

## ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И МОДЕЛИРОВАНИИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭКОСИСТЕМ КРУПНЫХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ

Н.Н. Филатов<sup>1</sup>, В.В. Меншуткин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский институт экономики и математики РАН, Санкт-Петербург, Россия

## INNOVATIVE METHODS IN EXPERIMENTAL RESEARCHES AND MODELING OF HYDROPHYSICAL PROCESSES AND ECOSYSTEMS OF MAJOR STRATIFIED WATER BODIES

N.N. Filatov<sup>1</sup>, V.V. Menshutkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Water Problems of the North, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

*Представлены сведения о разработке и внедрении методов экспериментальных исследований, проблемы «традиционного» и «инновационных» подходов к созданию моделей экосистем внутренних водоемов.*

*Presents information on the current states of the development and implementation of experimental research methods and examples of the "traditional" and "innovative" approaches to the development of ecosystem models of inland waters.*

Важная задача настоящей работы состоит в том, чтобы продемонстрировать возможность организации натуральных экспериментов в более контролируемых, чем в океанах условиях, при меньшем числе влияющих факторов, например, при отсутствии приливов, солености, планетарных волн Россби, механизма двойной диффузии в крупных озерах для калибровки и верификации математических моделей. Успешное решение задачи верификации математических моделей зависит от чёткости постановки задачи и ясного определения понятий, которыми оперируют при верификации, т.е. от того, в каком виде представляются данные наблюдений, период их осреднения и способы фильтрации для сравнения с результатами численных экспериментов.

Требуется разработка систем принятия управленческих решений, основанных на математических моделях. Отсутствие таких систем приводит к серьезным проблемам рационального использования, управления ресурсами водоемов, например, таким, которые произошли с озером Байкал в период маловодья в 2015-2017 гг. При решении задач рационального использования и управления ресурсами озер возрастает роль наблюдений (мониторинга) и целенаправленных научных исследований. При решении последней задачи предполагается, что состояние объекта управления полностью известно. Такая ситуация, пользуясь терминологией теории игр, называется игрой с природой при полной информации. Однако на практике дело обстоит совсем не так. О состоянии управляемой экосистемы можно судить только по данным наблюдений, которые никогда не бывают полными и исчерпывающими [1].

Для озер имеются своеобразные проблемы, которые усложняют моделирование экосистем по сравнению с морями, т.к. в озерах погранслои занимают значительно больший относительный объем, чем в морях; аномальные свойства пресной воды – максимальная плотность воды при 3.98 °C приводит к формированию такого явления, как термический фронт или термобар. Для Белого моря имеется опыт калибровки и верификации 3-D математических моделей гидродинамики. Это разработка системы оперативного мониторинга - COM; моделей экосистем, созданных И.А. Нееловым и О.П. Савчуком [3], а также комплекса моделей Green JASMIN, основанного на ранее созданной для Ледовитого океана модели термогидродинамики ФЕМАО [2].

Менее изученными в настоящее время являются мезо - и суб - мезомасштабные процессы в морях и озерах (вихревые структуры, внутренние волны, в том числе и нелинейные), которые вносят значительный вклад (более 50 %) в спектры флуктуаций течений и температуры воды в

диапазоне от нескольких месяцев до частоты  $N$  в океанах, морях и озерах. Они играют существенную роль в формировании химико-биологических полей, поэтому их исследование представляется актуальным для решения широкого круга экологических задач.

Важным преимуществом проведения специализированных экспериментов в замкнутых морях и, особенно в озерах является гораздо большая техническая простота и существенно меньшая стоимость исследований. Определенные преимущества проведения экспериментов состоят в том, что имеется возможность организации и проведения долговременных (месяцы и даже годы) наблюдений температуры, течений, уровня воды, которые при необходимости могут охватывать всю акваторию озера или его часть, с постановкой сети автономных буйковых станций, судовых измерений одновременно с одного или одновременно нескольких судов [1], что позволяет получить информацию о широком спектре гидрофизических полей. Здесь же возможна организация подспутниковых экспериментов, разработка и совершенствование разнообразных дистанционных методов. Определенная простота проведения численных экспериментов определяется не только относительно малыми размерами водоемов, и "короткой" памятью гидрофизических процессов, т.к. димиктические озера замерзают на несколько месяцев. Важным преимуществом является также простота и естественность задания граничных условий в замкнутых водоемах по данным надежных измерений расходов воды рек, поле ветра, уровня воды.

Серьезной проблемой является то, что математические модели, на которых могут быть основаны системы поддержки принятия управленческих решений (СППУР) озер в России, не являются «продуктами», а работают только в «руках» создателей. Отсутствие необходимых математических моделей для СППУР приводит к тому, что приходится принимать решения по регулированию уровня воды озера Байкал не в соответствии с принятым Законом о Байкале, путем Постановления Правительства РФ.

