

УДК 556.556.+551.465+502.51(28)

© Н. Н. Филатов

Институт водных проблем Севера, «Карельский научный центр РАН»
nfilatov@rambler.ru**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И ЭКОСИСТЕМ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ (Обзор)**

Статья поступила в редакцию 15.08.2018, после доработки 06.12.2018.

Рассматривается изученность и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем крупных озер и Белого моря. Представлены рекомендации по постановке целенаправленных исследований, необходимых для создания, калибровки и верификации численных моделей для прогноза изменений экосистем. Показаны преимущества организации специализированных исследований на полигонах в озерах и Белом море по сравнению с постановкой подобных экспериментов в океане. Представлены как традиционные подходы к моделированию физико-химико-биологических процессов, так и инновационные разработки для описания водных экосистем в условиях недостатка знаний, например для зимнего подледного режима, с применением т. н. метода конечных автоматов. Предлагаются оценки изменений экосистем для решения задач рационального использования и сохранения ресурсов водоемов. Приведены сведения об использовании когнитивного подхода для описания социо-эколого-экономических процессов системы водоем-водосбор. Обосновывается необходимость создания специализированных полигонов для создания новых прорывных технологий в области гидрологии, океанологии, метеорологии и климатологии, совершенствования системы мониторинга. Показана необходимость объединения средств и возможностей разных организаций для постановки комплексных экспериментов и создания моделей для решения задач рационального использования внутренних водоемов.

Ключевые слова: гидрофизика, экосистемы, климат, конечные автоматы, когнитивные модели.*N. N. Filatov*

Northern water problems institute of Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Petrozavodsk

**THE MODERN STATE AND PERSPECTIVE INVESTIGATIONS OF HYDROPHYSICAL
PROCESSES AND ECOSYSTEMS OF INLAND WATERS (A REVIEW)**

Received 15.08.2018, in final form 06.12.2018.

The state of knowledge about the study of the hydrophysical processes and ecosystems of large lakes and the White Sea are considered. The data are presented that are needed for obtaining new knowledge necessary to create basic numerical models for predicting ecosystem changes with calibration and verification of numerical models. The advantages of setting up specialized surveys at research polygons in the lakes and the White Sea are demonstrated compared to organizing such experiments in the ocean. Both the traditional approaches to modeling physical-chemical-biological processes, and innovative developments for describing aquatic ecosystems where knowledge is lacking are represented, e.g. for the ice-covered winter conditions using so-called finite automata method. Ecosystem change estimates are suggested, to be applied for sustainable management and conservation of the resources of waterbodies. Information about the application of the cognitive approach in describing the socio-ecological-economic processes in the waterbody-catchment system is provided. The necessity of creating multipurpose polygons to create advanced technologies in the field of hydrology, oceanology, meteorology and climatology, and improvement of the monitoring system is substantiated. It is argued that the resources and capacities of various organizations need to be united to arrange integrated experiments and build models for dealing with the tasks of the rational management of internal waters.

Keywords: hydrophysics, ecosystems, climate, finite automata, cognitive models.

Ссылка для цитирования: *Филатов Н. Н.* Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 3—14.

For citation: *Filatov N. N.* The modern state and perspective investigations of hydrophysical processes and ecosystems of inland waters (a review). *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 3—14.

doi: 10.7868/S2073667319010015

Стратегическая задача комплекса наук о воде (океанологии, гидрологии, лимнологии-озероведения) состоит в создании теории динамики водных систем, способной к практическому прогнозированию не только в обычных, но и в экстремальных ситуациях [1]. Водная стратегия Российской Федерации [2], а также практика ставят перед комплексом наук о воде задачу рационального использования, оптимального управления ресурсами, сохранения экологических систем.

Одна из важных задач настоящей публикации — критически оценить современное состояние изученности в области гидрофизики и моделирования экосистем внутренних водоемов (крупных озер и Белого моря) для того, чтобы показать необходимость консолидации усилий разных организаций РФ для получения новых знаний об экосистемах, необходимых сведений для создания базовых численных моделей, которые должны использоваться для рационального использования водных и биологических ресурсов, водного транспорта, энергетики, рекреации, задач обороны.

В настоящей работе затронуты актуальные проблемы гидродинамики и экосистем внутренних водоемов, над которыми работал автор обзора совместно с коллегами из Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН (СПб ЭМИ РАН), Института озероведения РАН (ИНОЗ). Не рассматриваются здесь такие важные вопросы, как медленное восстановление экосистем озер после уменьшения антропогенной нагрузки, влияние вселенцев и цианобактерий, эвтрофирование озер, нановзвеси и ряд других ввиду ограниченности объема настоящей работы.

Изучение гидрофизических процессов и явлений в озерах необходимо для описания процессов переноса и их роли в функционировании, трансформации и переноса вещества, функционирования водных экосистем. Работы по калибровке и верификации трехмерных моделей течений, разработанных первоначально для океана А. С. Саркисяном [3], были выполнены в 1970—80-х гг. на Ладожском и Онежском озерах по программе «Разрезы» под руководством Г. И. Марчука [4], а также в рамках проекта «Озеро как модель океана» под руководством К. Я. Кондратьева [5, 6].

Данные специализированных экспериментов для внедрения трехмерных математических моделей термогидродинамики, первоначально разработанных для океана, таких как POM, NEMO [7, 8], использовались для моделирования циркуляции вод и функционирования экосистем Великих Американских озер [9, 10], а также Псковско-Чудского озера и Финского залива [11, 12] и др. водных объектов.

