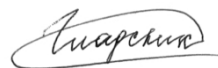


На правах рукописи



ГЛАДСКИХ Дарья Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
И БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВО ВНУТРЕННЕМ ВОДОЕМЕ
НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: Троицкая Юлия Игоревна, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Яковлев Николай Геннадьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение науки «Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук»;

Голосов Сергей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Институт озераведения Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт водных проблем Российской академии наук»

Защита состоится «3» октября 2022 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 при ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «23» июня 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Озера и водохранилища являются важнейшими элементами многих природных ландшафтов, определяя их уникальные особенности. Процессы, протекающие в них, представляют, с одной стороны, самостоятельный интерес в рамках задач гидрологии и экологии, а с другой – являются важным аспектом в глобальных задачах метеорологии и климатологии, таких, как изучение климата Земли и оценки его изменений. Вплоть до середины прошлого столетия лимнология (изучение озер) представляла собой сугубо описательную науку, и лишь во второй половине XX века произошел переход от описания отдельных характеристик водоемов суши к выяснению связей между элементами природных систем и исследованию механизмов, порождающих такие связи и возникающих в результате взаимодействий компонентов Земной системы на различных уровнях.

Процессы, протекающие во внутренних водоемах, требуют учета при разработке глобальных моделей (Ljungemyr et al., 1996; Tsuang et al., 2001). Помимо термогидродинамических характеристик, таких, как потоки тепла и влаги, в глобальных моделях необходима параметризация потоков химических веществ в атмосферу, среди которых особую роль играют растворенные газы, в частности, парниковые: метан и углекислый газ. Эти газы вносят вклад в увеличение парникового эффекта Земли и во многом определяют глобальный углеродный цикл (Zeli and Qianlai, 2015; Коротеев и др., 2009). Основной источник углекислого газа и метана – разложение органического вещества. Донные отложения содержат мертвый органический материал для переработки археями (*Archaea*, *Methanoarchaea*), побочным продуктом метаболизма которых является метан. Потребление метана микроорганизмами (метанотрофами) осуществляется за счет аэробных и анаэробных процессов. К аэробным процессам относится реакция окисления, в результате которой образуется углекислый газ, который потребляется водорослями и фитопланктоном в процессе фотосинтеза.

В мезомасштабных моделях критически важно корректное воспроизведение термогидродинамики озер и водохранилищ ввиду того факта, что подобные объекты являются особым типом подстилающей поверхности с точки зрения их взаимодействия с атмосферой.

Наконец, поскольку озера и водохранилища играют важную роль в жизнедеятельности населения в регионах, где они расположены, характеристики таких объектов и, в частности, мониторинг качества воды и биопродуктивности водоемов, представляют интерес в рамках локальных задач экологической проблематики.

Таким образом, влияние озер на климат и климата на озера охватывает различные пространственные и временные масштабы: как сезонные и регио-

нальные, так и глобальные. Именно поэтому необходимо численное исследование термогидродинамики и биохимии водоемов суши как важнейшего компонента Земной системы.

Цели и задачи диссертации

Основной целью настоящей работы является численное исследование и разработка корректного описания гидрологических, термогидродинамических и биогеохимических процессов водоемов суши путем реализации новых физико-математических моделей и модификации существующих.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- теоретическое исследование основных физических процессов, формирующих гидрологические и биогеохимические характеристики водоемов; определение наиболее эффективных подходов и методов математического моделирования озер и водохранилищ;

- проверка гипотезы о влиянии плотностной стратификации и сдвига скорости на процессы турбулентного перемешивания и формирования вертикальной структуры течения водного объекта: численные эксперименты и вывод закономерностей;

- численное исследование вертикальной термической структуры типичного внутреннего водоема среднего размера на примере озерной части Горьковского водохранилища с применением одномерной модели LAKE, разработка и оценка применимости процедур задания скорости ветра, как ключевого фактора, инициирующего перемешивание;

- вывод, внедрение и верификация параметризации, позволяющей учитывать особенности мелкомасштабной турбулентности во внутреннем водоеме и снимающей ограничение на существование турбулентности при больших значениях градиентного числа Ричардсона, модификация стандартного двух-параметрического k - ϵ -замыкания с учетом предлагаемой параметризации, исследование влияния модификации на моделирование турбулентного переноса импульса, энергии, температуры и пассивных субстанций во внутренних водоемах;