Разработанный ранее в СПб ЭМИ РАН при участии ИНОЗ и ИВПС КарНЦ РАН комплекс для моделирования гидрофизических процессов и экосистем позволил выполнить диагноз и прогнозы изменения экосистем Ладожского и Онежского озер, оценить предельную биогенную нагрузку, ассимиляционный потенциал озер [1]. Однако этот комплекс имел определенные недостатки. Например, слабое задание атмосферных воздействий, недостаточное точное описание ледяного покрова и параметризации подсеточных процессов.

Для создания более совершенного комплекса моделей для диагноза и прогноза озерных экосистем для широкого диапазона временных масштабов в рамках программы РФ «Озера России - диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» создается новая модель термогидродинамики (ТГД), разработанная ранее для Каспийского моря Р.А.Ибраевым [4]. В настоящее время модель ТГД адаптирована для Ладожского и Онежского озер, позволяет воспроизводить циркуляции как климатического масштаба, так мезомасштабов. Эта модель сопряжена с экосистемным блоком [5]. Разрабатываемый комплекс моделей ТГД и экосистем реализован на кластерах ИВМ и КарНЦ РАН, может использовать более мелкие, порядка 0.5 км сетки, которые позволяют более корректно, чем в моделях СПб ЭМИ РАН, описать мезомасштабные процессы в озерах; воспроизводить формирование и разрушение ледяного покрова, а также мезомасштабные волно-вихревые неоднородности и термобар. В этой модели явным образом описываются потоки воды через боковые границы (сток рек) и поверхность раздела воздух-вода (испарение, осадки). Предполагается, что создаваемый комплекс моделей для Ладожского и Онежского озер может в перспективе использоваться для систем поддержки принятия решений для других крупных стратифицированных озер, например, для озер Байкал, Телецкое и др.

В последние 5 лет также по инициативе академиков А.С. Саркисяна и В.П. Дымникова специалистами ИВМ РАН, ИПМИ КарНЦ РАН и ИВПС КарНЦ РАН создается более совершенный комплекс моделей термогидродинамики и экосистем - Green JASMINE на примере Белого моря. Комплекс включает блок термогидродинамики JASMINE [2], который разработан на основе модели FEMAO, созданной для Северного Ледовитого океана Н.Г. Яковлевым и химико-биологического блока – BFM (<http://bfm-community.eu>. 15.08.2018.). Одним из недостатков блока моделей BFM является необходимость задания слишком большого числа коэффициентов и параметров, которые не известны из наблюдений, в отличие от задания ограниченного числа, но надежно определенных параметров в моделях О.П. Савчука [3, 9].

После завершения надежной калибровки и верификации модели Green JASMINE на примере Белого моря, разработанный комплекс моделей предполагается использовать для моделирования экосистем других морей Арктики.

Рассмотрим другие подходы для описания гидрофизических и химико-биологических процессов, которые создаются и используются, прежде всего, в тех случаях, когда уровень знаний о моделируемых процессах или явлениях не позволяет применять формальный аппарат, или когда отношения между объектами в модели не имеют количественной оценки и регулируются только причинно-следственными связями. Для описания процессов, происходящих в водных экологических системах, был использован математический аппарат, существенно отличающийся от традиционного использования дифференциальных уравнений, а именно т.н. стохастические клеточные автоматы [6]. Идея использования клеточных автоматов, сформулирована Джоном фон Нейманом [6]. По существу, это означает переход от традиционного метода описания экологической системы с помощью системы дифференциальных уравнений к использованию представлений дискретной математики. 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 озерах Байкал и гидрофизических и химико-биологических процессов как подо льдом, так и в период открытой воды в Ладожском и Онежском озерах [7]. Основная задача состояла в том, чтобы описать синергетику комплекса физико-химико-биологических процессов в период от устойчивого ледяного покрова до его начала разрушения в условиях подледной конвекции для лучшего понимания функционирования сложной экосистемы подо льдом [7, 8]

Для создания модели экосистемы подо льдом Онежского озера пространство разбивалось на 18000 дискретных объемов воды (20 по глубине, 30 на 30 по горизонтали с шагом 1 м), 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.

Наиболее принципиальным является задание процессов обмена, перемешивания. Была отработана схема из комплекса вихрей разного размера [8]. Этот подход был применены также для создания компьютерной модели распространения консервативной примеси, оценки загрязнения водоема и термического режима Ладожского озера [8]. Созданные модели рассчитаны на возможность их дальнейшего расширения за счет введения в них гидрохимических и гидробиологических переменных для моделирования экосистем озер.