В рамках программы «Разрезы» на озерах Ладожском, Онежском и Севан были проведены специализированные эксперименты [13] для диагностических и прогностических моделей, разработанных А. С. Саркисяном с коллегами [3, 14], проведены численные эксперименты, связанные с воспроизведением среднесезонных, климатического масштаба и синоптических гидрофизических полей [5]. Разработанная и верифицированная модель дала возможность обосновать рекомендации по оптимальному регулированию уровня воды озера Севан, для улучшения качества вод. Эксперимент «Онего» [13] — пример постановки спланированных экспериментов для калибровки и верификации моделей, разработанных в СПб ЭМИ РАН [15]. Для получения новых знаний о комплексе гидрофизических процессов и явлений в озерах был реализован эксперимент «Ладекс» [13] по изучению внутренних волн, турбулентного перемешивания, циркуляций Ленгмюра. Специализированные натурные эксперименты для химико-биологического блока моделей экосистем Ладожского озера были спланированы и реализованы на продольном и поперечном разрезах Ладожского озера [16, 17]. Эксперименты по изучению широкого спектра гидрофизических процессов проводились на озере Байкал [18], а в последние годы — по изучению т. н. кольцевых структур на поверхности льда оз. Байкал [19]. Отметим также эксперименты по изучению нелинейных внутренних волн на Онежском озере [20] и многодисциплинарный Российско-Швейцарский проект под названием «Жизнь подо льдом» [21]. Безусловно, имеется множество других разнообразных натурных экспериментов, которые были реализованы на крупных озерах России, однако для калибровки и верификации гидрофизических и экосистемных моделей имеющихся данных крайне мало.

Белое море считается одним из самых изученных морей России, но данных измерений, которые можно использовать для задач моделирования недостаточно, а имеющиеся данные трудно сопоставить с результатами численных экспериментов [22]. Пожалуй, только для системы оперативного мониторинга [23] имелся достаточный объем сведений, необходимых для калибровки и верификации моделей. Данных спутниковых измерений для верификации моделей также недостаточно из-за того, что они приурочены в основном к поверхности водоемов. В связи с этим, требуется дальнейшее совершенствование дистанционных методов, разработка алгоритмов для изучения процессов в толще вод.

Для геофизической гидродинамики очевиден интерес, который представляет постановка специализированных экспериментов на озерах и в Белом море по изучению мезо- и субмезомасштабных процессов и явлений, таких как нелинейные внутренние волны, вихри, когерентные структуры. Исследования этих процессов были проведены как на Белом море, так и озерах [20, 24—26].

Важная задача настоящей работы состоит в том, чтобы продемонстрировать возможность организации натуральных экспериментов в более контролируемых, чем в океанах условиях. Это позволит откалибровать и верифицировать математические модели термогидродинамики и использовать их как базовые для решения задач рационального использования ресурсов. Эти задачи важны с точки зрения решения комплекса проблем в рамках проектов Арктика, а также целей, поставленных Советом безопасности РФ 20.11.2013 г. по сохранению ресурсов уникальных озер: Ладожское, Онежское, Байкал.

Новые сведения и надежно верифицированные модели составят основу для разработки систем принятия управленческих решений, связанных с оптимальным управлением водными системами при наличии многих пользователей (энергетика, водный транспорт, питьевое и промышленное водоснабжение, рекреация). При отсутствии таких систем, необходимых математических моделей возникают серьезные проблемы рационального использования и управления ресурсами водоемов, например таких, которые произошли с озером Байкал в период маловодья [27].

Однако для озер имеются специфические процессы, которые усложняют моделирование экосистем по сравнению с морями, т. к. в озерах пограничные слои занимают значительно больший относительный объем, чем в морях; аномальные свойства пресной воды (максимальная плотность воды при 3.98 °С) приводит к формированию такого явления, как термический фронт или термобар [13]. Это явление хорошо изучено, документировано для учета его в моделях термогидродинамики и экосистем, но для его воспроизведения в моделях требуются большие вычислительные мощности из-за необходимости высокого разрешения (не менее 0.5 км.) пространственной сетки при численных экспериментах.

Для Белого моря имеется опыт калибровки и верификации 3D-математических моделей системы оперативного мониторинга (СОМ) [28, 29], а также моделей экосистем, созданных И. А. Нееловым и О. П. Савчуком [30], и комплекса моделей Green JASMIN [31], основанного на ранее созданной для Ледовитого океана модели термогидродинамики ФЕМАО [32]. Перечисленные выше работы выполнялись по инициативе академиков А. С. Саркисяна и В. П. Дымникова, которые ставили задачу создания собственного продукта — комплекса моделей для диагноза и прогноза термогидродинамики и экосистем внутренних водоемов [33]. Однако для Белого моря имеются определенные трудности подготовки исходных данных, постановки граничных условий из-за «открытости» моря, плохо изученного водообмена с Баренцевым морем, сложной морфометрии, маргинальных фильтров. Поэтому продолжает оставаться актуальной постановка специальных экспериментов по калибровке и верификации моделей на примере крупных стратифицированных озер и морей.

Гидрофизические процессы и изменения экосистем внутренних водоемов: натурные и численные эксперименты. С точки зрения геофизической гидродинамики критерием отнесения озера к крупному или великому [34] является параметр Бургера (Burger) S , который представляет отношение внутреннего (бароклинного) радиуса деформации Россби $R_R = c/f$ к характерному горизонтальному размеру озера [34]:

$$S = g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{\sqrt{D}}{Lf} = \frac{c_i}{Lf},$$

где D — характерная глубина, L — горизонтальные размеры стратифицированного водоема, c — фазовая скорость баротропных или бароклинных волн, f — параметр Кориолиса.

На рис. 1 показаны пространственно-временные масштабы основных гидрофизических процессов и явлений, которые наблюдаются в крупных стратифицированных озерах.

Для очень крупных озер мира R_R составляет несколько километров, S_i в период летней стратификации 0.03—0.05. В таких озерах формируется бароклинные волны Кельвина и Пуанкаре, крупномасштабные течения, имеющие тенденцию к циклонической циркуляции [13]. Для крупных озер характерные значения основных гидрофизических характеристик (скорость течения, градиенты температуры, колебания уровня, вертикальные составляющие скорости течений и др.) сравнимы с океаническими. Числовые значения основных безразмерных параметров для крупнейших озер сравнимы с океаническими (табл. 1).

