. 5 (25). С. 64–81.

Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 24–38.

Монин А. С., Озмидов Р. В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 319 с.

Petrova N. A. Seasonality of Melosira-plankton of the great northern lakes. Hydrobiologia 138: 1986. P. 65–73.

Тоффоли Е., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991. 283 с.

Филатов Н. Н. Динамика озер. М.: Гидрометеиздат, 1983. 191 с.

Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 406 с.

Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne; Petrozavodsk. 2015. 143 p.

Assel R. A. NOAA Atlas. An Electronic Atlas of Great Lakes Ice Cover, Winters: 1973–2002. Great Lakes Environmental Research Lab., Ann Arbor, MI. (2003a). URL: <http://www.glerl.noaa.gov/data/ice/atlas/> (дата обращения: 06.03.2016).

Bondarenko N. A., Belykh O. I., Golobokova L. P. et al. Stratified Distribution of Nutrients and Extremophile Biota within Freshwater Ice Covering the Surface of Lake Baikal // The Journal of Microbiology. 2012. Vol. 50, no. 1. P. 8–16. doi: 10.1007/s12275-012-1251-1

Chua L. O. CNN: A Paradigm for Complexity. Berkeley: World Scientific Series on Nonlinear Science. University of California, 1998. 320 p.

Kirillin G., Lepparanta M., Terzhevik A. et al. Physics of seasonally ice-covered lakes, a revive // Aquatic Science. 2012. No. 74. P. 659–682.

McKay M., Beall B., Bullerjahn G., Woityra W. Winter limnology on the Great Lakes: The role of the U. S. Coast Guard // Journal of Great Lakes Research 37. 2011. P. 207–210.

Patten B. Environs: realistic environment particles in ecology // American Naturalist. 1982. Vol. 119. P. 179–219.

Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne; Petrozavodsk. 2015. 143 p.

Rozmarynowycz M. J. Spatio-temporal distribution of microbial communities in the Laurentian Great Lakes. A Dissertation Submitted to the Graduate College of Bowling Green State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy. December 2014. 168 p.

Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego Great European Lakes, observations and modeling. Springer-Praxis, 2010. 302 p.

Surter B., Finstad A. G., Helland I. P. et al. The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change // Aquatic Science. 2012. No. 74. P. 637–657. doi: 10.1007/s00027-012-0274

Terzhevik A. Proceedings 4th European Large Lakes Symposium – Ecosystem Services and Management in a Changing World. Joensuu, Finland. August 24–28, 2015.

Wolfram S. A new kind of science. USA: Wolfram Media Inc., 2002. 1197 p.

Wuest A., Rawens T. M., Granin N. G. et al. Cold intrusion in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal // Limnol. Oceanogr. Vol. 50 (1). 2005. P. 184–187.

Zdorovenov R., Zdorovenova G., Terzhevik A. et al. Under Ice convection – from small-scale physical processes to large-scale biological implications. In: Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.