Применительно к проблемам внутренних водоемов и их водосборов, необходимо исследовать динамику не только экологических систем самого водоема (моря или озера), но и процессов, происходящих в регионах (субъектах РФ) на водосборном бассейне в окружающей среде, экономике и социальной сфере, а также изменения климата. Все это требует учета множества разнообразных параметров. Для решения таких сложных задач применяют когнитивные модели, которые востребованы для решения задач рационального использования и сохранения ресурсов водоемов и водосборов, создания систем поддержки принятия управленческих решений. Такие сложные задачи существенно меняют требования к натурным экспериментальным данным и моделированию гидрофизических процессов и экосистем. Основная трудность при построении обобщающих моделей подобного типа заключается в качественной разнородности величин, характеризующих состояние подсистем, составляющих единое целое. При конструировании когнитивной модели некоторые объекты заменяются системой логических связей, которые подбираются на основании знаний, устанавливают зависимости между переменными моделируемого объекта. Из-за «размытости» исходных данных и связей разных данных используется аппарат нечеткой или размытой логики (fuzzy logic) [см.1]. Социо-эколого-экономическая модель Белого моря и его водосбора (Беломорья) на основе когнитивного подхода, созданная впервые [10], включает четыре блока: климатический, экосистемный, социально-экономический и управленческий. Управленческая часть модели посвящена описанию и разработке механизма централизованного и местного управления системой. Цель этого управления заключается в достижении устойчивого развития всей социально-экономической системы при различных сценариях изменения экосистем, климатических условий, инвестиций и структурных изменениях самой системы. Экосистемная часть модели представляет собой свертку результатов исследования модели Белого моря,

разработанную О. П. Савчуком и И. А. Нееловым [см.3, 9]. Модель отражает в основном тенденции изменения переменных, но не их абсолютные величины. Этот подход позволяет на качественном уровне подойти к решению проблемы оптимального управления социо-эколого-экономическими процессами в регионах, расположенных на водосборе Белого моря [9].

#### **Заключение.**

В настоящее время разработано достаточно много моделей термогидродинамики и экосистем. Нужно ли в дальнейшем разрабатывать еще большее их число? Можно отметить, что даже при сходимости абиотических условий и общности основных механизмов функционирования экосистем в разных водоемах, приоритетность механизмов зачастую различается и потому требуется создание или адаптация моделей для уникальных внутренних водных экосистем, таких как Белое и Каспийское моря, озера Байкал, Ладожское и Онежское.

Точность описания свойств гидрофизических процессов и явлений, водной экосистемы ее моделью зависит как от достоверности теоретических сведений, положенных в основу модели, так и от точности информации о состоянии реального водоема. В докладе будет показано, что имеется слишком малый объем качественных данных для калибровки и верификации математических моделей. Также недостаточно математических моделей – продуктов, разработанных в РФ, необходимых для решения теоретических и практических задач. Работа выполнена в ИВПС ФИЦ КарНЦ РАН.

#### **Литература**

1. Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. / Модели экосистем пресноводных озер. Водные ресурсы, Том 41, номер 1, 2014, С.24-38.
2. Чернов И.А., Толстикова А.В., Яковлев Н.Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда / Труды КарНЦ РАН. Серия «Математическое моделирование и информационные технологии». № 8. 2016. С.116-128.
3. Savchuk O.P., B.G. Gustafson, and B. Muller-Karulis. 2012.BALTSEM: A marine model for decision support within the Baltic Sea Region. BNI Technical Report 7.59 p.
4. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008.130 с.
5. Зверев И.С., Ушаков К.В., Шипунова Е.А., Голосов С.Д., Ибраев Р.А. Моделирование гидротермодинамики Ладожского озера / Всероссийская конференция по крупным внутренним водоёмам (V Ладожский симпозиум). Сборник научных трудов конференции. СПб.: Лема, 2016. С.41-49.
6. Wolfram S. A new kind of science. USA. Wolframs Media. 2002. 1197 p.
7. Меншуткин В. В., Филатов Н. Н. Модель подледной экологической системы озера, основанная на применении клеточных автоматов / Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 76–87. doi: 10.17076/lim329.
8. Меншуткин В.В. Филатов Н.Н. Модели Ладожского озера с использованием трехмерных клеточных автоматов. Труды Карельского научного центра РАН. № 3. 2017. С.1–10.
9. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов». Изд. КарНЦ РАН, Петрозаводск. 2007. 187 с.
10. Меншуткин В.В., Филатов Н.Н., Дружинин П.В. Состояние и прогнозирование социо-эколого-экономической системы водосбора Белого моря с использованием когнитивного моделирования. М. Арктика. Экология. Экономика. №2 (30). 2018. С.79-85.