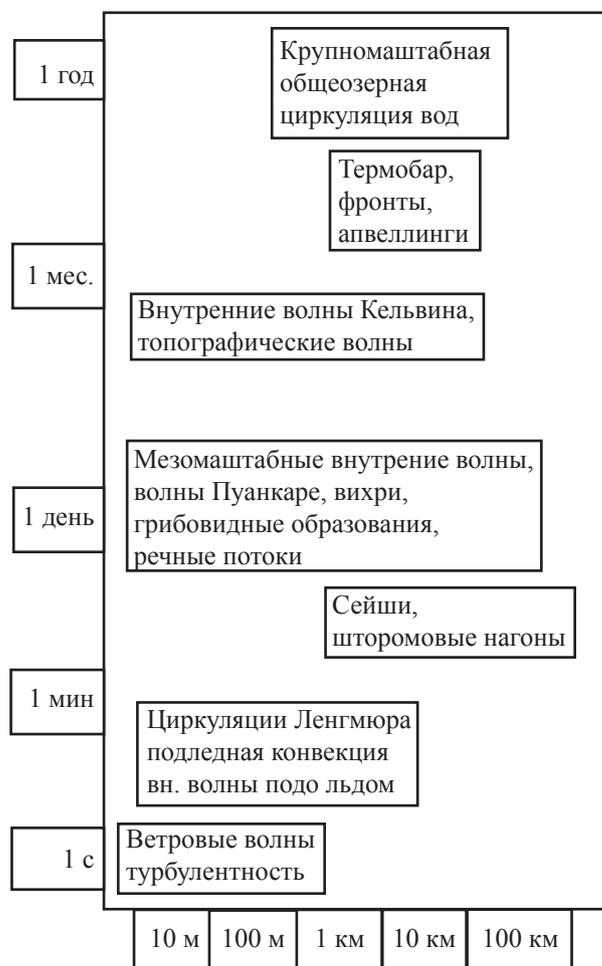


Рис. 1. Пространственно-временные масштабы гидрофизических процессов и явлений в крупных стратифицированных озерах.

Fig. 1. Spatio-temporal scales of hydrophysical processes and phenomena in large stratified lakes.

Таблица 1

Характерные основные безразмерные параметры динамики океана и крупного озера

Typical main dimensionless parameters of the dynamics of the ocean and a large lake

Параметр	Океан	Великие озера
Число Экмана: Горизонтальное Вертикальное	10^{-3}	10^{-4}
	10^{-4}	10^{-2}
Число Россби	10^{-3}	10^{-2}
Параметр нестационарности	10^{-4}	10^{-2-3}
Радиус деформации Россби: баротропный бароклинный	1000 км	10 км
	30 км	3 км
Отношение бароклинного радиуса деформации Россби к горизонтальному размеру бассейна	$3 \times 5 \cdot 10^{-3}$	$3 \times 5 \cdot 10^{-2}$

Наиболее изученными в озерах являются крупномасштабные процессы и явления [9, 13, 35, 36]. Под крупномасштабными движениями будем понимать такие, размеры которых сопоставимы с характерными горизонтальными размерами озер или их крупных частей [35]. Моделирование течений и

температурного режима озера для относительно малых временных масштабов (например, синоптических и сезонных) можно интерпретировать как задачу воспроизведения «реальности», а моделирование и осреднение течений за достаточно большое число лет — как воспроизведение т. н. течений климатического масштаба [35]. При моделировании последних расчеты сводятся к построению периодического решения на годы, для чего требуется проводить вычисления на физическое время, соответствующее времени условного водообмена озера, которое для Ладожского и Онежского озер равно 12—14 годам.

При решении задач рационального использования и управления ресурсами озер возрастает роль наблюдений (мониторинга) и целенаправленных научных исследований. При решении задачи управления 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].

Менее изученными в настоящее время являются мезо- и субмезомасштабные 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 Вайсяля (N) в океанах, морях и озерах [24, 34, 37]. Они играют существенную роль в формировании химико-биологических полей, поэтому их исследование представляется актуальным для решения широкого круга экологических задач. В работе [12] показано, что при моделировании циркуляции вод, термического режима Финского залива с учетом мезомасштабных явлений с размерами меньше бароклинного радиуса деформации Россби, можно использовать модель NEMO [10] на сетке с разрешением порядка ≈ 0.5 км. В этом случае имелась возможность выбора схемы параметризации подсеточных процессов, что, в конечном итоге, позволило корректно воспроизвести весенне-летнюю эволюцию термохалинной структуры в Финском заливе Балтийского моря с точностью, достаточной для моделирования различных аспектов биогеохимических циклов в море.

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 с одного или одновременно нескольких судов [13], 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, полей ветра, уровня воды.

Серьезной проблемой является та, что математические модели озер в России, на которых могут быть основаны системы поддержки принятия управленческих решений (СППУР), не являются «продуктами», а работают только в «руках» создателей [29], как, например, наиболее совершенный до 2014 г. комплекс моделей, созданный в СПб ЭМИ РАН. Отсутствие необходимых математических моделей для СППУР приводит к тому, что приходится принимать решения по регулированию уровня воды оз. Байкал не в соответствии с принятым Законом о Байкале, а издавая специальное Постановление Правительства РФ от 04.02. 2015 № 97 об использовании водных ресурсов озера Байкал [27].

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 (Меншуткин и др., 2014). 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 в широком диапазоне временных масштабов в рамках программы РНФ «Озера России — диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» внедряется

модель термогидродинамики (ТГД), разработанная ранее для Каспийского моря Р. А. Ибраевым [38]. Эта модель позволяет воспроизводить циркуляции (течения) как климатического масштаба, так и мезомасштабов. Модель ТГД сопряжена с экосистемным блоком [39]. 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.

Задача создания интегрированных систем управления водопользованием крупных внутренних водоемов Евразии как Байкал, Ладожское, Онежское, а также Каспия при современном состоянии знаний об объектах управления и, особенно, их реакция на внешние воздействия еще далека от практического воплощения [40].