Поступила в редакцию 11.03.2016

References

- Afanas'ev I. V. Kletochno-avtomatnaya model' dinamiki chislennosti organizmov ozera Baikal [A cellular automata model for the dynamics of organisms population in Baikal]. *Prikladnaya diskretnaya matematika [Applied discrete mathematics]*. 2012. No. 1. P. 261–267.
- Astaf'ev G. B., Koronovskii A. A., Khromov A. G. Kletochnye avtomaty [Cellular automata]. Saratov: Saratovskii un-t, 2003. 24 p.
- Granin N. G., Gnatovskii R. Yu., Zhdanov A. A., Tsekhanovskii V. V., Gorbunova L. A. Konvektsiya i peremeshivanie podo l'dom ozera Baikal [Convection and mixing under the ice of Lake Baikal]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal [Siberian ecological journal]*. 1998. No. 6. P. 597–600.
- Filatov N. N. Dinamika ozer [Lake dynamics]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1983. 191 p.
- Khaken G. Sinergetika [Synergetics]. Moscow: Mir, 1980. 406 p.
- Menshutkin V. V. Imitatsionnoe modelirovanie vodnykh ekologicheskikh system [Simulation of aquatic ecosystems]. St. Petersburg: Nauka, 1993. 156 p.
- Menshutkin V. V. Gidrologiya podlednogo sloya vody v Baikale. Elementy gidrometeorologicheskogo rezhima ozera Baikal [Hydrology of subglacial water layer in Lake Baikal. Elements of the hydrometeorological regime of Lake Baikal]. *Trudy LIN [Proc. LIN]*. 1964. Vol. 5 (25). P. 52–63.
- Menshutkin V. V. Teploobmen cherez ledyani pokrov Yuzhnogo Baikala. Elementy gidrometeorologicheskogo rezhima ozera Baikal [The heat exchange through ice cover of Southern Baikal. Elements of the hydrometeorological regime of Lake Baikal]. *Trudy LIN [Proc. LIN]*. 1964. Vol. 5 (25). P. 64–81.
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Modelirovanie ekosistem presnovodnykh ozer (obzor) 2. Modeli ekosistem presnovodnykh ozer [Ecosystem modeling of freshwater lakes (review): 2. Models of freshwater lake's ecosystem]. *Vodnye resursy [Water resources]*. 2014. Vol. 41, no. 1. P. 24–38.
- Mitrofanova E. Yu., Kirillov V. V., Kotovshchikov A. V. Podlednyi fitoplankton glubokogo oligotrofnogo ozera [Under-ice phytoplankton of a deep oligotrophic lake]. *Polzunovskii vestnik [Polzunovsky vestnik]*. 2006. No. 2. P. 327–333.
- Petrova N. A. Seasonality of Melosira-plankton of the great northern lakes. *Hydrobiologia* 138: 1986. P. 65–73.
- Toffoli E., Margolus N. Mashiny kletochnykh avtomatov [Cellular automata machines]. Moscow: Mir, 1991. 283 p.
- Zhdanov A. A., Granin N. G., Shimaraev M. N. Podlednye techeniya Baikala na osnove novykh eksperimental'nykh dannykh [Under-ice currents of Lake Baikal (based on the new experimental data)]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*. 2002. No. 3. P. 79–83.
- Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.
- Assel R. A. NOAA Atlas. An Electronic Atlas of Great Lakes Ice Cover, Winters: 1973–2002. Great Lakes Environmental Research Lab., Ann Arbor, MI. (2003a). URL: <http://www.glerl.noaa.gov/data/ice/atlas/> (accessed: 06.03.2016).
- Bondarenko N. A., Belykh O. I., Golobokova L. P., Artemyeva O. V., Logacheva N. F., Tikhonova I. V., Lipko I. A., Kostornova T. Ya., Parfenova V. V., Khodzher T. V., Tae-Seok Ahn, Young-Gun Zo. Stratified Distribution of Nutrients and Extremophile Biota within Freshwater Ice Covering the Surface of Lake Baikal. *The Journal of Microbiology*. 2012. Vol. 50, no. 1. P. 8–16. doi: 10.1007/s12275-012-1251-1
- Chua L. O. CNN: A Paradigm for Complexity. Berkeley: World Scientific Series on Nonlinear Science. University of California, 1998. 320 p.
- Kirillin G., Lepparanta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhard J., Engelhoart C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenнова T., Zdorovennov R. Physics of seasonally ice-covered lakes, a revive. *Aquatic Science*. 2012. No. 74. P. 659–682.
- McKay M., Beall B., Bullerjahn G., Woityra W. Winter limnology on the Great Lakes: The role of the U. S. Coast Guard. *Journal of Great Lakes Research* 37. 2011. P. 207–210.
- Patten B. Environs: realistic environment particles in ecology. *American Naturalist*. 1982. Vol. 119. P. 179–219.
- Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.
- Rozmarynowycz M. J. Spatio-temporal distribution of microbial communities in the Laurentian Great Lakes. A Dissertation Submitted to the Graduate College of Bowling Green State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy. December 2014. 168 p.
- Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego Great European Lakes, observations and modeling. *Springer-Praxis*, 2010. 302 p.
- Surter B., Finstad A. G., Helland I. P., Zweimuller I., Holker F. The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. *Aquatic Science*. 2012. No. 74. P. 637–657. doi: 10.1007/s00027-012-0274
- Terzhevik A. Proceedings. 4th European Large Lakes Symposium – Ecosystem Services and Management in a Changing World. Joensuu, Finland. August 24–28, 2015.
- Wolfram S. A new kind of science. USA: Wolfram Media Inc., 2002. 1197 p.
- Wuest A., Rawens T. M., Granin N. G. et al. Cold intrusion in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 50 (1). 2005. P. 184–187.
- Zdorovennov R., Zdorovennova G., Terzhevik A., Bouffard D., Wüest A. Under Ice convection – from small-scale physical processes to large-scale biological implications. In Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.

Received March 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Меншуткин Владимир Васильевич

главный научный сотрудник, д. б. н., проф.
Санкт-Петербургский экономико-математический
институт РАН
ул. Сызранская, 28–1, Санкт-Петербург, Россия, 191187
эл. почта: menshutkina.n@gmail.com

Филатов Николай Николаевич

главный научный сотрудник лаб. географии и гидрологии,
чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

CONTRIBUTORS:

Menshutkin, Vladimir

St. Petersburg Institute for Economics and Mathematics,
Russian Academy of Sciences
28–1 Syzranskaya St., 191187 St. Petersburg, Russia
e-mail: menshutkina.n@gmail.com

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru