

УДК 575.5:[551.583+504]:556.55.072

Н.Н. Филатов*, В.В. Менишуткин**

**ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМ
КРУПНЫХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ
ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННЫХ
ФАКТОРОВ**

* Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, nfilatov@rambler.ru;

** Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

N.N. Filatov, V.V. Menshutkin

**PROBLEMS OF ESTIMATION OF INFLUENCE
CLIMATE AND ANTROPOGENIC FACTORS ON TO
GYDROTHERMODYNAMICS AND ECOSYSTEMS OF LARGE
STRATIFIED INLAND WATERS**

В обзоре рассматриваются вопросы диагноза состояния и прогноза изменений термогидродинамики и экосистем крупных стратифицированных водоемов (Ладожского и Онежского озер, Белого моря) под влиянием климата и разнообразных антропогенных факторов с использованием экспериментальных данных и математического моделирования. Рассмотрены актуальные проблемы оценки этих изменений и пути их решения. Представлены различные 3D-математические модели и модели конечных автоматов для описания физико-химико-биологических процессов исследуемых водоемов, показаны пути совершенствования долгосрочного прогноза изменений экосистем для решения задач рационального использования и сохранения ресурсов водоемов.

Ключевые слова: экосистемы, озера, эвтрофирование, модели, климат.

The review deals with the diagnosis of the status and forecast of changes in thermohydrodynamics and ecosystems of large stratified water bodies (Ladoga and Onega lakes, the White Sea) under the influence of climate and diverse anthropogenic factors using experimental data and mathematical modeling. The actual problems of assessing these changes and ways to solve them are considered. Various 3D mathematical models and finite state machine models for describing the physico-chemical-biological processes of the studied reservoirs are presented. Ways of improving the long-term forecast of ecosystem changes for solving problems of rational use and conservation of reservoir resources are shown.

Keywords: ecosystems, lakes, eutrophication, models, climate.

Введение

Крупнейшие (великие) озера Евразии (Байкал, Каспий, Ладожское и Онежское) имеют стратегическое значение для развития экономики России. Необходимость сохранения и восстановления ресурсов озер Байкал, Ладожского и Онежского обсуждалась на Совете Безопасности РФ 20.11.2013 г., а на саммите Каспийских государств в ноябре 2014 г. отмечалась роль исследований Каспия [49]. В результате интенсивного антропогенного воздействия на водные экосистемы этих внутренних водоемов в 50–80-х гг. XX в. при интенсивном развитии

промышленности, сельского хозяйства наблюдались процессы антропогенного эвтрофирования и загрязнения, заметная деградации экосистем водоемов.

Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных озер и пути их решения

Эвтрофирование, загрязнение озер и морей – эти процессы в 80-х гг. XX – в начале XXI в. отмечались в глобальном масштабе, и для их решения были приняты разнообразные меры по уменьшению биогенной нагрузки и поступления загрязняющих веществ на водосборы, в водоемы и в атмосферу. На многих водоемах мира были проведены мероприятия по восстановлению трофического статуса, улучшению качества вод [37, 67, 68, 70]. Среди впечатляющих примеров восстановления экосистем можно привести восстановление трофического статуса озера Вашингтон (США) из эвтрофного в олиготрофное состояние. Удалось улучшить качество вод «погибающего» озера Эри и приостановить процесс антропогенного эвтрофирования ряда озер Европы и Северной Америки [79, 86, 91, 94]. Вокруг проблемы влияния Байкальского ЦБК на загрязнение и эвтрофирование озера дискуссия продолжалась десятки лет, но закрытие комбината существенно не повлияло на изменение экосистемы. На Ладожском озере в 80-х гг. XX в. были предприняты меры по улучшению качества вод, уменьшению загрязнений при перепрофилировании Приозерского целлюлозно-бумажного завода в 1987 г. и совершенствовании технологических процессов на Волховском алюминиевом заводе. Но эти меры не привели к приостановке процесса антропогенного эвтрофирования.

После распада СССР в начале 90-х гг. XX в. произошло резкое уменьшение экономической деятельности на водосборах Ладожского и Онежского озер, а также Белого моря. Наблюдалось существенное уменьшение биогенной нагрузки и сброса вод от точечных и распределенных источников. Так, например, поступление фосфора в Ладожское озеро уменьшилось почти в три раза – с 6–7 до 2 тыс. т в год. В результате этого заметно повысилось качество вод, началось постепенное восстановление трофического статуса водоема [14, 28].

На Великих американских озерах, озерах Европы, Балтийском море мероприятия по уменьшению антропогенной нагрузки носили постепенный и системный характер в связи с внедрением новых «зеленых» технологий в промышленность и сельское хозяйство. Эти меры обеспечивались значительными инвестициями государств. А на крупных внутренних водоемах России уменьшение антропогенной нагрузки в начале 90-х гг. XX в. произошло за несколько лет из-за резкого изменения социально-экономических условий, которые происходили на фоне значительных климатических изменений. Уменьшение антропогенной нагрузки на Ладожское и Онежское озера определялось в основном закрытием производств или существенным уменьшением выпускаемой продукции, а не модернизацией предприятий и перевода их на экологически толерантные технологии из-за отсутствия необходимых инвестиций. До сих пор многие предприятия экономически выгодными для себя считают платить за выбросы в атмосферу и сбросы, а не за проведение модернизации производств, которые бы способствовали сохранению природной среды.

Несмотря на значительное уменьшение антропогенной нагрузки биогенными веществами, за последние 25 лет трофический статус Ладожского и Онежского озер не восстановился до олиготрофного [27, 36, 47]. Произошло это из-за вовлечения в оборот накопленных биогенов в процессе разложения органического вещества водными грибами и активизации микробиологических процессов. Как отмечает Н.А. Петрова с соавторами [27], «Резкое снижение поступления фосфора в озеро в 90-х гг. XX в. увеличило дисбаланс экосистемы... в последние годы отмечается принципиально новый этап функционирования экосистем озера при преобладании деструкционных процессов над продукционными». Рассматриваемые в работе водные экосистемы пережили период быстрых изменений и вступили в новую фазу некоторой стабилизации внутриводоемных процессов в новых условиях, в особенности это касается Ладожского и Онежского озер, а также Белого моря. Все перечисленное выше значительно усложнило диагноз и долгосрочный прогноз изменений гидрологического режима и экосистем крупнейших водоемов России.

Оценки влияния изменений климата на водные системы. Процессы изменения экосистем Ладожского, Онежского озер, Каспийского и Белого морей развивались на фоне заметного потепления климата с конца 80-х гг. XX в. до 2010 г., а затем в 2010–2016 гг. – при так называемом процессе «замедления» потепления, что отмечается как по данным экспериментальных измерений в глобальном масштабе, так и по данным измерений на водосборах указанных водоемов [7, 13, 50, 93]. В англоязычной литературе это замедление обозначается терминами «hiatus» или «plateau» [69]. «Замедление потепления», а также известные из многолетних наблюдений квазициклические изменения с временными масштабами порядка 60, 30 и нескольких лет практически не учитываются в моделях глобального климата для долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозах климата, на которых основываются соответствующие прогнозы изменений гидрологического режима и водных экосистем [5, 34, 49]. Таким образом, важной является проблема учета долговременного изменения климата из-за парникового эффекта и обнаруженных флуктуаций, обусловленных природными процессами. В настоящее время имеются соответствующие разработки, которые при моделировании изменений климата используют так называемый комбинированный сценарий изменений климата, в котором учитывался как «парниковый», так и «циклический» эффект [7, 26].

Требуется также использование натуральных контактных и дистанционных наблюдений для оценки влияния изменений климата на экосистемы. Индикаторами влияния изменений климата на водоемы являются такие физические параметры, как ледяной покров, температура воды и колебания уровня воды. При этом знание закономерностей изменения уровня воды озер для широкого диапазона масштабов представляет наибольший практический интерес с точки зрения оценки водно-ресурсного потенциала, гидроэнергетики, водного транспорта, рекреации. Но даже долгосрочный прогноз изменений уровня озер, в особенности Каспия, оказался нетривиальной задачей из-за слабого понимания механизмов его вариаций [4, 15, 51]. Другими измеряемыми индикаторами колебаний климата на водные системы являются циклы биогенов, вселенцы, донные отложения, разнообразие организмов, населяющих водоемы, смена рыбных сообществ (холоднолюбивых на теплолюбивые) и др. [55, 62, 67, 79].

Изменения климата порождают сложные ответные реакции в водоемах в зависимости от разных причин. Важной фундаментальной проблемой является оценка вклада, масштабов влияния климатических факторов на озера. Для реализации этих целей озера более привлекательны по сравнению с морями и океанами, так как имеются многолетние данные по донным отложениям озер, температуре их воды, ледяному покрову, уровню воды и ряду химико-биологических характеристик, которые могут рассматриваться как индикаторы изменений климата. Причем эти данные в озерах собраны в более контролируемых условиях, чем в океанах и морях. Как показали натурные исследования [26, 29, 54, 67, 79, 80], при заметном глобальном потеплении климата на водосборах озер Евразии и Северной Америки за последние 30 лет реакция гидрологического режима и экосистем озер была разной в зависимости от региональных особенностей, влияния различных антропогенных факторов, особенностей ландшафтов и размеров водосбора. Наглядный тому пример – особенности изменений уровня крупнейших озер России – Ладоги, Онеги, Байкала и Каспия, особенности флуктуаций которых за более чем столетний период значительно различаются, несмотря на периоды заметного глобального потепления или похолодания климата (рис. 1) [49].

Поэтому для выявления общих и региональных закономерностей особенностей изменений водных экосистем требуется выполнение анализа на разнотипных водоемах. Такой, например, точный и простой для измерений индикатор изменений климата, как температура воды для озера Байкал, является таковым только по данным измерений лишь для вод верхних слоев воды до 300 м [54].

Долгосрочные и сверхдолгосрочные изменения гидрологического режима крупных водоемов. Как показал многолетний опыт, долгосрочное прогнозирование даже

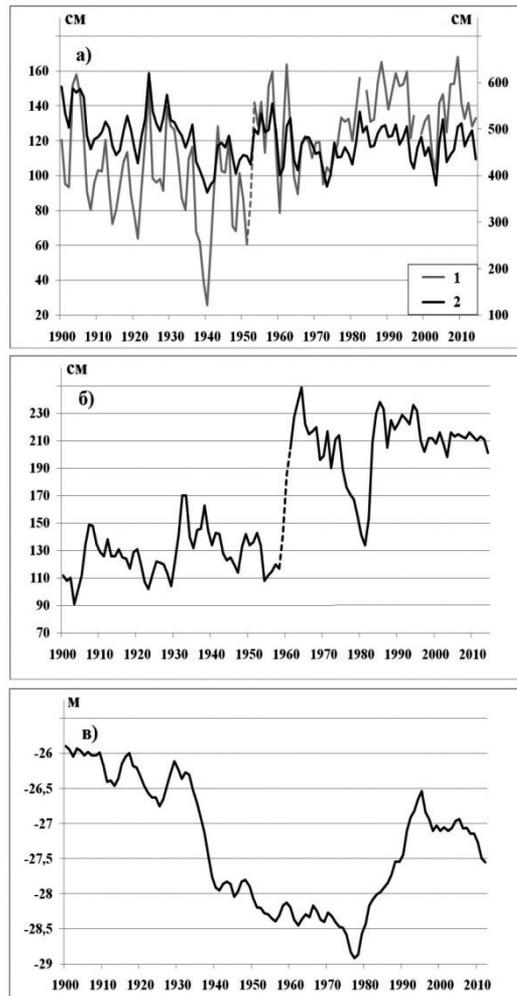


Рис. 1. Изменчивость уровня воды в озерах: а – Ладожском (1) и Онежском озерах (2); б – Байкале; в – Каспийском море-озере (по данным за 1900–2015 гг. [49])

уровня воды крупнейших водоемов, а в особенности Каспия, оказалось сложной проблемой [4, 7, 15] из-за недостаточного учета влияния переноса тепла и влаги из Атлантики, а также неопределенности сценариев и прогнозирования изменений климата до 2050–2100 гг. Несмотря на многочисленные попытки долгосрочных прогнозов изменений гидрологического режима, уровня воды Каспия, озер Ладожского, Онежского, Байкал, а также Великих американских озер (ВАО) с использованием ансамбля моделей общей циркуляции океана и атмосферы (МОЦОА), моделей гидрологического режима, большого объема натуральных дистанционных и контактных наблюдений, до сих пор отмечается большая неопределенность долгосрочного прогнозирования гидрологического их режима [49]. Так, для ВАО эти расчеты в основном основаны на «парниковой» парадигме, и к 2100 г. прогнозируется уменьшение их уровня воды на 1–2 м, тем не менее возможны сценарии с его повышением [56, 67].

Эта неопределенность затрудняет планирование экономической деятельности, принятие мер по адаптации к возможным региональным изменениям климата и экосистем, разработку мер по рациональному использованию и охране ресурсов водоемов. Поэтому важной задачей остается совершенствование системы прогноза внутривековых и сезонных изменений колебаний уровня воды, гидрологического режима и экосистем крупных озер. Задача сверхдолгосрочного прогноза изменения гидрологического режима исследуемых водоемов решается в проекте РНФ «Озера России – диагноз и прогноз...» с использованием МОЦАО, разработанной в ИВМ РАН [5], с применением комбинированного сценария климатических изменений, основанного на композиции «парникового» и «циклического» эффектов для оценки транспорта влаги из Атлантики [7, 25, 26]. Этот подход позволяет описывать не только рост температуры воздуха, вызванный эмиссией парниковых газов, но и известную по данным наблюдений изменчивость климата с временными масштабами несколько десятков (порядка 60) лет.

Нерешенные проблемы долгосрочного прогнозирования гидрологического режима, уровня воды исследуемых водоемов, слабое использование систем поддержки принятия управленческих решений, основанных на соответствующих математических моделях, не позволяют оптимально решать задачи рационального использования и охраны крупнейших озер России.

Экономическая оценка предельной (допустимой) нагрузки, оценка ассимиляционного потенциала водоемов. Слабое использование систем поддержки принятия управленческих решений. Резкое ухудшение состояния природной среды, в том числе водоемов, и медленное их восстановление, которое требует значительных инвестиций, привели к необходимости экономического оценивания нагрузки на природную среду, создаваемую в результате хозяйственной деятельности, и, как следствие, потребовали наряду с правовыми и административными использование экономических методов регулирования [33, 36]. В работах [21, 35] показано, что «...одним из важнейших факторов сохранения биосферы и обеспечения ее устойчивости является ассимиляционный потенциал (АП) природной среды. АП природной среды – это ее самовосстановительная способность по отношению к поступлению в природную среду вещества и энергии в результате хозяйственной деятельности. Фактически АП является свойством экологических

систем “сопротивляться” внешним воздействиям. АП представляет собой особый вид природного ресурса и как ограниченный природный ресурс нуждается в экономической оценке». Иначе говоря, количественные оценки АП представляют собой границы допустимой антропогенной нагрузки, позволяющей сохранять озеро в олиготрофном состоянии. Для получения допустимых значений антропогенной нагрузки на Ладожское и Онежское озера были использованы модели гидротермодинамики и модели экосистем озер [30–32]. По данным моделирования и экспериментальных работ ИНОЗ РАН [14, 27] было определено, что нагрузка на экосистему Ладожского озера может быть на уровне $4000 \text{ т } P_{total}/\text{год}$, в этом случае озеро будет сохранять слабо мезотрофное состояние. С использованием моделей, разработанных в [2, 18–20, 30], АП по сбросу фосфора для Ладожского озера должен быть порядка $2500 \text{ т } P_{total}/\text{год}$, а для Онежского озера АП по сбросу фосфора – $600\text{--}800 \text{ т } P_{total}/\text{год}$ и по сбросу азота – $15\,000 \text{ т } N_{total}/\text{год}$ [89]. Специальный вопрос о получении экономических оценок АП для озер, с помощью которых могут рассчитываться платежи за сбросы биогенов и загрязняющих веществ, рассмотрен в работах [17, 30–36].

Для рационального использования и охраны озера Байкал оказалось недостаточным даже наличие федерального закона. Однако практическая реализация этого закона, даже с использованием средств на его реализацию и поддержку федеральной целевой программы (ФЦП), оказалась непростой [39]. Как отмечал на заседании президиума РАН академик М.А. Грачев, действующая федеральная целевая программа «“Об охране озера Байкал...”» содержит множество мероприятий, не имеющих отношения к охране озера. Необходима экспертиза программы под эгидой РАН...». И в результате в 2015–2016 гг. управлять использованием ресурсов озера в условиях маловодного периода пришлось в нарушение принятого закона, путем принятия специального Постановления Правительства РФ. Происходит это из-за недостаточного научного обоснования принятого закона. Этот пример указывает на необходимость тщательного научного обоснования разрабатываемых в настоящее время проектов закона об охране Ладожского и Онежского озер.

Таким образом, для решения проблем рационального использования и охраны крупнейших водоемов, имеющих стратегическое значение для развития экономики страны, требуется реализация комплекса мер экономического и законодательного характера, которые должны основываться на фундаментальных научных знаниях о состоянии экосистем и прогнозировании их изменений. Для этого требуется развитие экспериментальных натуральных наблюдений, мониторинга и применение математических моделей, которые являются основой для разработки систем принятия управленческих решений с использованием экономических мер.

Постановка экспериментальных исследований термодинамики и экосистем на Ладожском, Онежском озерах и Белом море и пути их развития. Как отмечалось в докладе В.А. Румянцева с соавторами на Всероссийском гидрологическом съезде в 2013 г., «на водоемах практически не развивалась сеть наблюдений, оснащение ее приборами, оборудованием и плавсредствами оставляет желать лучшего». Так, организациями Росгидромета практически прекращены наблюдения на акватории водоемов за гидрологическими характеристиками,

на Ладожском и Онежском озерах Росгидромет уже много лет не имеет собственного флота, сокращены наблюдения за гидрохимическим режимом, параметрами качества воды, стандартный мониторинг осуществляется зачастую организациями, выигравшими конкурс на осуществление мониторинга, но не имеющими современных средств его проведения. Отметим также малую доступность данных гидрологических наблюдений (<http://hydrolare.net/database.php>), получаемых на сети Росгидромета.

На исследуемых водоемах практически отсутствуют долговременные (месяцы и годы) наблюдения за течениями с автономных буйковых станций, как это было в 70-х гг. прошлого века [40, 41], а также современных дрейфующих буюв, которые сейчас широко используются в океанах. Неимение этих средств наблюдений не позволяет корректно решать задачи математического моделирования гидродинамики с усвоением данных измерений, разработки систем оперативного мониторинга [6]. Все это ограничивает возможности калибрации и верификации моделей, возможности прогнозирования термогидродинамических процессов и явлений. Только по экспериментальным данным сложно разделить вклад климатических и антропогенных воздействий на водные экосистемы, поэтому требуется сочетание целенаправленных измерений и математического моделирования.

До сих пор по данным как натурных измерений, так и моделирования, очень слабо остается изученным зимний режим крупных водоемов подо льдом. Исследования в зимнее время подо льдом в основном были сосредоточены на малых и средних озерах Северного полушария [66, 76, 93], в то время как зимний режим крупнейших озер мира и морей изучен в гораздо меньшей степени. Главной причиной недостатка зимних наблюдений крупных озерных систем является практическая сложность организации на Ладожском и Онежском озерах, Белом море, полевых исследований со льда который, как правило, нестабилен, имеет многочисленные трещины и полыньи [50, 75].

Значительный интерес вызывают проблемы изучения реакции озерных экосистем на глобальное потепление, понимание роли озер с ледовым покровом в выбросах парниковых газов в глобальном углеродном балансе. Таким образом, до сих пор процессы подо льдом крупных озер мира по-прежнему остаются «белым пятном» в современной лимнологии. Только в последние годы начали проводиться комплексные мультидисциплинарные исследования подо льдом крупных озер Байкал, Телецкое, Вендюрское, а также ВАО [66, 80, 87, 93], а с 2014 г. начаты уникальные комплексные междисциплинарные исследования подо льдом Ладожского и Онежского озер [48].

Среди других проблем получения экспериментальных данных для понимания функционирования водных экосистем водоемов отметим такие, как роль разных элементов озерной экологической системы – инвазивных видов, простейших и водных грибов. Методика определения эколого-физиологических характеристик для включения их в модели экологической системы еще слабо разработана [14, 27, 32]. Учет этих сведений по экспериментальным данным в математических моделях возможно осуществлять только в виде коэффициентов и калибровкой соответствующих моделей [32, 83, 95].

Очевидно, натурные экспериментальные исследования возможны только в отношении ограниченного числа характеристик системы, то есть экосистема в натуральных условиях не является полностью наблюдаемой, в то время как математическому моделированию в принципе доступны все элементы экосистемы озер [17]. Поэтому для понимания процессов изменения экосистем под влиянием климата и антропогенных факторов требуется использовать синтез наблюдений и математического моделирования.

Разработка и применение математических моделей для изучения термогидродинамики великих озер Евразии. Гидродинамика озер является результатом воздействия большого числа различных процессов, которые имеют широкий диапазон пространственно-временных масштабов. Понимание закономерностей течений, циркуляции вод в озерах важно для оценки переноса и трансформации вещества, прогнозирования изменений экосистем водоемов при разнообразных антропогенных и климатических изменениях. Знание сезонной и многолетней циркуляции вод используется при построении моделей экосистем в задачах рационального использования, охраны ресурсов озер и управления водопользованием.

При разработке математических моделей экосистем важно знание закономерностей термогидродинамических процессов и явлений и учета подсеточных процессов в явном виде или путем параметризации в моделях. Особенности гидродинамики крупных стратифицированных пресных озер зависят от закономерностей распределения полей температуры воды озер, аномальных свойств пресной воды, имеющей максимальную плотность при температуре 3,98 °С, влияния силы Кориолиса и пограничных слоев, которые занимают значительно большую площадь, чем в морях и океанах, а также от физических размеров озер, особенностей морфометрии, географической широты, внешних воздействий (потока тепла через поверхность, ветрового воздействия, осадков и испарения, речного стока). Условно гидродинамические процессы в озерах можно разделить на крупномасштабные компоненты с временными масштабами, большими синоптического и пространственными, охватывающими озеро или его отдельные части. К процессам, формирующим эти крупномасштабные компоненты, относятся топографические волны Россби, волны Кельвина, Пуанкаре, мезо- и мелкомасштабные, штормовые нагоны, апвеллинги, вихревые образования, внутренние и поверхностные волны, циркуляции Ленгмюра и др. С точки зрения геофизической гидродинамики имеются четкие критерии отнесения озера к крупному, среднему или малому с помощью параметра Бургера (Burger) S , который представляет собой отношение внутреннего (бароклинного) радиуса деформации Россби $R_R = c/f$ к характерному горизонтальному размеру озера [65]:

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

где D – характерная глубина; L – горизонтальные размеры стратифицированного водоема; c – фазовая скорость баротропных или бароклиных волн; f – параметр Кориолиса.

Для очень крупных (великих) димиктических озер мира, таких как Байкал, Мичиган, Верхнее, Онтарио, Гурон, Эри, Ладожское и Онежское, имеющих

горизонтальные размеры – сотни километров, а глубины – десятки и сотни метров, R_R составляет несколько километров, S_i мало и в период летней стратификации составляет 0,03–0,05, причем в этих водоемах сила Кориолиса играет важную роль в гидродинамике, формируя волны Кельвина и Пуанкаре, крупномасштабную циркуляцию вод, имеющую тенденцию к циклонической циркуляции. Озера, в которых R_R сопоставим с горизонтальными размерами озера, S_i составляет 0,1–0,5, и эффекты вращения Земли также могут быть важны в формировании динамики вод, например в озерах Женевском, Венерн и Веттерн (Европа), Телецком, Бива, Киннерет (Азия), которые можно отнести к озерам средних размеров. В стратифицированных озерах с характерными размерами несколько километров S_i составляет 0,3–0,5. В таких озерах влияние эффекта вращения Земли на гидродинамику незначительно, в них отсутствуют бароклинные волны Кельвина и Пуанкаре [21, 65, 66].

Натурные исследования течений крупнейших озер мира [40, 41] свидетельствуют о том, что существует устойчивая тенденция формирования крупномасштабной, охватывающей озеро или его крупные части, циркуляции вод циклонического типа, в особенности в период существования термобара. Эта тенденция проявляется при масштабе осреднения полей течений большем, чем синоптический. При моделировании экосистем великих озер мира для сезонных и климатических временных масштабов, то есть от нескольких суток до нескольких десятков лет, нет необходимости воспроизводить весь широкий спектр термогидродинамических процессов и явлений. Выбор масштабов зависит от целей и задач исследований. Для явлений, которые необходимо параметризовать (циркуляции Ленгмюра, волны Пуанкаре, апвеллинги, термобар, грибковидные вихревые структуры, внутренние волны для широкого диапазона волновых чисел), разработаны соответствующие модели [66, 72, 73, 84, 96].

Для больших стратифицированных озер гидродинамические процессы особенно разнообразны в период стратификации. Это выражается в наличии в данный период как развитой вертикальной стратификации, так и горизонтальных температурных неоднородностей. Например, на Ладожском озере амплитуда горизонтальных изменений температуры может достигать 15 °С между мелководьем на юге и глубоководной зоной на северо-западе озера и по вертикали 15 °С [38, 41]. Это определяет, в частности, необходимость использования для моделирования трехмерных математических моделей. По данным работ [41, 58, 90, 95] известно, что климатическая циркуляция для крупных озер складывается из относительно крупномасштабных, повторяющихся из года в год, циркуляций, охватывающих основную часть водной массы озера или его большие части течениями циклонического характера, а также сопутствующих антициклонических циркуляций. В соответствии с предложением А.С. Мониной [24] классификация движений океана характеризует крупномасштабную циркуляцию как статистический ансамбль движений таких образований в океане, которые могут быть воспроизведены индивидуально. Принятие такой точки зрения при численном моделировании динамики вод озер приводит к понятию «крупномасштабная циркуляция». По аналогии с этим подходом для больших стратифицированных озер под крупномасштабными циркуляциями будем подразумевать такие образования

в озере, размеры которых сопоставимы с характерными горизонтальными размерами озера [34].

Так, для характерных размеров Ладожского и Онежского озер по горизонтали порядка 10^5 м и глубине порядка 10^2 м для дискретных математических моделей климатического масштаба индивидуальное описание может быть дано лишь для «глобальных» элементов динамики озера (циркуляций вод циклонического и антициклонического тапа, так называемых общеозерных, охватывающих озеро или его крупные части). А моделирование течений и температурного режима озера для относительно краткосрочных временных периодов, порядка синоптического или сезонного, можно интерпретировать как задачу воспроизведения реальности, моделирование и осреднение циркуляции озера за определенное достаточно большое количество лет — как воспроизведение климатической циркуляции. Воспроизведение климатической циркуляции сводится к построению периодического решения, для чего требуется проводить вычисления на физическое время, кратное времени условного водообмена озера, которое для Ладожского и Онежского озер приблизительно равно 12–14 годам. При этом отметим, что данные о времени условного водообмена (retention time) не являются представительными для понимания реальных процессов переноса, перемешивания вод, поскольку перемешивание в прибрежной зоне озер может быть до 4 порядков интенсивнее, чем в глубоководной, что приводит к более высокой интенсивности поступления биогенов в придонные слои [59, 89, 93]. Так, например, условный водообмен, определенный как суммарный среднесуточный сток к объему вод озера Байкал, составляет около 350 лет [54], а по данным измерений этот водообмен может быть в разных зонах озера всего до 16 лет.

Математическое моделирование экосистем крупных стратифицированных озер. Многие процессы и явления живой природы описываются дифференциальными уравнениями (которые основаны не на физических законах, и не на уравнениях химических реакций) и не могут быть воспроизведены точно на языке химических реакций [17]. Основу уравнений экологических моделей озерных систем составляют различные эмпирические закономерности, установленные в процессе изучения и обработки результатов наблюдений и содержащие в изобилии эмпирические зависимости и параметры [1]. Константы или коэффициенты в этих закономерностях не являются универсальными, в отличие от физических законов. Именно это стало одной из значимых причин, затрудняющих создание универсальных моделей водных экосистем. При конструировании экологических моделей озер, как отмечается в [17, 21, 74], самое важное — это наличие качественных исходных данных, а стремление к возможно большей детализации должно быть уравновешено пониманием того, что резкий рост числа переменных в модели, как правило, не улучшает ее. Также важно то, что при создании модели экосистемы необходимо опираться на выполнение законов сохранения вещества и энергии в водной экосистеме.

Практика применения моделей для Ладожского и Онежского озер показала, что для калибровки и верификации моделей полезным является создание таблиц феноменологии процессов и явлений в озерах, полученных по данным многолетних исследований, например о времени начала формирования и окончания разрушения

термобара, термоклина, становления и разрушения ледяного покрова и др. [34]. Таким образом, до сих пор актуальным является сбор необходимых данных натурных наблюдений, полученных на акватории озера, и спутниковых измерений, необходимых для калибровки и верификации моделей.

При разработке моделей экосистем больших стратифицированных озер должны обеспечиваться условия выполнения законов сохранения вещества, если нет источников и стоков, и законов изменения, если есть обмен веществом на границах водоема [18–21].

Одной из важнейших задач сохранения водных ресурсов является создание интегрированных систем управления водопользованием, обеспечивающих информационную поддержку органов природоохраны [8, 21]. Задача управления экосистемой озера для крупных озер, таких как Великие американские озера, Байкал, Ладога, Онега, при современном состоянии знаний об этих объектах и особенно их реакций на внешние воздействия еще далека от своего практического воплощения [10, 14, 74, 80]. Без надежного мониторинга и натурных экспериментов никакая, даже самая лучшая, теория не способна обеспечить работоспособные рекомендации по управлению данной озерной экосистемой. Но без проверенной и хорошо обоснованной теории самые тщательные и подробные измерения параметров экосистемы в лучшем случае приведут к необходимости использования модели типа «черного ящика», что, как показывает опыт, далеко не всегда приводит к успеху [17].

Любые построения типа «игры с природой» могут оказаться бесполезными в случае применения слишком упрощенной модели или модели, не учитывающей существенных свойств объекта. Для водных экологических систем это особенно важно, поскольку они склонны к адаптационным изменениям, которые приводят их в состояния, которые никогда до этого не наблюдались [21].

Для Ладожского и Онежского озер в СПб ЭМИ РАН был разработан комплекс математических моделей [2, 17, 89], которые создавались на основе натурных данных и знаний, полученных в ИНОЗ РАН [14, 27] и ИВПС РАН [27, 89]. При этом в качестве средних многолетних среднемесячных значений внешних воздействий на водоем использовались результаты обработки данных наблюдений, представленные в трудах Института озероведения РАН [14, 27] и трудах ИВПС КарНЦ РАН [47, 89].

Постановка задачи математического моделирования. Для описания крупномасштабной циркуляции и термического режима больших стратифицированных озер, расположенных вне экваториальной зоны в Северном полушарии, используют записанные в декартовой системе координат трехмерные математические модели геофизической гидротермодинамики океана [2]. Декартову систему координат здесь можно использовать потому, что, как правило, протяженность пресноводных озер позволяет пренебречь кривизной Земли и считать невозмущенную поверхность водоема плоской. При этом, как и для океана, принимается следующее: приближение Буссинеска, приближение гидростатики, упрощение кориолисовых членов и замена параметра Кориолиса на постоянное значение для данной широты озера, уравнение переноса энтропии приближенно записывается в форме уравнения переноса тепла для движущейся среды. Подробно система

уравнений, граничные и начальные условия моделей ТГД, параметризация горизонтального и вертикального обменов описаны в работах [2, 17, 32]. Следует отметить, что для пресноводных водоемов неприемлемо использование линейного уравнения состояния ввиду того, что температура пресной воды наибольшей плотности ($T = 3,98$ °С) играет важную роль в формировании поля температуры водоема.

При постановке граничных условий следует учитывать, что для формирования водного баланса, теплового режима и качества воды многих крупных озер речной приток и сток играют важную роль. Для озер важно также учитывать осадки и испарение. Свободная поверхность водоема задается функцией $\xi(x, y, t)$, то есть выражается уравнением $z = \xi(x, y, t)$. Если учитывать при моделировании гидротермодинамики водоема воспроизведение крупномасштабной климатической циркуляции, то для больших глубоких озер можно считать величину $\xi(x, y, t)$ малой по сравнению с глубиной водоема, и поэтому граничные условия, которые ставятся на поверхности водоема, можно задавать на невозмущенной поверхности водоема при $z = 0$ [2, 32]. Такое предположение вполне оправдано, если речь не идет о воспроизведении процессов синоптического масштаба, например штормовых нагонов. Это относится как к кинематическим, так и к динамическим краевым условиям. Для поверхности таких озер, как Ладожское, обычно пренебрегают горизонтальным градиентом атмосферного давления.

Трехмерные модели с упрощениями. Разработанные в СПб ЭМИ РАН модели ТГД для Ладожского и Онежского озер и программные комплексы в большинстве своем основаны на примитивных уравнениях в формулировке, приведенной в данном обзоре. Однако для решения некоторых задач вполне приемлемыми оказываются модели, в которых приняты некоторые упрощения, облегчающие получение численных решений. Так, для воспроизведения климатической циркуляции больших стратифицированных озер вполне приемлемыми оказались модели типа приведенной в монографиях Г.И. Марчука с соавторами [16] модели климатической циркуляции океана. Как показала практика моделирования термогидродинамических процессов в климатическом масштабе в упрощенном варианте, могут быть отброшены инерционные члены и члены, определяющие горизонтальный турбулентный обмен. Параметр Кориолиса l ради простоты считается постоянным. В качестве уравнения состояния принимается одна из эмпирических зависимостей вида $\rho = \rho(T)$, в которой не учитывается зависимость плотности от давления. Для Ладожского и Онежского озер, как показала практика [2, 30–36], это оправдано.

В моделях при относительно небольших глубинах часто используется следующее уравнение состояния пресной воды [90]:

$$\rho(T) = \rho_w \left[1 - 6,8 \cdot 10^{-6} (T - 4)^2 \right], \quad [T] = \text{°C}.$$

Уравнение переноса тепла в модели климатической циркуляции озер имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right).$$

Коэффициенты v_x , v_y , v_z , k_z считаются функциями переменных x , y , z и t ;

$$v_0 = \begin{cases} 0 & \text{– в точках твердой границы (условие непротекания),} \\ \text{заданное значение} & \text{– в створах втекающих и вытекающих рек.} \end{cases}$$

В работах [2, 89] представлена реализация сформулированной модели; ее назначение – обеспечение моделей экосистемы информацией об абиотических факторах водной среды. Эта модель названа климатической гидротермодинамической моделью (КГТДМ), или СНТДМ (Climatic Hydro Dynamic Model). С ее помощью воспроизведены климатические циркуляции Ладожского и Онежского озер [30–34]. Модель позволяет проводить расчеты распространения пассивных и неконсервативных примесей. В работе [33] приведены результаты расчетов распространения загрязнений в Онежском озере.

Для оценки изменений в экосистеме озер под воздействием меняющихся климатических условий на водосборе озера воспроизводится соответствующий гидротермодинамический режим озера. Изменения климата на водосборе задавались по сценариям ИРСС и рассчитывались на модели ECHAM-4, разработанной в Институте Макса Планка до 2050–2100 г. [см. 50]. В моделях, разработанных Л.А. Руховцем и др. [33], изменения климата на водосборе озера определяют изменения теплового потока через поверхность водоема и суммарного притока воды, причем авторы изменяли эти внешние воздействия на водоем при моделировании. Были выполнены расчеты для нескольких типов термогидродинамики циркуляции вод и температурного режима Ладожского и Онежского озер для разных сценариев изменений климата, стока рек (среднепогодного, многоводного и маловодных периодов). Эксперименты с «холодной» циркуляцией (возможное похолодание климата) проводятся ввиду того, что в последнее десятилетие отмечается замедление потепления и, возможно, похолодание климата.

Результаты расчетов изменений термогидродинамики Ладожского и Онежского озер показали, что увеличение среднегодовой, среднепогодной температуры водного тела озера к 2050 г. увеличится на 0,6 °С, тогда как для теплой циркуляции при потеплении климата на водосборе озера возрастет не менее чем на 1,4 °С. На рис. 2 сопоставлены кривые, характеризующие изменение площади ледяного покрова для всех пяти типов циркуляций. В расчетах воспроизведен ледовый режим водоема. При этом сроки образования и таяния льда близки к средним многолетним. Для Ладожского озера недостатком результатов численного моделирования является ежегодное 100 %-е покрытие озера льдом даже при потеплении климата [75].

Изменения в ледовом режиме вполне ожидаемые: для теплой циркуляции с повышенным притоком продолжительность полного ледостава наименьшая, для холодной циркуляции – наибольшая. Сопоставление поверхностного распределения температуры в летний период для различных циркуляций показывает, что наибольшие отличия есть в распределении температуры для холодной циркуляции и теплой с повышенным притоком. Отличия же для теплой циркуляции и теплой с пониженным притоком менее значительны. Такие же комментарии относятся к распределению температуры на вертикальном продольном разрезе.

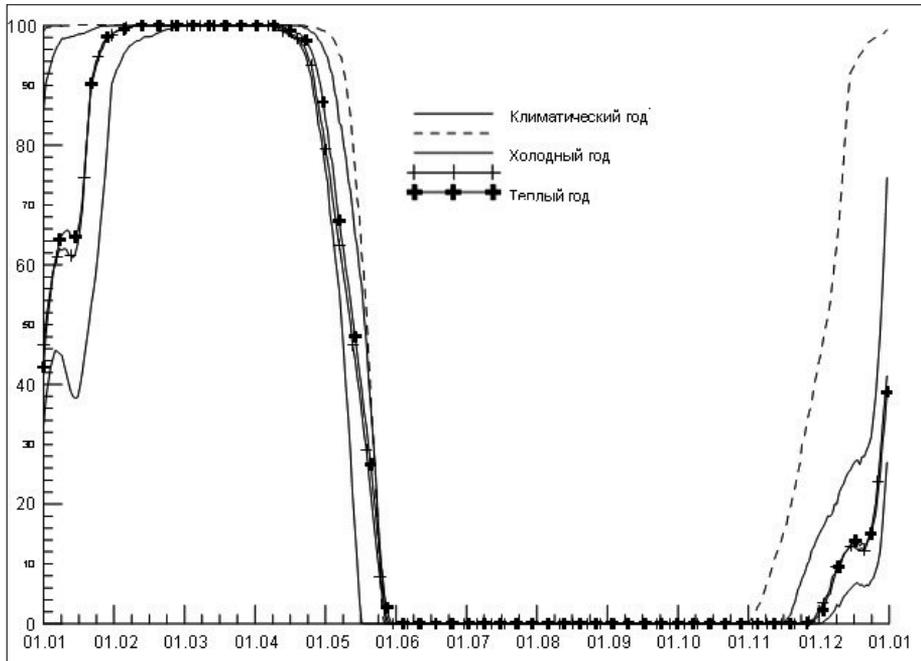


Рис. 2. Площадь (%) ледяного покрова Онежского озера (результаты моделирования для среднееголетнего [климатическая], холодного года и потепления климата на водосборе до 2 °С) [33]

По результатам моделирования, описанных в работах [18, 19, 30–34, 43–45], были сделаны также следующие выводы о реакции термогидродинамики Ладожского и Онежского озер на изменения климата:

- При существенном потеплении климата в регионе до 2 °С гомотермия в весенний период исчезает на 10 дней раньше, термобар формируется на 20 дней раньше.

- Смещаются сроки образования ледяного покрова, озеро полностью покрывается льдом в первой половине февраля, тогда как для климатической циркуляции по данным наблюдений это явление отмечается в конце декабря – начале января.

- Осенний термический бар на поверхности озера для теплой циркуляции в результатах расчетов не проявляется.

- Измерения и моделирование крупномасштабных течений в Онежском и Ладожском озерах свидетельствуют о доминировании так называемой общеозерной циклонической циркуляции с наличием нескольких мезомасштабных (существенно меньших по размерам общеозерной) циклонических и антициклонических круговоротов, которые тесно связаны с батиметрией и бароклинностью.

- При более теплом климате с относительно коротким временем существования ледяного покрова скорости течений в зимний период в озерах возрастают за счет дополнительного воздействия поля ветра. Такой тип циркуляции вод

в зимний период является типичным для американских Великих озер [59], расположенных в более теплом климате, чем Ладожское и Онежское озера.

- Расхождения «климатической» (осредненной за много лет) циркуляции вод озера с циркуляциями, типичными для более теплого и более холодного климата, оказались для Онежского озера незначительными, наиболее существенные отличия отмечаются только в осенний период.

- Онежское озеро за всю историю измерений ледяного покрова около 100 лет всегда покрывается ледяным покровом разной толщины (от 20 см до 1,5 м), в то время как Ладожское озеро редко полностью покрывается льдом [14, 47]. Важным практическим результатом проведенных вычислительных экспериментов является то, что характер циркуляции вод, как при потеплении, так и при похолодании климата, не будет иметь принципиальных отличий.

Математическая формулировка моделей экосистем озер. Примером согласованных моделей гидротермодинамики и экосистемы может служить разработанный в СПб ЭМИ РАН комплекс моделей экосистемы Ладожского озера (КМЭЛО), или DEMLL (Dynamic Ecosystem Models of Lake Ladoga), и модель экосистемы Онежского озера (МЭОО), или DEMLO (Dynamic Ecosystem Model of Lake Onego). Выполнение в этих моделях законов сохранения обеспечено технологией построения дискретных моделей [2, 30–34]. Состояние экосистемы в этих моделях, разработанных в СПб ЭМИ РАН [2, 18, 19], описывается трехмерными полями концентраций следующих субстанций: растворенного в воде минерального фосфора (P_{\min}); девяти комплексов фитопланктона ($Ph1, Ph2, \dots, Ph9$); зоопланктона (Z); детритного фосфора (DP); растворенного в воде органического вещества (DOP); растворенного в воде кислорода (OX). В модели воспроизводятся следующие процессы: перенос субстанций течениями, турбулентная диффузия и оседание субстанций, трансформация живого и мертвого органического вещества и биогенов.

Система уравнений модели имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_c) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + L_C,$$

$$C = Ph1, Ph2, \dots, Ph9, Z, DP, P, DOP, OX.$$

Здесь L_C – нелинейные операторы, описывающие процессы биохимической трансформации субстанций; u, v, w – проекции вектора скорости течения воды, являющиеся функциями от пространственных переменных (x, y, z) и времени t ; $(0, 0, w_c)$ – скорость оседания субстанций ($w_c > 0$); v_x, v_y, v_z – коэффициенты турбулентной диффузии субстанций. При моделировании использовались результаты расчетов скоростей течений и температуры по моделям гидротермодинамики [2].

Ввиду того что фосфор – основной регулятор продуктивности экосистемы, авторам удалось построить модель функционирования экосистемы, как и несколько других моделей Ладожского озера [17, 27], в виде внутриводоемного круговорота фосфора. Это позволило существенно сократить число переменных в модели. В модели фосфор (P_{total}) поступает в озеро со стоком втекающих рек, с осадками

и из береговых источников. Следует подчеркнуть, что в рамках модели выполняется закон сохранения общего фосфора (P_{total}). Для Ладожского и Онежского озер в СПб ЭМИ РАН разработаны следующие трехмерные модели, воспроизводящие круглогодичное функционирование экосистемы озера:

- модель гидротермодинамики озера; воспроизводит круглогодичную циркуляцию озера (систему течений и температурный режим) (1987;1998–2003);
- модель, основанная на круговороте азота и фосфора (1992);
- базовая модель, основанная на круговороте фосфора (1998);
- модель, имеющая три трофических уровня (1998);
- модель, включающая в себя зообентос (2003);
- модель сукцессии фитопланктона (2003);
- комплексная модель экосистемы озера (2008);
- модернизированная модель сукцессии (2010);
- модель с организмами-деструкторами (2012).

Вычислительные эксперименты в [2, 30–34, 89] по воспроизведению функционирования озера с 1962 по 2005 г. показали, что для периода 1962–1995 гг. модель адекватно воспроизводит трансформацию экосистемы озера. Однако, как представлено на рис. 3, максимальные значения биомассы фитопланктона в эпилимнионе Ладоги в 2000 и 2005 гг. (более 2,00 мг/л) на 20 % меньше, чем в 1990 г. (около 2,5 мг/л).

С помощью математического моделирования получены количественные оценки, подтверждающие, что снижение фосфорной нагрузки не может гарантировать

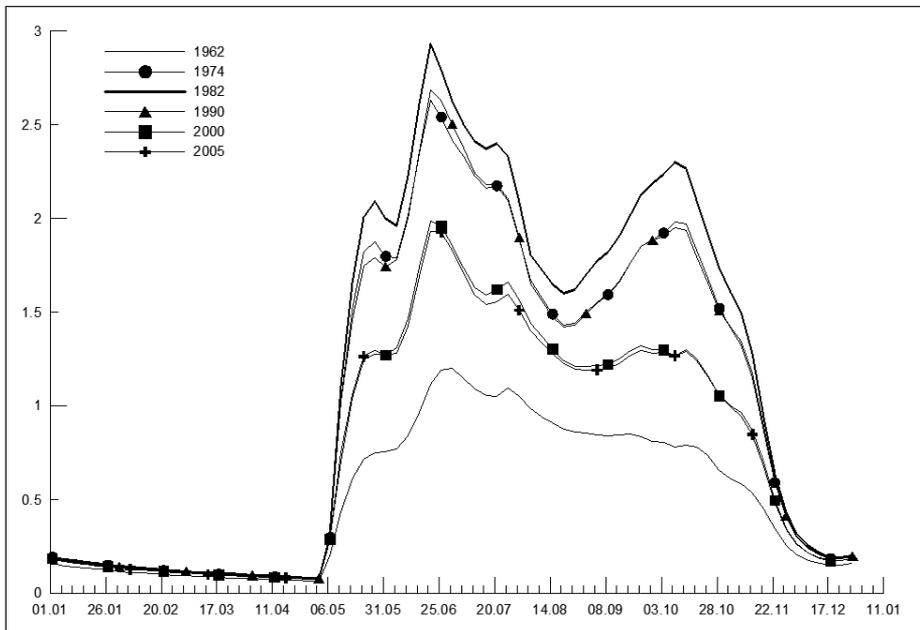


Рис. 3. Годовая динамика суммарной биомассы фитопланктона (мг/л) в эпилимнионе Ладожского озера (результаты моделирования) [21]

снижение продуктивности Ладожского озера. Фактически можно констатировать, что снижение фосфорной нагрузки до уровня 2430 т P/год не позволяет вернуть озеро в исходное олиготрофное состояние. Здесь, конечно, следует сделать оговорку: если не произойдут непредсказуемые изменения в структуре экосистемы озера. Этот пример показывает, что по крайней мере для великих озер умеренных широт снижение антропогенной нагрузки не может гарантировать возврата экосистем озер в устойчивое состояние. Тем самым можно рассматривать этот пример как предупреждение об опасности выведения экосистем озер из равновесного состояния.

Был сделан вывод о том, что трансформация экосистемы Ладожского и Онежского озер не связана с изменениями климата, а наибольший вклад в изменения экосистем рассматриваемых озер в настоящее время вносит деятельность человека.

Далее обратимся к нерешенным проблемам озера-водохранилища Байкал, которые, на наш взгляд, в первую очередь связаны с отсутствием системного эколого-социо-экономического [21] подхода по исследованию водоема и водосбора; разрозненности усилий разных научных организаций из-за недостаточной координации работ; несовершенством существующей системы мониторинга; отсутствием интегрированных систем управления водопользованием этого водоема, основанных на данных и знаниях и на соответствующих математических моделях. В работе [3] отмечается, что «При соблюдении приоритета сохранения уникальной экосистемы Байкала должен использоваться комплексный подход... Объектом исследований и согласований должны стать не только вопросы регулирования уровня озера, но и эффективное функционирование и развитие единой природно-технической и социально-экономической системы». Таким образом, ключевым фактором в решении проблем озера является неиспользование системного подхода и соответствующих математических моделей «озеро – водосбор», наподобие тех, что были разработаны и использовались для диагноза и прогноза экосистем Ладожского и Онежского озер [3, 30–34]. Основа для разработки и внедрения таких моделей для оз. Байкал имеется: Е.А. Цветовой [53] созданы трехмерные модели термогидродинамики и выполнены теоретические разработки для моделирования экосистемы озера [10, 17]. Таким образом, необходима координация исследований и практических разработок на основе федеральной комплексной программы научных исследований, которая позволит консолидировать усилия разных организаций, устранив ведомственную монополию на научно-техническую информацию о состоянии озерной экосистемы и водосбора и даст возможность создать интегрированную систему управления «озеро – водосбор».

Как показала практика последних десятилетий, реализация такой программы будет успешной при координации работ Российской академией наук, а не ведомствами. Пример этому – положительный опыт решения подобных крупных проблем в области озераведения в СССР. Например таких, как Программа «Большие озера СССР» или Севанская проблема, реализация которых выполнялась по постановлениям Государственного комитета СССР по науке и технике при СМ СССР. Для реализации этих проектов были созданы соответствующие координационные советы и по результатам исследований под руководством ИНОЗ АН СССР

и организаций-соисполнителей проведены комплексные исследования, разработаны модели, на основе которых были приняты соответствующие практические решения [28]. Среди важнейших проблем, которые предстоит решить, – понимание причин медленного восстановления экосистем крупных озер Евразии после резкого уменьшения биогенной нагрузки, оценка роли бактериопланктона и водных грибов в восстановлении экосистем озер, изучение роли вселенцев в изменении экосистем озер, совершенствование законодательства для охраны и рационального использования озер.

Расчеты на моделях, разработанных в СПб ЭМИ РАН при участии коллективов сотрудников ИНОЗ РАН и ИВПС [2, 21, 30–36], показали следующее:

- На основе модельных и натуральных экспериментов получено, что при климатических воздействиях изменения гидротермодинамического режима Онежского озера более существенны, чем для Ладожского. В соответствии с этим реакция биоты (рассмотрены как биомассы, так и отдельные таксоны фитопланктона и зоопланктона) на климатические изменения для Онежского озера также более существенна. Общая биомасса фитопланктона при потеплении может не только увеличиться, но и, наоборот, снижаться. Это объясняется также тем, что наибольший вклад в биомассу дают водоросли, для которых более низкие температуры воды летом и осенью являются более благоприятными, например *Aulacosira islandica*, которая дает главный вклад в биомассу фитопланктона и развивается только при температуре воды, не превышающей 8 °С.

- Полученные в вычислительных экспериментах оценки возможных изменений в экосистемах Ладожского и Онежского озер показывают, что изменения в годовой динамике биомассы фитопланктона (основного продуцента в экосистеме) при возможных изменениях климата заметны только в осенний период, и эти изменения незначительны. Реакция зоопланктона на изменение температурного режима озер более заметна, чем у фитопланктона, и она имеет место в течение всего вегетационного периода. Существенно более значимой является реакция экосистем озер на изменения антропогенной нагрузки, которая является основным фактором, определяющим устойчивое состояние экосистемы озера.

- Для великих озер Европы (Ладожского и Онежского) в настоящее время, как и ранее, более заметной является реакция экосистемы озер на колебания антропогенной нагрузки, чем на изменения климата.

Важно то, что созданные в СПб ЭМИ РАН модели являются авторскими и работают только в «руках» создателей. Кроме этого созданные в СПб ЭМИ РАН модели имеют ряд недостатков, которые без основного разработчика Л.А. Руховца не удастся устранить. Среди «слабостей» моделей СПб ЭМИ РАН отметим: а) недостаточную развитость атмосферного блока, слабое описывание ледяного покрова, малое пространственное разрешение модели (2 км), невозможность задания изменчивого во времени притока рек; б) недоведенность моделей до стадии «продукта», который распространяется в виде кода, как модели POM, ECOM, ELCOM, EFDC, CANDIA NEMO, которые использовались для моделирования экосистем Великих американских озер [59, 61, 85].

Однако указанные модели также имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение для Ладожского и Онежского озер или озера Байкал. В работе

[93] приведено сравнение использования моделей NEMO, POM [60, 63, 78, 81, 82], а в работах [71, 77, 88, 92] приводится опыт использования моделей CANDIA, CAEDYM для озер. В модели CANDIA, в отличие от POM и NEMO, используется приближение «жесткой крышки». Для воспроизведения циркуляции и температурного режима озер Эри и Онтарио были проведены расчеты по этим трем моделям. Сопоставление результатов моделирования по всем трем моделям с данными наблюдений показало, что наименьшие отклонения (погрешности) температуры поверхности озер, средней температуры приповерхностного слоя глубиной 50 м от данных наблюдений и отклонения значений скоростей на выбранном наборе станций наблюдений оказались для модели NEMO, однако слабым местом данной модели оказалось воспроизведение термоклина для оз. Эри.

Для прогнозирования изменения экосистем озер и морей разработано много разнообразных моделей. Наличие большого числа и разнообразие моделей экосистем озер объясняется тем, что даже при сходстве абиотических условий и общности основных механизмов функционирования экосистем озер приоритетность механизмов зачастую различается и потому требуется создание собственных моделей для уникальных экосистем крупных озер. Среди задач, стоящих перед океанологией и лимнологией в XXI в., – создание теории динамики экологических систем, способной к практическому прогнозированию не только в обычных, но и в экстремальных ситуациях. Такой подход существенно меняет отношение к материалу наблюдений, мониторингу и моделированию [19, 61, 79, 85].

Комплекс моделей экосистем озер представляет собой детерминированные системы, построенные на основе законов сохранения вещества и энергии. Подобная парадигма в гидродинамической и термической частях модели основывается на численном решении уравнений Навье–Стокса, а в биологической – на уравнениях продукционной гидробиологии [1]. Подобный подход оказался результативным при изучении антропогенного эвтрофирования экосистемы озера. Однако при переходе к проблеме комплексного использования природных ресурсов озер и водохранилищ, включающих в себя не только сохранение или восстановление качества воды, но и использование их для водного транспорта, туризма, рыбного хозяйства, электроэнергетики, такой подход оказался недостаточным.

В этом случае предлагается новый подход [22, 23], позволяющий моделировать сложные нелинейные природные процессы, включая процессы самоорганизации, используя так называемые клеточные автоматы [57, 85] для создания компьютерной модели распространения консервативной примеси, оценки загрязнения водоема и термического режима Ладожского и Онежского озер. Задачи моделирования решаются по пути их последовательного усложнения: от точечной по вертикали модели глубоководного района озера к двумерной для продольного разреза озера и наконец к трехмерной модели всего водоема. Достоинство предлагаемого метода моделирования, в частности, заключается в простоте программной реализации. Аппарат клеточных автоматов хорошо приспособлен для описания гидрохимических и гидробиологических процессов, происходящих в озерах. Собственно, своим появлением клеточные автоматы обязаны задаче моделирования систем, способных к самовоспроизведению [57]. Это открывает перспективы расширения гидродинамических моделей на всю экологическую систему водоема.

Учитывая недостатки комплекса моделей, разработанных в СПб ЭМИ РАН, а также невозможность их применения без участия создателей этого комплекса в рамках гранта, в рамках гранта РФФИ 14-17-00740 была поставлена задача разработки более совершенного комплекса моделей термогидродинамики (ТГД) и экосистем. Такая задача решается на основе ранее разработанной членом-корреспондентом РАН Р.А. Ибраевым модели ТГД для Каспия [12].

На рис. 4 приведена схема решения поставленных в проекте задач несколькими организациями.

В настоящее время в рамках проекта адаптирована трехмерная модель термогидродинамики озер с заданием атмосферных воздействий из нескольких моделей реанализа [11]. Используется более совершенный блок для описания ледяного покрова, сеточная область для численных экспериментов достигает 0,5 км, что позволяет более корректно описывать процессы в заливах и прибрежной зоне. Расчеты проводятся на вычислительных кластерах, что позволяет более корректно описать термогидродинамические процессы в озерах – апвеллинги, фронтальные зоны, термобар, а также процессы в прибрежной зоне озер. Созданная и апробированная модель экосистемы озера будет откалибрована и верифицирована на примере Ладожского и Онежского озер и в перспективе станет использоваться для диагноза и прогноза изменений экосистемы озера Байкал и других озер России.

Для начала на ее основе планируется создание системы поддержки принятия управленческих решений на примере Онежского озера-водохранилища с перспективой применения для озера Байкал – Иркутского водохранилища. Создание такой системы позволит отказаться от принятия малообоснованных управленческих решений без строго научного обоснования.

Проблемы оценки изменений климата и экосистем Белого моря и пути их решения. Белое море – одно из наиболее изученных морей России, на примере которого можно продемонстрировать пути решения ряда научных и практических проблем, задач по освоению Арктической зоны РФ [42, 46]. Площадь водосбора Белого моря (720 тыс. км²) в 8 раз превышает площадь акватории моря (91 тыс. км²), что является наибольшим показателем для всех окраинных морей Северного Ледовитого океана и свидетельствует о значительном влиянии процессов на водосборе на экосистемы моря [50], поэтому при проведении комплексных, системных исследований, изучении причин изменений экосистем моря при антропогенных и климатических воздействиях необходимо учитывать влияние водосбора. Проблемам Белого моря и его водосбора в последние 30 лет были посвящены работы [9, 64], в которых рассматривались разные аспекты оценки состояния моря, особенности его продуктивности, загрязнения, пути рационального использования ресурсов Беломорья. Современные проблемы Белого моря и водосбора в рамках программы освоения Арктической зоны РФ включают в себя широкий комплекс возникших проблем социо-эколого-экономического развития [42], решить которые без новых исследований будет невозможно.

Учитывая особенности термогидродинамики Белого моря, наличие сильных индуцированных приливных волн, малоизученный экспериментально водообмен между Баренцевым и Белым морями, требуется разработка моделей ТГД и экосистем для климатического масштаба и постановка соответствующих систем

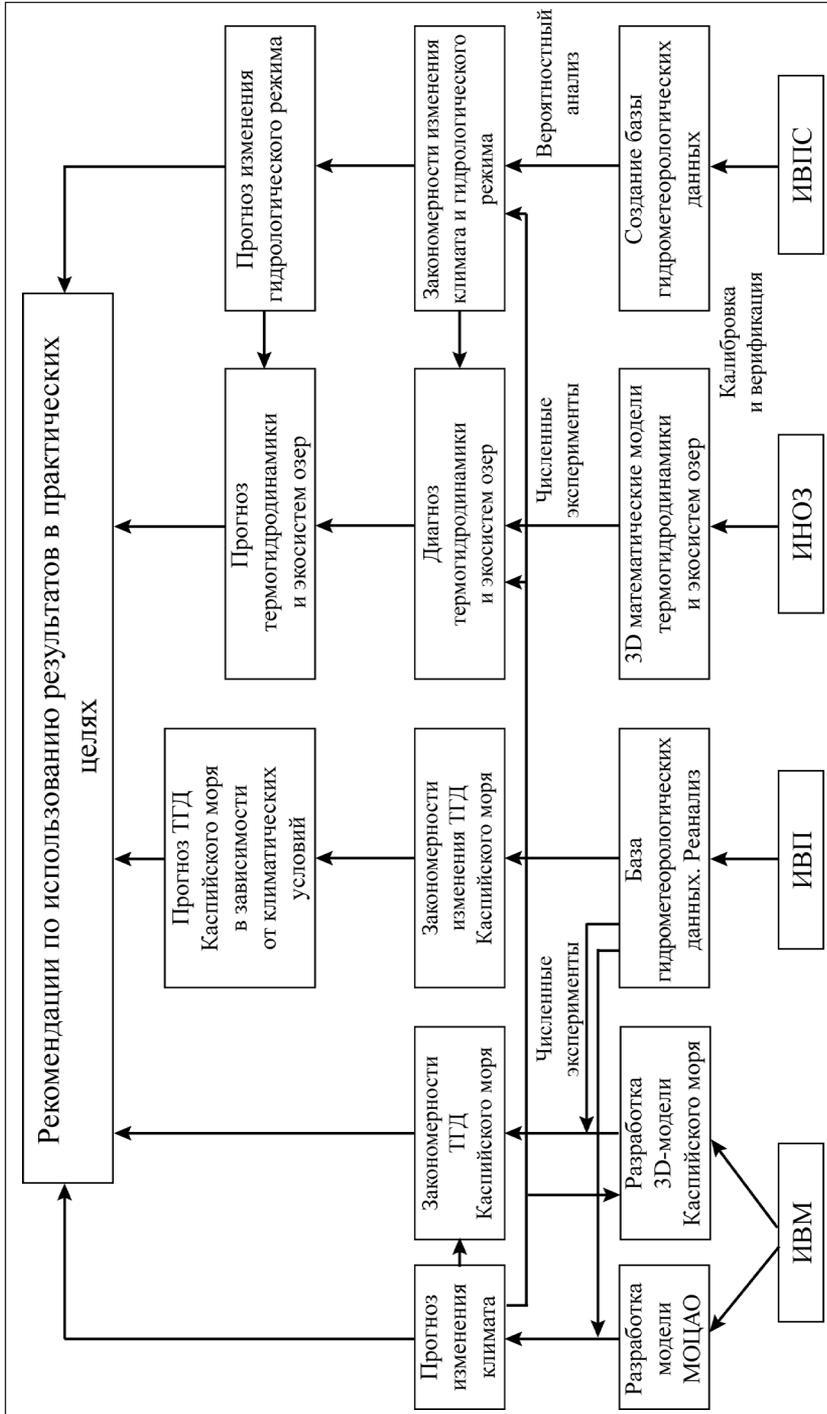


Рис. 4. Пример реализации задач диагноза и прогноза изменения гидрологического режима и экосистем крупных озер под влиянием антропогенных факторов и климата организациями ИВПС, ИВП, ИВМ, ИНОЗ РАН

наблюдений, в особенности в Горле Белого моря и на границе с Баренцевым морем.

Для описания изменений экосистемы Белого моря имеется несколько моделей, созданных в основном И.А. Нееловым и О.П. Савчуком [см. 50], верификация и калибровка которых выполнялась по БД, разработанной в ИВПС КарНЦ РАН на основе данных, полученных многими организациями. Модель ТГД И.А. Неелова (ААНИИ) описывает все основные физические процессы, ответственные за формирование гидрологических полей Белого моря (дрейфующий лед, приливы) и соединена с экосистемной моделью. При этом созданные модели являются авторскими для Ладожского и Онежского озер. В моделях экосистем, разработанных в СПб ЭМИ РАН [50], имелись недостатки задания атмосферных воздействий, моделирования ледяного покрова, параметризации подсеточных процессов [50]. Поэтому в 2005 г. академиком В.П. Дымниковым была поставлена задача создания более совершенной модели, собственного российского «продукта», который может использоваться разными пользователями.

Требовалось разработать 3D-модели для использования их в экспертных системах (ЭС), корректно поставить и организовать решение задач для оценки состояния и прогноза изменений экосистем морей, организовать дополнительные натурные эксперименты для калибровки, верификации моделей, разработать системы ассимиляции данных (САД) в математических моделях термогидродинамики в целях дальнейшего использования их в экспертных системах (ЭС) по оценке состояния и прогноза изменений морей и в конечном итоге создать собственный «продукт».

Предлагаемая ЭС может быть использована в задачах мониторинга, рационального использования и управления ресурсами морских и пресноводных объектов. Создание модели акад. В.П. Дымниковым было предложено на примере Белого моря, так как для этого бассейна создана достаточная информационная основа [46, 50], а также имеется ряд актуальных практических задач, которые могут быть решены с помощью предлагаемой экспертной системы.

Для решения этих задач в рамках нескольких проектов и программ, таких как ФЦП «Мировой океан», РФФИ совместно ИВПС КарНЦ РАН, ИВМ РАН и ИПМИ КарНЦ РАН в период 2005–2006 гг. было выполнено следующее:

- обобщены натурные данные по ТГД и химико-биологическим параметрам для использования их в моделях; создана, ежегодно обновляемая, комплексная БД «Белое море и водосбор» (2015) и издана обобщающая монография «Белое море и водосбор» (2007) [50];

- совместно ИВПС и ИО РАН выполнены эксперименты для калибровки, верификации и внедрения модели «Система оперативного мониторинга» (СОМ), разработанной Е.В. Семеновым с элементами усвоения данных спутниковых измерений [6];

- проведены специализированные эксперименты по изучению водообмена, течений через Горло, Соловецкие Салмы, в маргинальных фильтрах и др. [9, 50];

- для решения задач прогноза изменений экосистемы Белого моря под влиянием вариаций климата и антропогенных факторов была внедрена наиболее совершенная с точки зрения точности описания полей солености, температуры

воды, течений, ледяного покрова 3D-модель термогидродинамки ФЕМАО, разработанная для Северного Ледовитого океана в ИВМ РАН [см. 52].

Результаты и обсуждение задач осуществляются на сайте «Моделируем Белое море» (<https://sites.google.com/site/modelingthewhitesea/home>) [52]. В настоящее время после адаптации блока ТГД для Белого моря авторы выполняют калибровку, настройку химико-биологического блока модели экосистемы моря – BFM (<http://bfm-community.eu>), функционирующей совместно с программным комплексом JASMINE [52], созданным специально для Белого моря на базе модели ФЕМАО. Модель BFM разработана итальянским консорциумом, объединяющим научные организации, занимающиеся климатом и океанографией: CMCC, OGS, UNIBO, UST (<http://bfm-community.eu>). Биогеохимическая модель BFM описывает динамику концентрации биогенных элементов и веществ в составе групп организмов (фито-, зоо- и бактериопланктон, детрит, органическое и неорганическое вещество и т. п.). Входными данными расчетной программы в комплексе JASMINE+BFM являются граничные условия на «жидкой границе» Белого и Баренцева морей, метеорологические данные NCEP (<http://www.ncep.noaa.gov/>), сток крупных рек задается из наблюдений. Учитываются потоки массы, тепла и соли. Калибровка и верификация модели осуществляется также по данным дистанционных спутниковых измерений. Выходные данные – среднемесячные поля трехмерных течений, термохалинные поля, отклонения уровня моря от равновесного, распределения массы льда, двумерной скорости дрейфа льда с учетом снега, сплоченность льда по грациям толщины. Выходные данные BFM – концентрации и распределения веществ. Качественное распределение скорости течений, термохалинных полей, толщины льда в общем согласуется с данными наблюдений, представленных в работах [50, 64]. Недостатком модели BFM для Белого моря является неопределенность многих химико-биологических параметров, измерение которых затруднено или вовсе невозможно для Белого моря. Преимуществом разработки модели экосистемы Белого моря является возможность постановки направленных экспериментов для получения ключевых параметров модели и проведение подспутниковых измерений для разработки алгоритмов оценки параметров качества вод.

Разработанную на примере Белого моря модель экосистемы для оценки влияния изменений климата и разнообразных антропогенных воздействий предполагается использовать в дальнейшем как для моделирования экосистем морей Северного Ледовитого океана, так и для крупных стратифицированных озер.

Заключение

Серьезной проблемой отечественной лимнологии и океанологии при решении крупных задач является отсутствие конкурирующих школ, коллективов – создателей математических моделей экосистем морей и крупных стратифицированных озер, как это было ранее. Например, можно вспомнить работы коллективов ВЦ, Москва (Н.Н. Моисеев), университета Ростова-на-Дону (А.Б. Горстко и др.), СПИИ РАН (В.В. Иванищев, В.В. Михайлов и др., 2005), СПб ЭМИ РАН (Л.А. Руховец), ВЦ, Новосибирск (В.В. Пененко, Е.А. Цветова) и др. Не создаются модели в виде «продуктов», подобных широко используемым в России NEMO, BFM,

РОМ и др. Разработанные для водных объектов России математические модели работают только в руках их создателей.

Успехи моделирования существенно зависят от способностей создателей модели понять и оценить самые главные черты и характеристики экосистемы, которые следует учитывать в рамках модели. Существенно препятствует исследованиям доступность данных, а также возможность постановки необходимых экспериментов ввиду слабой оснащённости многих научных организаций приборами, которые практически не разрабатываются в нашей стране, а также научно-исследовательскими судами нового поколения.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 14-17-00740-П.

Литература

1. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. – СПб.: Наука, 2000. – 147 с.
2. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Г.П. Астраханцев, В.В. Меншуткин, Н.А. Петрова, Л.А. Руховец. – СПб.: Наука, 2003. – 363 с.
3. Бычков И.В., Никитин В.М. Регулирование уровня озера Байкал // География и прир. ресурсы. 2015, № 3. – С. 5–16.
4. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е.С. Нестерова. – М.: Триада, 2016. – 378 с.
5. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. – С. 379.
6. Опыт верификации оперативной модели мониторинга Белого моря в 2004–2008 гг. / Н. Волженский, А.А. Родионов, Е.В. Семенов и др. // Фунд. и прикл. гидрофизика. 2009. Т. 5. – С. 33–42.
7. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер / Т.Ю. Выручалкина, Н.Н. Филатов, Н.А. Дианский, А.Н. Гусев // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2016, № 9. – С. 3–16.
8. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. – М.: Научный мир, 2010. – 232 с.
9. О проявлении морского и речного факторов в фазы прилива и отлива на береговых участках разной конфигурации Белого моря / Ю.С. Долотов, Н.Н. Филатов, Н.А. Римский-Корсаков и др. // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. – С. 110–122.
10. Зилов Е.А. Математическое моделирование экосистемы озера Байкал: вчера, сегодня, завтра // Изв. Самарского НЦ РАН. 2006. Т. 8. – С. 58–64.
11. Моделирование гидротермодинамики Ладожского озера / И.С. Зверев, К.В. Ушаков, Е.А. Шипунова и др. // Всерос. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум). – СПб.: Изд-во «Лема», 2016. – С. 41–49.
12. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. – М.: ГЕОС, 2008. – 130 с.
13. Моделирование абиотических процессов в системе «водосбор – водоем» (на примере Чудско-Псковского озера) / С.А. Кондратьев, С.Д. Голосов, И.С. Зверев и др. – СПб.: Нестор-история, 2010. – 104 с.
14. Ладога / под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – 468 с.
15. Малинин В.Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. – СПб.: РГМУ, 1994. – 159 с.
16. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана / Г.И. Марчук, В.П. Дымников, В.Б. Залесный и др. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 320 с.
17. Меншуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). – Петрозаводск: СПб., 2010. – 419 с.
18. Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 1. Гидродинамика озер // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. – С. 1–17.

19. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 2. Модели экосистем пресноводных озер // *Вод. ресурсы*. 2014. Т. 41, № 1. – С. 24–38.
20. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер // *Вод. хозяйство России*. 2014, № 3. – С. 100–108.
21. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Состояние и перспективы развития моделирования экосистем пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов. – СПб.: Нестор-История, 2014. – 118 с.
22. Менишуткин В.В., Филатов Н.Н. Модель подледной экологической системы озера, основанная на применении клеточных автоматов // *Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. Лимнология*. 2016, № 5. – С. 76–87.
23. Менишуткин В.В., Филатов Н.Н. Модели Ладожского озера с использованием трехмерных клеточных автоматов // *Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. Лимнология*. 2017, № 3. – С. 93–102. – DOI: 10.17076/lim582.
24. Монин А.С. Введение в теорию климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 166 с.
25. Панин Г.Н., Дианский Н.А. О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 3. – С. 304–316.
26. Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В. Воздействие Северной Атлантики на гидрологический режим бассейна Каспийского моря // *Вод. ресурсы*. 2015. Т. 42, № 4. – С. 442–452.
27. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования / Н.А. Петрова, Т.Н. Петрова, О.М. Сусарева, И.В. Иофина // *Вод. ресурсы*. 2010. Т. 37, № 5. – С. 580–590.
28. Природные ресурсы больших озер СССР и вероятные их изменения / [Авт.-сост. И.М. Распопов, Н.Н. Давыдова, В.А. Кириллова и др.]; отв. ред. О.А. Алекин. – Л.: Наука, 1984. – 286 с.
29. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов. – М.: Наука, 2008. – 152 с.
30. Оценка возможных изменений в экосистеме Ладожского озера в 21 веке под влиянием антропогенных и климатических факторов / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. // *Вод. ресурсы*. 2006. Т. 33, № 3. – С. 367–382.
31. Моделирование климатической циркуляции Онежского озера / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, А.Н. Мальгин и др. // *Вод. ресурсы*. 2006. Т. 33, № 5. – С. 555–566.
32. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки / Руховец Л.А., Петрова Н.А., Менишуткин В.В. и др. // *Вод. ресурсы*. 2011. Т. 38, № 6. – С. 740–752.
33. Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Использование математических моделей для решения задач сохранения водных ресурсов Онежского озера // *Тр. КарНЦ РАН*. 2011, № 4. – С. 77–87.
34. Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Озера и климат: модели и методы // *Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы: учеб. пос. / под ред. В.П. Дымникова, В.Н. Лыкосова, Е.П. Гордова*. – Гл. 10. – Томск: ИД ТГУ, 2014. – С. 256–326.
35. Ассимиляционный потенциал водных систем и задача сохранения водных ресурсов / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. // *Тр. конф. «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике»*. Секция гидрологии. – Цимлянск, 2012. – С. 311–317.
36. Великие озера Европы и глобальное потепление. II / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. // *Обзор прикл. и промысл. математики*. 2011. Т. 18. Вып. 5. – С. 712–728.
37. Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы (математическое моделирование). – М.: Мир, 1989. – 374 с.
38. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. – Л.: Наука, 1982. – 232 с.
39. Тулохонов А.К., Гомбоев Б.О. Байкальская природная территория: переход на устойчивое развитие. «Круглый стол» Совета Федерации «Байкал – мировое наследие». 16 июня 2003 г. – С. 39–41.
40. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. – СПб.: Наука, 1991. – 191 с.
41. Филатов Н.Н. Динамика озер. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 165 с.
42. Филатов Н.Н., Дружинин П.В., Тержевик А.Ю. Беломорье – регион для решения актуальных проблем Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2011, № 2. – С. 91–101.
43. Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата / Н.Н. Филатов, А.П. Георгиев, Т.В. Ефремова и др. // *ДАН*. 2012. Т. 444, № 5. – С. 1–4.

44. *Изменения и изменчивость климата европейского севера России и их влияние на водные объекты* / Н.Н. Филатов, Л.Е. Назарова, А.В. Семенов и др. // Арктика. 2012, № 2 (6). – С. 80–94.
45. *Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России* / Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова и др. // Учен. зап. РГГМУ. 2014, № 34. – С. 48–55.
46. *Создание информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора* / Н.Н. Филатов, А.В. Толстиков, М.С. Богданова и др. // Арктика: экология и экономика. 2014, № 3 (15). – С. 18–29.
47. *Филатов Н.Н. (отв. ред.), Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях* / Н.М. Калинин, Т.П. Куликова, А.В. Литвиненко, П.А. Лозовик. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. – 375 с.
48. *Филатов Н.Н., Терзевик А.Ю.* Совместный российско-швейцарский проект по исследованию зимнего режима Ладожского и Онежского озер // Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. Лимнология. 2015, № 5. – С. 86–89.
49. *Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России* / Н.Н. Филатов, Т.Ю. Выручалкина, Н.А. Дианский и др. // Докл. АН. 2016. Т. 467, № 5. – С. 589–593.
50. *Филатов Н.Н., Терзевик А.Ю.* (ред.) Белое море и водосбор. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 335 с.
51. *Фролов А.В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. – М.: Геос, 2003. – 170 с.
52. *Чернов И.А., Толстиков А.В., Яковлев Н.Г.* Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии. 2016, № 8. – С. 116–128.
53. *Цветова Е.А.* Математическое моделирование циркуляции вод озера. Течения в Байкале. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 63–81.
54. *Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н.* Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природные ресурсы. 2010, № 3. – С. 62–68.
55. *Adrian R.a., O'Reilly C., Horacio. et al.* Lakes as sentinels of climate change. *Limnol. Oceanogr.*, 54 (6, part 2), 2009, 2283–2297.
56. *Angel J.R. and K.E. Kunkel.* The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *Journal of Great Lakes Research, Supplement 2, Vol. 36, 2009.* 51–58.
57. *Atanasova N., Todorovski L., Džeroski S. and Kompare B.* Building a domain library for knowledge based approach to automated modeling of lakes // *Proceeding of European Conference on Ecological Modelling. Bled. 2004.* – P. 17–18.
58. *Appt J., Imberger J., Kobus H.* Basin-scale motion in stratified Upper Lake Constance // *Limnol. Oceanogr.* 2004. 49 (4). – P. 919–933.
59. *Beletsky D., Schwab D.J.* Climatological circulation in Lake Michigan // *Geophys. Research Letters.* V. 35 (L21604, doi:10.1029/2008GL035773): 2008. – P. 1–5.
60. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // *Three-dimensional Coastal Ocean Models* // *J. Coastal Estuarine Sci.* V. 4 (AGU Washington, D.C. / Ed. N.S. Heaps). 1987. – 208 p.
61. *Boegman L., Rao Y.R.* Process oriented modeling of Lake Ontario Hydrodynamics // *Proc. 6th Intern. Sympos. Environ. Hydraulics. Athens, 2005.* – 6 p.
62. *Corman J.R., McIntyre P.B., Kuboja B., Mbemba W., Fink D.C., Wheeler W., Gans C., Michel E. and Flecker A.S.* Upwelling couples chemical and biological dynamics across the littoral and pelagic zones of Lake Tanganyika, East Africa. *Limnol. Oceanogr.*, 55 (1), 2010, 214–224.
63. *Dupont F., Padala C., Anning H. et al.* A NEMO-based modelling system for the Great Lakes // *15th Workshop on Physical Processes in Natural Waters / Burlington, 2011.* – P. 46–52.
64. *Filatov N., Bobilev L., Pozdnjakov D. et al.* White Sea, Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change Springer Praxis Geophys. Sc. 2005. – 472 p.
65. *Filatov N., Terzevik A., Zdorovennov A., VVlasenko, N. Stashuk and K. Hutter.* Field studies of internal waves in Lakes of the Globe. In the book *Strongly nonlinear Internal waves in lakes: Generation,*

- Transformation. Chapter 2. Advances in Geophysical and Environmental Mechanics (Springer Book Series). Springer. 2012. – P. 23–104.
66. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I. et al. Climate change impact on thermal and oxygen regime of Shallow lakes // *Tellus*. 2012. V. 64. – P. 1–11.
 67. Gronewold A.D., Fortin V., Lofgren B., Clites A., Stow C.A., Quinn F. Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective // *Climatic Change*. 2013. 120: 697–711 – DOI: 10.1007/s10584-013-0840-2.
 68. *Guidelines of Lake Management, Principles of lake management*. Eds. S. Jorhensen, R. Vollenveider. UNEP. 1988. – 195 p.
 69. Hawkins E., Edwards T., McNeill D. Pause for thought // *Nature Climate Change*. 2014. V. 4. – P. 154–156. – DOI:10.1038/nclimate2150.
 70. Hendersson-Sellers B., Markland H. *Decaying Lakes*. John Wiley & Sons. Chichester, 1987. – 279 p.
 71. Hipsey M.R., Hamilton D.P. *Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model: CAEDYM* // Science Manual. Centre for Water Research Report, University of Western Australia. 2008. V. 3. – P. 526–533.
 72. Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. *Physics of Lakes, Volume 1: Foundation of the Mathematical and Physical Background*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. V. 1. 2011. – 434 p.
 73. Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. *Physics of Lakes*. Springer-Verlag; Berlin; Heidelberg, V. 2. 2011. – 646 p.
 74. Jorgensen S.E. Overview of the model types available for development of ecological models // *Ecol. Mod.* V. 215. 2008. – P. 3–9.
 75. Kondratyev K.Ya. and Filatov N.N. (Eds.) *Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach*. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 1999. – 395 p.
 76. Laval B., Imberger J., Hodges B.R., Stocker R. Modelling circulation in lakes: Spatial and temporal variations // *Limnol. and Oceanogr.* 2003. V. 48, № 3. – P. 983–994.
 77. Leon L.F., Lam D.C., Schertzer W.M. et al. Towards coupling a 3D hydrodynamic lake model with Canadian Regional Climate Model: Simulation on Great Slave Lake // *J. Environ. Modelling & Software*. 2007. V. 22. Is. 6. – P. 787–796.
 78. Leon L.F., Smith R.E.H., Hipsey M.R. et al. Application of a 3D hydrodynamicbiological model for seasonal and spatial dynamics of water quality and phytoplankton in Lake Erie // *J. Great Lakes Research*. 2011. V. 37, № 1. – P. 41–53.
 79. Livingstone D.M., Adrian R.L. Regional and Supra-Regional Coherence in Limnological Variables. The impact of climate change on European lakes (Ed. by Glen George). (*Aquatic ecology series*; 4) – Dordrecht; Heidelberg: Springer, 2010. – P. 311–337.
 80. MacKay M.D., Neale P.J., Arp C.D. Modeling lakes and reservoirs in the climate system. *Limnol. Oceanogr.*, 54 (6, part 2), 2009, 2315–2329.
 81. Madec G. and the NEMO team. NEMO ocean engine. Note du P^ole de mod^elisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No 27, ISSN No 1288-1619. version 3.4. 2012.
 82. Mellor G.L. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Princeton University, Princeton. USA. 1996. – 39 p.
 83. Mellor G.L., Blumberg A.F. Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system // *Mon. Wea. Rev.* 1985. 113. – P. 1380–1383.
 84. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parametrisation scheme Flake into numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Environ. Research*. 2010. 15. – P. 218–230.
 85. Mooij W.M., Trolle D., Jeppesen E. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approach // *Aquatic Ecology*. 2010. 44 (3). – P. 633–667.
 86. Noges P., Kangur K., Noges T. et al. Highlights of large lake research and management in Europe. In *European Large Lakes: Ecosystem Changes and Their Ecological and socioeconomic impact. Developments in Hydrobiology*. Dordrecht: Springer, 2008. – P. 259–276.
 87. Oveisy A., Boegman L., Imberger J. Three-dimensional simulation of lake and ice dynamics during winter // *Limnol. Oceanography*. 2012. 57, 1. – P. 43–57.
 88. Omstedt A. Process oriented numerical modeling in lakes, coastal seas and oceans. Univ. Gotheborg. http://www.oceanclimate/PROBE_0_Part1.pdf, Part 2, Part 3. 2008.
 89. Rukhovets L., Filatov N. (ed.) *Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modelling*. Chichestre. UK. Springer-Praxis, 2010. – 302 p.

90. *Simons T.S.* Verification of numerical models of Lake Ontario: III. Long-term heat transports // *J. Phys. Oceanogr.*, 1976. 6. – P. 372–378.
91. *Schindler D.W., Beaty K.G., Fee E.J., Cruikshank D.R., DeBruyn E.R., Findlay D.L., Linsey G.A., Shearer J.A., Stainton M.P. and Turner M.A.* (1990). Effects of Climate Warming on Lakes of the Central Boreal Forest. *Science*, 250 (4983), 967–970.
92. *Sheng J., Wright D., Greatbatch R., Dietrich D.* CANDIE: A new version of the DieCAST Ocean Circulation Model // *J. Atm. and Oceanic Tech.* 1998. 15. – P. 1414–1432.
93. *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 Sciences*. 08/2012; DOI:10.1007/s00027-012-0274-3.mn.
94. *Weitao Zhanga, Sue B. Watsona, Yerubandi R. Raoa, Hedy J. Klingc.* linked hydrodynamic, water quality and algal biomass model for a large, multi-basin lake: A working management tool. *Ecological Modelling* 269 (2013). 37–50.
95. *Vollenweider R.A.* Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters with Special Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication. Technical Report DA5/SCI/68.27, Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, 1968. 250 p.
96. *Zilitinkevich S.S., Kreiman K.D., Terzhevik A. Yu.* The thermal bar // *J. Fluid Mech.* 1992. 236. –P. 27–42.
97. *Zepu Zhang, Dmitry Beletsky, David J. Schwab and Michael L. Stein.* Assimilation of current measurements into a circulation model of Lake Michigan *WATER RESOURCES RESEARCH*. V. 43, W1. 1407. – 11 p. – DOI:10.1029/2006WR005818, 2007.