Для моделирования гидрофизических процессов Белого моря использовалась трехмерная модель, разработанная И. А. Нееловым в ААНИИ [30], основанная на полных уравнениях движения со свободной поверхностью в приближении Буссинеска и гидростатическом приближении. На основе этой модели И. А. Нееловым и О. П. Савчуком была создана совмещенная модель термогидродинамики и химико-биологического режима моря (модель экосистемы) [30, 41]. Экосистемный блок модели был разработан для Балтийского моря и откалиброван по надежным данным в рамках крупного международного проекта по Балтийскому морю «MARE» [41]. В настоящее время этот блок модели используется странами Балтийского региона как инструмент для поддержки принятия управленческих решений.

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 — GreenJASMINE на примере Белого моря. Комплекс включает блок термогидродинамики JASMINE [31], который разработан на основе модели FEMAO, созданной для Северного Ледовитого океана [32] 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 [41]. Как показали расчеты на модели GreenJASMINE, особенности распределения температуры воды, первичная продукция «хорошо» согласуются с известными результатами многолетних измерений на Белом море [31]. Полезным оказалось использование блока усвоения данных в этой модели на базе ансамблевого фильтра Калмана (<http://enkf.nersc.no>, 15.08.2018), с усвоением данных как стандартных измерений, так и больших массивов спутниковых и гидрометеорологических сведений. После завершения надежной калибрации и верификации модели GreenJASMINE на примере Белого моря, разработанный комплекс моделей предполагается использовать для моделирования экосистем других морей Арктики.

Успешное решение задачи верификации математических моделей зависит от четкости 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.

Разработка современных математических моделей экосистем типа GreenJASMIN для Северного Ледовитого океана требует не только учета условий на границах с Атлантическим и Тихим океанами, но и натурных данных для верификации и калибрации моделей, получить которые чрезвычайно сложная задача для обширных, открытых акваторий, в особенности большие сложности возникают при создании моделей экосистем океанов [22]. Поэтому перспективными являются эксперименты на ограниченных, достаточно закрытых акваториях для корректной параметризации подсеточных процессов и верификации моделей. На озерах и Белом море можно создать полигоны (базы) для решения сложных, междисциплинарных проблем, актуальных для Росгидромета, Минобрнауки и образования, РАН, Минобороны, МЧС и др., которые необходимы для разработки новых прорывных технологий в области гидрологии, океанологии, метеорологии и климатологии, для создания технических средств поиска и подъема затонувших аппаратов, разработки систем обеспечения функционирования и

мониторинга объектов [25]. Современный полигон для решения комплексных, междисциплинарных проблем должен содержать компоненты, как на море (озере), так и на суше.

Остановимся далее на менее изученных мезо и субмезомасштабных гидрофизических процессах и явлениях. Проблемы оценки генерации и разрушения, вклада нелинейных внутренних волн (НВВ) в изменчивость термогидродинамических процессов в океанах, морях и озерах остаётся актуальной для понимания перемешивания, переноса и трансформации вещества [20, 26]. В рамках международного эксперимента INTAS № 03-51-3778 на Онежском озере были выполнены комплексные исследования нелинейных внутренних волн [34], изучать которые существенно проще в озерах, чем в океане. Схема процессов формирования переноса, перемешивания, генерации, разрушения и взаимодействия внутренних волн в озерах предложена в работе [42], которая приведена на рис. 2.

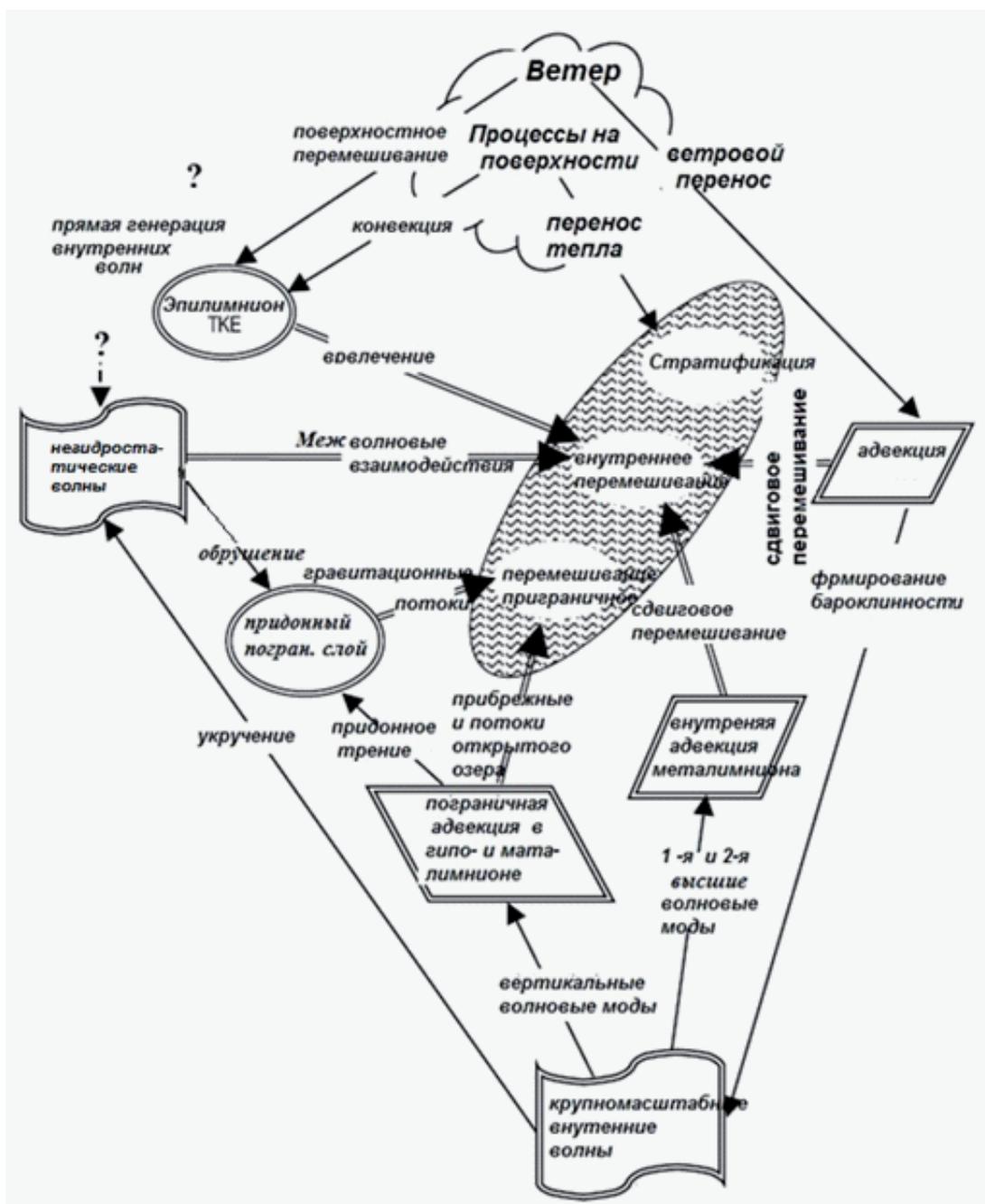


Рис. 2. Схема процессов переноса, перемешивания, формирования внутренних волн, их взаимодействия, разрушения (Hodges et al., [42] с изменениями).

Fig. 2. Diagram of the processes of transfer, mixing, the formation of internal waves, their interaction, destruction (revised from the article by Hodges B. R. et al., [42]).

Эта схема оказалась полезной при планировании экспериментов на Онежском озере по изучению нелинейных внутренних волн [34]. В рамках проекта на Онежском озере изучен широкий спектр термогидродинамических процессов и явлений, в том числе и внутренние волны широкого диапазона от частоты Вейселя N до крупномасштабных волн Кельвина. На рис. 3 представлен вейвлет-преобразование для изотермы $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ для Онежского озера, полученной гирляндой термисторов на разрезе поперек берегового склона с углом наклона порядка 1.3° .

По результатам измерений течений на автономных станциях акустическим и электромагнитными измерителями, а также температуры воды термокосами и термозондами, с использованием спутниковых данных, были описаны крупномасштабные внутренние волны Кельвина с временными масштабами несколько суток (на рис. 3 — $d9$ и $d8$), а мезомасштабные волны Пуанкаре, имеющие локальный инерционный период порядка 13.5 ч, представлены на $d5$ [34]. Относительно крупномасштабные внутренние волны Кельвина, распространяясь вдоль северного берега озера, трансформируются над неоднородностями рельефа дна, в то время, когда на термоклине образовалась депрессия — бор с амплитудой 10 м. Со временем отмечалось укрупнение фронта волны, а затем крупномасштабная волна разрушилась, и возникли короткопериодные внутренние волны, в том числе и нелинейные — солитоны. При выходе внутреннего бора на относительно мелководье с углом наклона дна 1.3° отмечалась их гидродинамическая неустойчивость. Внутренние волны расщепляются на последовательность солитонов и так называемый осциллирующий хвост, и далее происходит их разрушение с последующей диссипацией в конце эксперимента $27\text{--}28.07.2004$ г. Здесь лишь показан пример преимущества организации и проведения комплексных экспериментов на озерах по сравнению с морскими и океанскими,

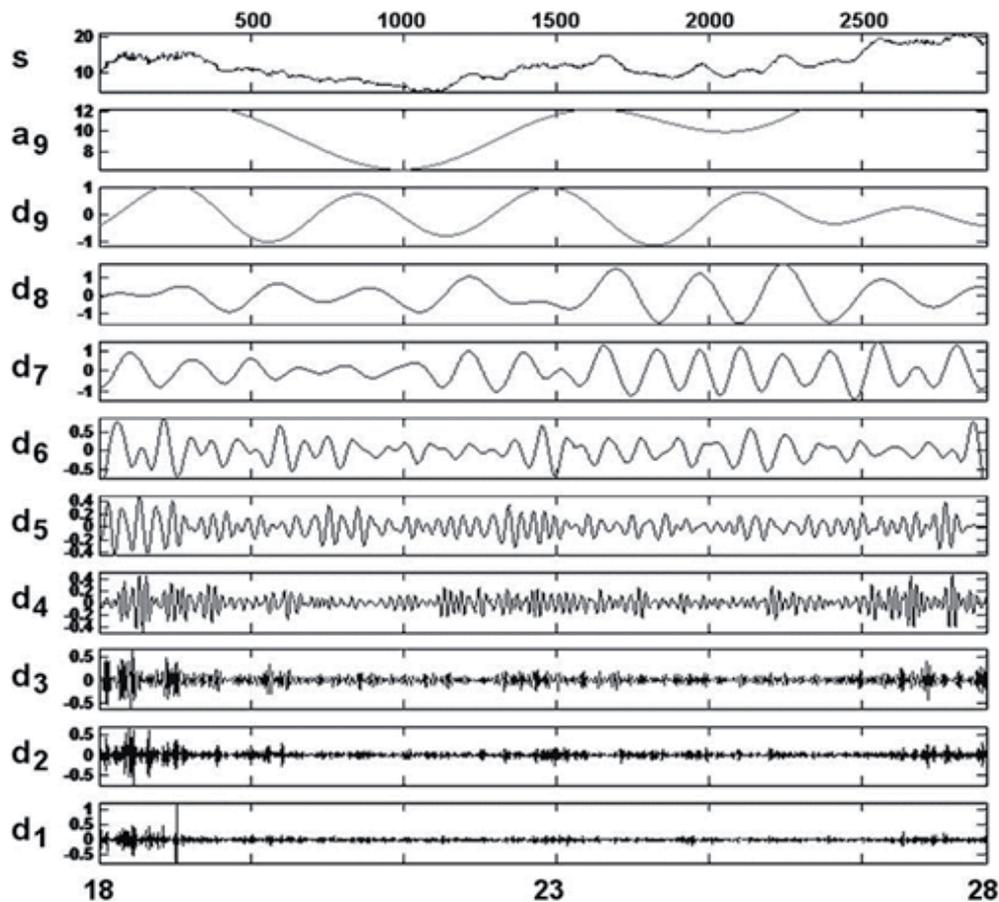


Рис. 3. Вейвлет-разложение (вейвлет Мейера) для изотермы $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ на станции 3 в Онежском озере в 2004 г. ($a9$ — тенденция, $d9$ — 236 ч, $d8$ — 118 ч, $d7$ — 59 ч, $d6$ — 29.5 ч, $d5$ — 14.75 ч, $d4$ — 7.4 ч, $d3$ — 3.7 ч, $d2$ — 1.85 ч, $d1$ — 0.92 ч. По работе Н. Н. Филатова с соавторами [34]).

Fig. 3. Wavelet decomposition (Meier wavelet) for a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ isotherm at station 3 in Lake Onego in 2004 ($a9$ — trend, $d9$ — 236 h, $d8$ — 118 h, $d7$ — 59 h, $d6$ — 29.5 h, $d5$ — 14.75 h, $d4$ — 7.4 h, $d3$ — 3.7 h, $d2$ — 1.85 h, $d1$ — 0.92 h. According to the work of N. N. Filatov and co-authors [34]).

поскольку имеется возможность оценки одновременно как крупномасштабных общеозерных явлений, так и мезо- и мелкомасштабных явлений. Подробные эксперименты по изучению внутренних волн на Онежском и других озерах мира опубликованы в работах [20, 34].

Об исследовании экосистем водоемов в условиях недостатка информации для моделирования гидрофизических процессов и экосистем. Рассмотрим подходы для описания гидрофизических и химико-биогических 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 [40]. 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 [43]. Идея использования клеточных автоматов, сформулирована Джоном фон Нейманом [44]. Применить этот подход можно используя сравнительно простые правила [45]. По существу, такой подход 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 [44] и гидрофизических и химико-биологических процессов как подо льдом, так и в период открытой воды в Ладожском и Онежском озерах [44, 46]. Основная задача состояла в том, чтобы 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 [21]. Для создания модели экосистемы подо льдом Онежского озера пространство разбивалось на 18 000 дискретных объемов воды (20 по глубине, 30×30 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. Например, для моделирования биоты в оз. Байкал озеро было представлено 5 млн автоматов [44].

Наиболее принципиальным при этом является задание процессов обмена, перемешивания в виде комплекса вихрей разного размера [40]. Этот подход был применен также для создания компьютерной модели распространения консервативной примеси, оценки загрязнения водоема и термического режима Ладожского озера [46]. Созданные модели рассчитаны на возможность их дальнейшего расширения за счет введения в них гидрохимических и гидробиологических переменных для моделирования экосистем озер.

О моделях социо-эколого-экономических системы водоем-водосбор. Применительно к проблемам Белого моря и водосбора (Беломорья) или крупных озер 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 при изменениях 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 [47, 48]. Такие сложные задачи существенно меняют требования к натурным экспериментальным данным и моделированию гидрофизических процессов и экосистем. Для создания таких моделей для Белого моря и его водосбора вначале были разработаны базы данных, ГИС и атласы [25]. Моделирование сложных социо-эколого-экономических проблем региона ранее было предпринято в работе [49], но использованный в этой работе подход был основан на несколько других принципах. Основная трудность при построении 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) [50]. Социо-эколого-экономическая модель Белого моря и его водосбора на основе когнитивного подхода, созданная впервые в [48], 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. Временной шаг модели принят равным одному году. Для климатической и социально-экономической частей модели такая величина временного шага представляется вполне естественной, но для экосистемной части это очень грубое приближение, с которым приходится считаться на первом этапе расчетов для того, чтобы не усложнять решение задачи [48]. Экосистемная часть модели представляет собой свертку результатов расчетов на модели Белого моря, разработанную О. П. Савчуком и И. А. Нееловым [30]. Результат представлен рисунком 4, который демонстрирует, что при сценарии увеличения инвестиций в экономику регионов водосбора возрастает валовый региональный продукт (ВРП), а при росте ВРП увеличивается сброс загрязнений, которые, в конечном счете, попадают в Белое море. Результаты загрязнения проявляются в сокращении рыбных запасов. Ниже представлен один из результатов работы когнитивной модели для Беломорья.

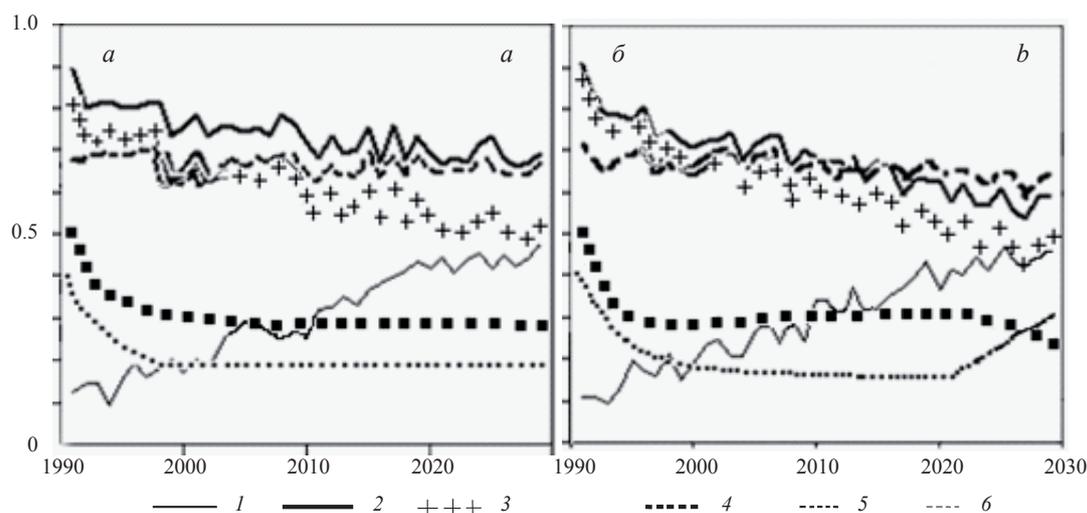


Рис. 4. Изменения характеристик экосистемы Белого моря за 1990—2030 гг. при инерционном сценарии инвестирования (а) и при увеличении инвестиций после 2018 г. (б): 1 — интегральная температура воды, 2 — содержание фосфатов, 3 — фитопланктон, 4 — рыбные запасы, 5 — уровень загрязнения моря, 6 — зоопланктон [48].

Fig. 4. Changes of characteristics of the ecosystem of the White Sea in 1990—2030 with the inertial scenario of investments (a) and with an increase on investment after 2018 (b): 1 — integral water temperature, 2 — phosphate content, 3 — phytoplankton, 4 — fish stocks, 5 — sea water pollution level, 6 — zooplankton [48].

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 [48], а также Ладожского и Онежского озер и их водосборов.

В настоящее время разработано достаточно много моделей термогидродинамики и экосистем. Нужно ли в дальнейшем разрабатывать еще большее их число? Можно отметить, что даже при сходстве абиотических условий и общности основных механизмов функционирования экосистем в разных водоемах, приоритетность механизмов зачастую различается, и потому требуется создание новых 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 статье мы показали, что имеется слишком малый объем надежной натурной информации для калибровки и верификации математических моделей ТГД и экосистем указанных выше внутренних водоемов.

Также недостаточно математических моделей-продуктов (представленных в виде кодов для широкого круга пользователей), разработанных в РФ, необходимых для решения теоретических и практических задач [33, 51]. Кроме того, ни одна из станций (полигонов) на Белом море и крупных озерах не приспособлена для решения сложных, междисциплинарных проблем, в том числе и для калибровки и верификации моделей. Такие специализированные полигоны необходимы для создания новых прорывных технологий в области гидрологии, океанологии, метеорологии и климатологии, разработки технических средств поиска и подъема затонувших аппаратов, оценки процессов на поверхности водоемов, совершенствования системы обеспечения функционирования и мониторинга стратегических объектов. Постановка специализированных экспериментов для решения описанного в статье круга задач возможна только при условиях объединения средств и возможностей разных организаций. Что должно позволить решить ряд актуальных проблем, поставленных Советом безопасности РФ по сохранению ресурсов уникальных озер России и Арктики.

Благодарности. Работа выполнена в ИВПС КарНЦ РАН в рамках гранта РНФ 14-17-00740-П. Автор благодарит Л. Е. Назарову, а также рецензентов за внимательное прочтение рукописи и полезные замечания.

Литература

1. Менишуткин В. В., Филатов Н. Н. Некоторые итоги и перспективы изучения озер // Труды КарНЦ РАН. 2006. Вып. 9. Петрозаводск. С. 154—162.
2. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. Распоряжение Правительства РФ от 27.08.2009. № 1235-р.
3. Саркисян А. С. Численный анализ и прогноз морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 134 с.
4. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Лаппо С. С., Саркисян А. С., Хворостьянов В. И. Энергоактивные зоны: концептуальные основы. Серия: Атмосфера, океан, космос. Программа «Разрезы». М.: ВИНТИ, 1989. Т. II, Ч. II. 368 с.
5. Демин Ю. Л., Филатов Н. Н. Проект море-озеро как имитационная модель океана / Проект научной программы по исследованию роли энергоактивных зон океана (ЭАЗО) в колебаниях климата («Разрезы») / Под ред. Г. И. Марчука. М.: Гидрометеиздат, 1989. С. 91—94.
6. Кондратьев К. Я., Адаменко В. Н., Власов В. П., Дружинин Г. В., Крейман К. Д., Поздняков Д. В., Румянцев В. Б., Тихомиров А. И., Филатов Н. Н. Большое озеро как имитационная модель океана. Л.: Наука, 1986. 63 с.
7. Madec G. NEMO ocean engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, N 27, ISSN No. 1288—1619. version 3.4. 2012. 120.
8. Mellor G. L. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Princeton, Princeton University, USA, 1996. 39 p.
9. Beletsky D., Schwab D. J. Modeling circulation and thermal structure in Lake Michigan: Annual cycle and interannual variability // J. Geophys. Research. 2001, 106, 19, P. 745—771.
10. Dupont Frederic, Padala Chittibabu, Vincent Fortin, Yerubandi R. Rao, Yoyo Lu. Assessment of a NEMO-based hydrodynamic modeling system for the Great Lakes // Water quality research Journal of Canada. 2012, 43, 3—4, P. 98—214.
11. Рябченко В. А., Либерман Ю. М., Руховец Л. А., Астраханцев Г. П. и др. Прогноз погоды и состояние водных объектов Северо-Западного региона России на базе комплекса гидродинамических моделей. СПб.: Нестор-История, 2008. 60 с.
12. Ванкевич Р. Е., Софьина Е. В., Рябченко В. А. Воспроизведение весенне-летней эволюции термохалинной структуры в Финском заливе Балтийского моря на основе трехмерной гидродинамической модели высокого разрешения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 2. С. 3—10.
13. Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 191 с.
14. Саркисян А. С., Залесный В. Б., Дианский Н. А., Ибраев Р. А., Кузин В. И., Мошонкин С. Н., Семенов Е. В., Тамсалу Р., Яковлев Н. Г. // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2. Математическое моделирование. Математические модели циркуляции океанов и морей. М.: Наука, 2005. С. 174—277.
15. Астраханцев Г. П., Менишуткин В. В., Петрова Н. А., Руховец Л. А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. СПб.: Наука, 2003. 363 с.
16. Ладога / Под ред. В. А. Румянцева, С. А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
17. Менишуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2 // Модели экосистем пресноводных озер. Водные ресурсы. 2014. Т. 41, номер 1. С. 24—38.
18. Shimaraev M. N., Verbovov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P. Physical limnology of Lake Baikal: a review. Irkutsk-Okayama, 1994. Т. 2. 81 p.
19. Гранин Н. Г., Козлов В. В., Цветова Е. А., Гнатовский Р. Ю. Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевой структуры оз. Байкал // ДАН. 2015. Т. 461, № 3. С. 343—347.
20. Nonlinear Internal Waves in Lakes / Ed. by Hutter K. Springer, 2012. 280 p.
21. Филатов Н. Н., Терзевик А. Ю. Совместный Российско-Швейцарский проект по исследованию зимнего режима Ладожского и Онежского озер // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2015. № 5. Серия Лимнология. С. 86—89.

22. Толстиков А. В., Чернов И. А., Мартынова Д. М. Решение проблемы необходимых данных для численного моделирования процессов в Белом море в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2 (30). С. 45—55.
23. Семенов Е. В. Основы динамики и мониторинга Белого моря / Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М., 2004. 190 с.
24. Родионов А. А., Зимин А. В., Никитин Д. А. Комплексные исследования гидродинамических и гидроакустических явлений в мезо- и субмезомасштабном интервале изменчивости гидрофизических полей в арктических морях (на примере Белого моря) // Фундаментальная и Прикладная Гидрофизика. 2015. Т. 8, № 4. С. 16—23.
25. Филатов Н. Н., Толстиков А. В., Богданова М. С. Создание информационной системы и электронного атласа по использованию ресурсов Белого моря и его водосбора // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 18—29.
26. Талипова Т. Г., Пелиновский Е. Н., Куркина О. Е., Диденкулова И. И., Родин А. А., Панкратов А. С., Наумов А. А., Гиниятуллин А. Р., Николкина И. Ф. Распространение волны конечной амплитуды в стратифицированной жидкости переменной глубины // Сборник научных статей «Современная наука». Нижний Новгород. 2012. № 2 (10). С. 144—150.
27. Бычков И. В., Никитин В. М. Регулирование уровня озера Байкал // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 5—16.
28. Волженский М. Н., Родионов А. А., Семенов Е. В., Филатов Н. Н., Зимин А. В., Булатов М. Б. Опыт верификация оперативной модели мониторинга Белого моря в 2004—2008 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2009. Т. 5. С. 33—42.
29. Филатов Н. Н., Менишуткин В. В. Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 48(9). С. 120—146.
30. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2007. 187 с.
31. Чернов И. А., Толстиков А. В., Яковлев Н. Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды КарНЦ РАН. Серия «Математическое моделирование и информационные технологии». 2016. № 8. С. 116—128.
32. Яковлев Н. Г. О воспроизведении полей температуры солёности Северного Ледовитого океана. Ч. 1: Численная модель и среднее состояние / Изв.РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 100—116.
33. Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы / Под ред. В. П. Дымникова, В. Н. Лыкосова, Е. П. Гордова Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. 524 с.
34. Filatov N., Terzevik A., Zdorovenov R., Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K. Field Studies of Non-Linear Internal Waves in Lakes on the Globe // Strongly nonlinear Internal waves in lakes: Generation, Transformation. Ch. 2. Springer, 2012. P. 25—106.
35. Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Озера и климат: модели и методы // Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы / Под ред. В. П. Дымникова, В. Н. Лыкосова, Е. П. Гордова. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. С. 256—326.
36. Цветова Е. А. Математическое моделирование Байкальского термобара // Математические проблемы экологии: Тр. второй Всерос. конф. Новосибирск, 1994. С. 44—49.
37. Бондур В. Г., Филатов Н. Н., Гребенюк Ю. В., Долотов Ю. С., Здорovenнов Р. Э., Петров М. П., Цидилина М. Н. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47, № 6. С. 827—846.
38. Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 130 с.
39. 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.
40. Менишуткин 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.
41. Savchuk O. P., Gustafson B. G., Muller-Karulis B. BALTSEM: A marine model for decision support within the Baltic Sea Region // BNI Technical Report 7. 2012. 59 p.
42. Hodges B. R., Imberger J., Saggio A., Winter K. B. Modelling basin-scale internal waves in a stratified lake // Limnology & Oceanography. 2000. V. 45, № 7. P. 1603—1620.
43. Тоффли Е., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, современная наука. 1991. 283 с.
44. Афанасьев И. В. Клеточно-автоматная модель динамики популяций трех видов организмов озера Байкал // Сиб. журн. вычисл. Математики. Сиб. отд-ние РАН. Новосибирск, 2014. Т. 17, № 3. С. 217—227.
45. Wolfram S. A new kind of science. USA. WolframsMedia. 2002. 1197 p.
46. Менишуткин В. В., Филатов Н. Н. Модели Ладожского озера с использованием трехмерных клеточных автоматов // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 3. С. 1—10.
47. Баксанский О. Е., Гнатик Е. Н., Кучер Е. Н. Современные когнитивные концепции. М. 2010. 224 с.
48. Менишуткин В. В., Филатов Н. Н., Дружинин П. В. Состояние и прогнозирование социо-эколого-экономической системы водосбора Белого моря с использованием когнитивного моделирования // Арктика. Экология. Экономика. 2018. № 2 (30). С. 79—85.
49. Моделирование социо-эколого-экономической системы региона / Под ред. В. И. Гурман, Е. В. Рюмина. М.: Наука, 2003. 175 с.
50. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений. М.: Мир. 1976. 165 с.
51. Rukhovets L., Filatov N. (ed.) Ladoga and Onego — Great European Lakes. Observation and Modelling. Chichester. UK. Springer-Praxis, 2010. 302 p.