- определение характеристик ледяного покрова крупных озер и водохранилищ на основе данных дистанционного зондирования;

- разработка трехмерной модели биогеохимических процессов во внутреннем водоеме, включающей описание генерации, переноса и стока различных субстанций, в т.ч. парниковых газов и растворенного и твердого углерода.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан комплексный подход к численному исследованию гидрологических, термогидродинамических и биогеохимических характеристик

внутреннего водоема, основанный на объединении существующих, модифицированных и разработанных методов и моделей;

2. Модернизирована стандартная k - ϵ схема турбулентного перемешивания, что позволило учесть вклад в мелкомасштабную турбулентность внутреннего водоема стратификации и сдвига скорости;

3. Предложен метод, позволяющий провести анализ климатических трендов, связанных с сезонностью ледяного покрова водоемов Русской равнины, за последние 25 лет, и явным образом продемонстрировавший тенденцию к сокращению времени ледостава;

4. Разработана и создана трехмерная модель биогеохимических процессов внутреннего водоема, объединенная в программный комплекс с моделью термогидродинамики озера и позволяющая решать задачи диагностики и прогноза эмиссий парниковых газов и уточнения роли водоемов в изменении климата.

Научная и практическая значимость результатов работы

Полученные в работе результаты планируются к применению для дальнейшего изучения термогидродинамических и биогеохимических процессов во внутренних водоемах. Уточненный подход к описанию мелкомасштабной турбулентности может быть также применен к задачам, связанным с исследованиями турбулентности в океане и атмосфере. Разработанные методики задания скорости ветра на основе данных глобального реанализа и дистанционного зондирования представляют интерес для моделирования и прогнозирования процессов, связанных с взаимодействием атмосферы и гидросферы. Также в задачах численного исследования озер и водохранилищ на годовых и многолетних масштабах может эффективно применяться предложенный алгоритм определения ледовых характеристик. Разработанная автором модель биогеохимических процессов позволяет получить полные трехмерные поля концентраций растворенных в воде веществ, а также дать оценки как вертикальной, так и горизонтальной изменчивости потоков парниковых газов, что необходимо для параметризаций водоемов суши в глобальных моделях, направленных на исследование климата Земли и механизмов его формирования. Таким образом, научная и практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью их непосредственного использования для решения как фундаментальных, так прикладных задач гидрологии, экологии, и климатологии.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов моделирования и численных экспериментов базируется на корректном применении математических методов и подтверждается согласованностью полученных результатов с известными аналитическими и экспериментальными данными, в т.ч. полученными при участии автора в ходе экспедиционных работ на полигоне Горьковского водохранили-

ща. Физическая трактовка полученных результатов, находится в согласии с общепризнанными представлениями. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях и неоднократно обсуждались на семинарах в ИПФ РАН и НИВЦ МГУ.

Положения, выносимые на защиту

1. Одномерная модель термогидродинамики замкнутого водоема достаточно точно воспроизводит эволюцию вертикальной термической структуры внутреннего водоема среднего размера на масштабе порядка сезона (весь период открытой воды) с учетом уточненного описания ветрового воздействия на процессы перемешивания и применением данных глобального метеорологического реанализа.

2. Применение предложенной, разработанной и реализованной модификации двухпараметрического $k-\epsilon$ замыкания позволяет уточнить вклад сдвига скорости и стратификации в мелкомасштабную турбулентность внутреннего водоема и эффективно описывать турбулентный перенос импульса и скалярных субстанций через термоклин.

3. Ледовые характеристики крупных и средних озер и водохранилищ, а также временные рамки установления и вскрытия льда могут быть эффективно определены с использованием результатов анализа разностей яркостной температуры, полученных из данных дистанционного зондирования.

4. Предложенная, разработанная и реализованная трехмерная модель генерации, переноса и стока биогеохимических примесей в водоемах суши (дополняющая модель термогидродинамики замкнутого водного объекта) позволяет получить полные трехмерные поля концентраций растворенных в воде веществ и потоков в атмосфере.

Апробация результатов работы

Диссертационная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты диссертации были использованы в ходе исследовательских работ в рамках грантов РФФИ, РФФИ, проектов в рамках Федеральных целевых программ Минобрнауки, грантов Президента Российской Федерации, проекта Фонда содействия инновациям.

Материалы диссертации были представлены:

- на международных конференциях: International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, NRU NSE, Moscow, 2017, 2018; European Geosciences Union General Assembly, Вена, Австрия, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022; European Meteorological Society Annual Meeting, Копенгаген, Дания, 2019; 19-я международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях», ТОИ ДВО РАН, Владивосток, 2018; Международная школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов геосредах»,

ИПМех РАН, Москва, 2017, 2018, 2019, 2020; International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2020, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, 2020; Международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2021, Москва, 2021.

- на российских конференциях: Всероссийская научная конференция «Проблемы экологии Волжского бассейна», ВГУВТ, Нижний Новгород, 2017, 2018; Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития», Санкт-Петербург, 2017; Школа молодых ученых «Нелинейные волны», Нижний Новгород, 2018, 2020; III научная конференция молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана», Санкт-Петербург, 2018; Всероссийская конференция «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения», Нижний Новгород, 2019.

- на семинарах ИПФ РАН и НИВЦ МГУ.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертации получены автором лично либо при непосредственном участии: проведены и реализованы в программном коде модификации турбулентного замыкания, получены новые теоретические зависимости, разработаны и реализованы алгоритмы, сконструирован новый численный метод, поставлены и проведены численные эксперименты, разработана и программно реализована трехмерная модель биогеохимии водоема. Также автор принимал участие в экспедиционных работах, в ходе которых были получены натурные данные, использованные в настоящей диссертации.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка основных работ автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 120 страниц, включая 42 иллюстрации и 2 таблицы. Список литературы включает 173 источника.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и задачи, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** приводится обзор современного состояния рассматриваемой проблемы исследования термогидродинамики и биогеохимии водоемов суши.

В **разделе 1.1** приведена иерархия моделей описания термогидродинамических процессов, протекающих во внутренних водоемах, указаны основные

преимущества и недостатки моделей различной пространственной детализации, а также основные сферы их применения. Раздел 1.2 посвящен обзору подходов к описанию турбулентности в водных объектах с точки зрения детальности разрешения турбулентных пульсаций и их энергетического спектра; здесь же рассмотрены наиболее широко применяемые турбулентные замыкания: так называемые k -схемы, к которым относится модель k - ϵ , в основе которой лежат уравнения для кинетической энергии турбулентности (k) и скорости ее диссипации (ϵ); приведены обоснования необходимости модификации этой схемы для исследования особенностей мелкомасштабных процессов при больших значениях градиентного числа Ричардсона. В разделе 1.3 представлены методики изучения ледового режима внутренних водоемов, среди которых наиболее популярными являются методы спутниковой альтиметрии и радиометрии. В разделе 1.4 описаны существующие в настоящее время модели описания биогеохимических процессов в озерах и водохранилищах, подходы, используемые в этих моделях, их преимущества и недостатки. Раздел 1.5 включает выводы по современному состоянию проблемы исследования термогидродинамических и биогеохимических процессов в водоемах суши как факторов, влияющих на формирование и изменение климата, которые и были рассмотрены автором в диссертационной работе.

Глава 2 посвящена численному исследованию эволюции вертикальной термической структуры замкнутого пресного водоема среднего размера на примере озерной части Горьковского водохранилища с применением одномерной модели LAKE (Степаненко, 2005).

В разделе 2.1 приводится краткое описание модели, обосновывается выбор объекта исследования, обозначаются основные проблемы, связанные с реалистичным заданием данных сопутствующей метеорологической обстановки и, в частности, скорости ветра, как важнейшего фактора, влияющего на перемешивание во внутренних водоемах. Решение этой проблемы предлагается в разделе 2.2: здесь представлены три методики процедуры задания скорости ветра: комбинированный метод, основанный на использовании данных реанализа и отдельных измерений; восстановление поля скоростей ветра с помощью данных дистанционного зондирования и геофизической модельной функции; привлечение атмосферной модели.

В разделе 2.3 приведены результаты численного моделирования вертикального распределения температуры Горьковского водохранилища, сопоставление этих результатов с данными натурных измерений, сделаны выводы о применимости методики и перспективах ее совершенствования. Для оценки численных результатов были последовательно проанализированы рассчитанные и измеренные значения температуры в контрольных точках (на разных горизонтах глубины, рис. 1), а также формы профилей распределения температуры для характерных случаев и среднеквадратическое отклонение численных результатов от данных измерений.

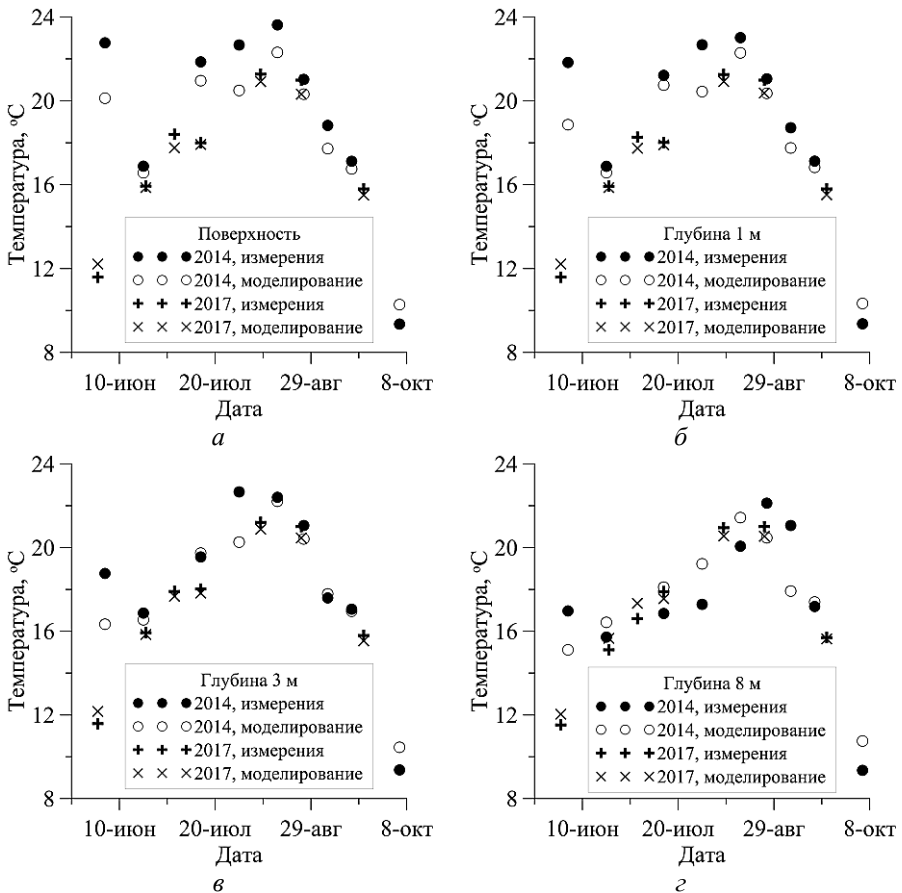


Рис. 1. Сравнение измеренных и рассчитанных значений температуры на различных горизонтах глубины: (а) поверхность, (б) 1 м, (в) 3 м, (г) 8 м

Рисунок 1 подтверждает большую изменчивость и сложность физических процессов в эпилимнионе и металимнионе, обусловленных, в первую очередь, ветроволновым взаимодействием.

Если перейти к сравнению форм профилей для характерных случаев в обоих сезонах (рис. 2), то видно, что расчеты хорошо не только качественно, но и количественно воспроизводят натурные данные. Однако наилучшего совпадения удалось достичь для режимов сильного перемешивания, часто наблюдавшихся в 2017 г., по сравнению с сильной стратификацией, характерной для 2014 г., где существуют количественные различия (в значениях температуры) между рассчитанными и натурными данными.

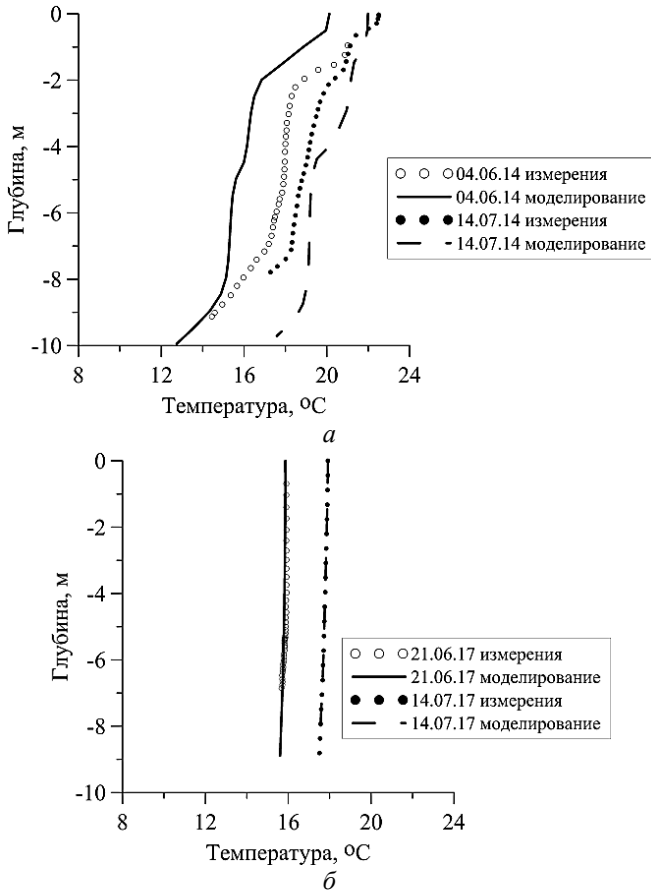


Рис. 2. Сравнение форм измеренных и рассчитанных профилей вертикального распределения температуры: *а* – стратифицированные профили 2014 г., *б* – перемешанные профили 2017 г.

Для интегральной характеристики согласия натуральных данных и расчетов использовалось среднее квадратичное отклонение по температуре по всему ансамблю реализаций. Оно оказалось равным примерно 1 °C для 2014 г., а для 2017 г. — 0,4 °C, что подтверждает повышение точности расчетов по сравнению с использованием исходной версии модели LAKE 1.0 (Степаненко, 2005), которая демонстрировала среднее квадратическое отклонение около 2–3 °C в обоих случаях. Есть основания полагать, что полученное улучшение результатов обусловлено реалистичным заданием начальных условий.

Следует отметить, что сильное перемешивание и менее интенсивная солнечная радиация в 2017 г. препятствовали установлению стратификации по

сравнению с 2014 г, что демонстрирует широкий диапазон изменения термического режима в зависимости от сезонных условий.

В [разделе 2.4](#) приводятся выводы ко второй главе. Можно заключить, что одномерная модель термогидродинамики количественно воспроизводит основные особенности эволюции вертикальной термической структуры внутреннего водоема среднего размера на масштабе порядка сезона (весь период открытой воды) с учетом уточненного описания ветрового воздействия на процессы перемешивания и применением данных глобального метеорологического реанализа.

В [Главе 3](#) рассматривается задача корректного описания турбулентности в устойчиво стратифицированной жидкости, и предложена модифицированная модель турбулентного переноса, сконструированная на основе k - ϵ -замыкания с привлечением моделей, учитывающих двустороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергии турбулентных пульсаций.

Основные положения таких моделей приведены в [разделе 3.1](#): рассмотрены модель нестационарных турбулентных течений в стратифицированной жидкости Л.А. Островского и Ю.И. Троицкой (Островский и Троицкая, 1987), построенная на решении уравнения для функции распределения вероятности значений гидрофизических полей, и эквивалентная ей модель С.С. Зилитинкевича (Zilitinkevich et al. 2007; Zilitinkevich et al. 2013), в основе которой лежат балансные уравнения для энергий и потоков. Эти модели позволяют снять ограничения на существование турбулентности при больших числах Ричардсона, при этом зависимости $Pr_T(Ri)$ в EFB-closure С.С. Зилитинкевича и в работе Л.А. Островского и Ю.И. Троицкой эквивалентны.

В [разделе 3.2](#) приведена процедура получения параметризации турбулентного числа Прандтля как функциональной зависимости от градиентного числа Ричардсона, где R – параметр анизотропии, характеризующий соотношение вертикального и горизонтального масштабов корреляции поля плотности:

$$Pr_T(Ri) = \frac{(4 - 3R) Ri + 1 + \left(((4 - 3R) Ri + 1)^2 - 4Ri \right)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (1)$$

Полученная зависимость позволила модифицировать k - ϵ схему с целью учета вклада сдвига скорости и плотностной стратификации в турбулентность и снять ограничение на описание турбулентности при больших значениях градиентного числа Ричардсона.

Численные эксперименты для оценки влияния параметризации на процессы перемешивания представлены в [разделе 3.3](#). Для оценки влияния предложенной параметризации на описание процессов перемешивания во внутренних водоемах использовалась трехмерная численная модель термогидродинамики, основой которой является осредненная по Рейнольдсу система уравнений в приближении Буссинеска и гидростатики (Mortikov, 2016; Mortikov et al., 2019; Гладских и др., 2021), где для расчета коэффициентов вертикально-

го турбулентного обмена используется k - ϵ -замыкание. Были рассмотрены две конфигурации модели: идеализированная постановка (водоем с прямоугольным сечением, постоянной скоростью и направлением ветра, пренебрежение эффектами коротковолновой радиации) и конфигурация модели для финского озера Куйваярви. В обоих случаях сравнивались результаты, полученные при использовании стандартного замыкания (где турбулентное число Прандтля было задано постоянным) и модифицированного (где использовалось выражение (1)). На рис. 3 показаны профили кинетической энергии турбулентности в различные дни расчета в идеализированной постановке, а на рис. 4 – в постановке с привлечением натуральных данных озера Куйваярви (через 1 расчетные сутки после начала численного эксперимента).

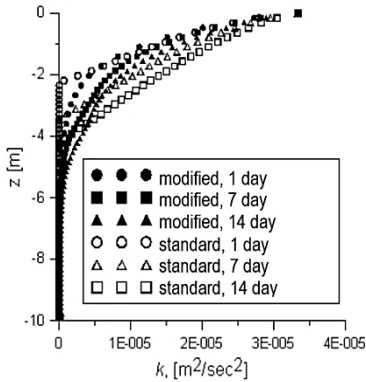


Рис. 3. Вертикальное распределение кинетической энергии турбулентности в разные дни расчета с помощью стандартной и модифицированной схем перемешивания в численном эксперименте с идеализированной постановкой

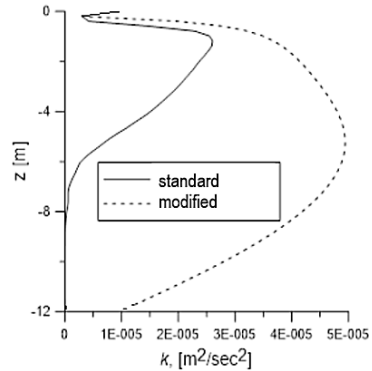


Рис. 4. Вертикальное распределение кинетической энергии турбулентности в зависимости от схемы перемешивания в численном эксперименте с привлечением натуральных данных озера Куйваярви

Рисунки демонстрируют, что учет параметризации приводит к сглаживанию всех резких изменений в вертикальных распределениях турбулентной кинетической энергии, градиента температуры и толщины слоя скачка. Полученные результаты связаны с особенностями параметризации, из которой следует существование турбулентности при значениях $Ri \gg 1$ и отсутствие эффекта «срыва» турбулентности. Также можно наблюдать, что в стандартной модели турбулентность ниже термоклина подавлялась силами плавучести, а молекулярной диффузии было недостаточно для переноса через термоклин. В то же время для модернизированной модели, учитывающей рост числа Прандтля за счет роста коэффициента турбулентного переноса при больших значениях Ri , перенос энергии через термоклин существовал.

В разделе 3.4 приводятся выводы ко второй главе. Показана принципиальная роль параметризации при расчете термодинамики водоема в условиях устойчивой стратификации.

Глава 4 посвящена исследованию сезонности ледяного покрова крупных озер и водохранилищ Русской равнины и климатических трендов по данным спутников JASON-1,2,3, TOPEX/Poseidon и SARAL.

Для моделирования и прогнозирования гидрологических характеристик внутренних водоемов, например, термического режима, необходима процедура задания стартового распределения, эволюция которого будет исследоваться с помощью математических моделей. Подобные данные могут быть получены экспериментально, либо на основе предположения о том, что в большинстве средних и крупных водоемов средней полосы России температура воды постоянна по всей глубине и равна 4 °С. При этом остается открытым вопрос определения конкретных временных рамок установления периода открытой воды.

В разделе 4.1 предложен и описан алгоритм выявления периодов ледостава и открытой воды из анализа яркостных температур, полученных по данным дистанционного зондирования. В основе метода лежит эффект значительного отличия диэлектрических констант и излучательной способности твердой поверхности (почвы, снега, льда) и открытой воды, вызывающий значительные вариации яркостной температуры (интенсивности принимаемого излучения) вдоль трека, проходящего над водным объектом (рис. 5). Даты смены ледового режима выражены как резкие скачки разности между максимальным и минимальным значением яркостной температуры (рис. 6).

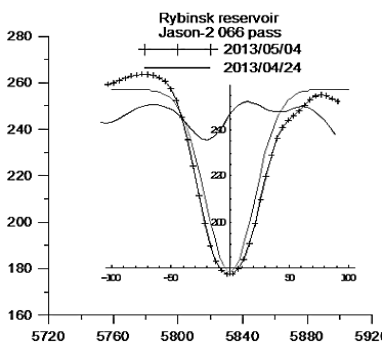


Рис. 5. Изменение яркостной температуры вдоль трека Jason-2, пересекающего Рыбинское водохранилище. Светло-серой линией обозначен аналитический результат, полученный с помощью алгоритма

Эффективность алгоритма подтверждается в разделе 4.2 путем сопоставления результатов расчетов ледовых характеристик с натурными данными Российского Регистра Гидротехнических Сооружений. Были выбраны объекты, для которых длины треков, проходящих по акватории водоема, превосходят 10 км (в 2 раза превышает шаг зондирования). В

перечень вошли: Кумское водохранилище, Онежское озеро, Ладожское озеро, Чудское озеро, Камское водохранилище, Рыбинское водохранилище, Куйбышевское водохранилище, Горьковское водохранилище, Шекснинское водохранилище, озера: Нюк, Кожозеро, Сегозеро, Эндозеро, Тулос, Ондозеро, Выгозеро.

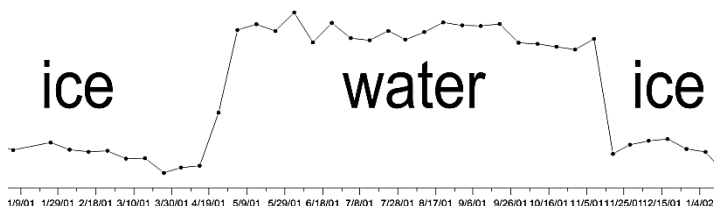


Рис. 6. Разность яркостной температуры суши и воды по данным спутников для Рыбинского водохранилища

Для анализа использовались точки трека, лежащие внутри определенных границ, а также по две точки за границей с каждой стороны. При этом рассчитывалась разность между максимальным и минимальным значением яркостных температур для каждого зондирования из архива, содержащего данные с 1992 по 2017 гг. (с 1992 по 2002 использовались данные полученные Торех/Poseidon, с 2002 по 2017 – данные Jason 1, 2, 3; дополненные с 2013 года данными SARAL).

Информация, полученная с помощью расчетов, была сопоставлена с данными гидропостов. Были получены следующие выражения для линейных трендов продолжительности ледостава, например:

для Горьковского водохранилища: $Y_{ice} = -0.9 \cdot X + 1952.91$; 95% доверительный интервал (-1.56; -0.23);

для Куйбышевского водохранилища: $Y_{ice} = -1.27 \cdot X + 2692.01$; 95% доверительный интервал (-1.96; -0.58);

Таким образом, с использованием данных спутникового дистанционного зондирования показано наличие климатического тренда к более позднему замерзанию, более раннему вскрытию льда, и, тем самым, сокращению периода ледостава за последние 25 лет (рис. 7).

В **Главе 5** представлена разработанная автором трехмерная модель генерации, переноса и стока биогеохимических примесей в водоемах суши, дополняющая модель термогидродинамики замкнутого водного объекта.

В **разделе 5.1** приведены краткие сведения о биогеохимии парниковых газов: метана и углекислого газа, которые представляют наибольший интерес с учетом их определяющего вклада в изменение климата Земли. Описаны наиболее существенные для внутренних водоемов механизмы образования и потребления метана, даны оценки эмиссий парниковых газов с пресноводных экосистем.

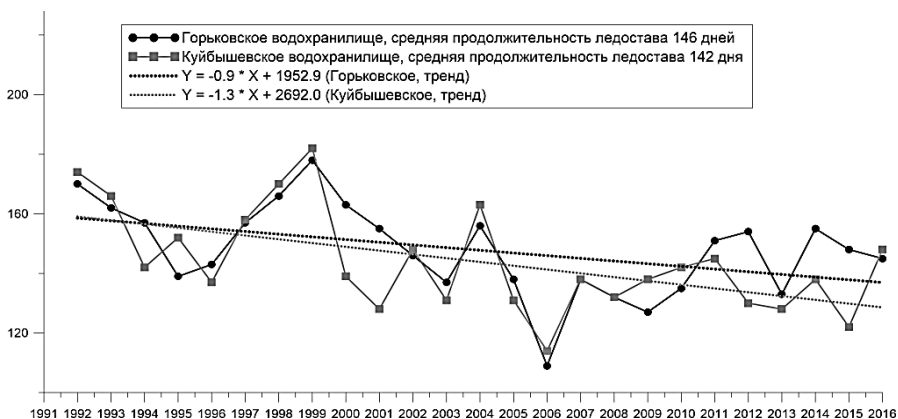


Рис. 7. Продолжительность периода ледостава в днях для двух водных объектов по данным расчетов разностей яркостных температур и линии трендов

Раздел 5.2 дает представление об основных уравнениях для описания механизмов переноса, диффузии и взаимодействия биогеохимических субстанций и уравнениях термогидродинамики замкнутого водоема, которые объединены в программный комплекс. В параграфе 5.2.1 приведена RANS-модель (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) термогидродинамики, а в параграфе 5.2.2 – общий вид уравнения переноса, диффузии и реакций: Уравнения описывают перенос, диффузию и реакции для таких веществ как: метан (CH_4), кислород (O_2), углекислый газ (CO_2), живые и отмершие частицы фито- и зоопланктона и т.д., и имеют вид:

$$\frac{\partial C_{(.)}}{\partial t} + \left[\frac{\partial u_i C_{(.)}}{\partial x_i} + \frac{\partial w C_{(.)}}{\partial z} \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_b + \chi_b) \frac{\partial C_{(.)}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial z} (K_b + \chi_b) \frac{\partial C_{(.)}}{\partial z} \right] + R(.), \quad (2)$$

где $C_{(.)}$ – концентрации веществ, K_b и χ_b – коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии соответственно, а член $R(.)$ описывает сколько молекул того или иного вещества было добавлено к раствору или извлечено из него в результате реакций (азробное окисление метана в водной толще; фотосинтез; дыхание; биохимическое потребление кислорода в водной толще и донных отложениях; отмирание фито- и зоопланктона. В параграфе 5.2.3 приведено описание газообмена с атмосферой, реализованное в модели: использовалась модель обновления поверхности (Heiskanen et al., 2014), основанная на гипотезе, что скорость газообмена между водой и атмосферой определяется скоростью поступления порций растворенного газа к поверхности воды из толщи перемешанного слоя за счет турбулентных вихрей. В параграфе 5.2.4 приведены примеры реакций в формулировке кинетики Михаэлиса-Ментен (Michaelis and Menten, 1913) – уравнения ферментативной кинетики, описывающего зависимость скорости реакции, катализируемой ферментом,

от концентрации субстрата. Верификация разработанной модели описана в **разделе 5.3**: она проводилась на основе сопоставления с одномерной моделью LAKE 3.0 (Степаненко, 2018), верифицированной на основе данных измерений, и учета физических эффектов, связанных с трехмерным описанием, используемым в предлагаемой автором модели. С помощью численной реализации классического лабораторного эксперимента Като-Филлипса, дополненной граничными условиями для растворенных газов, подтверждено, что в отсутствие эффектов, связанных с трехмерной циркуляцией, термогидродинамика и биогеохимия воспроизводятся в моделях схожим образом (рис. 8).

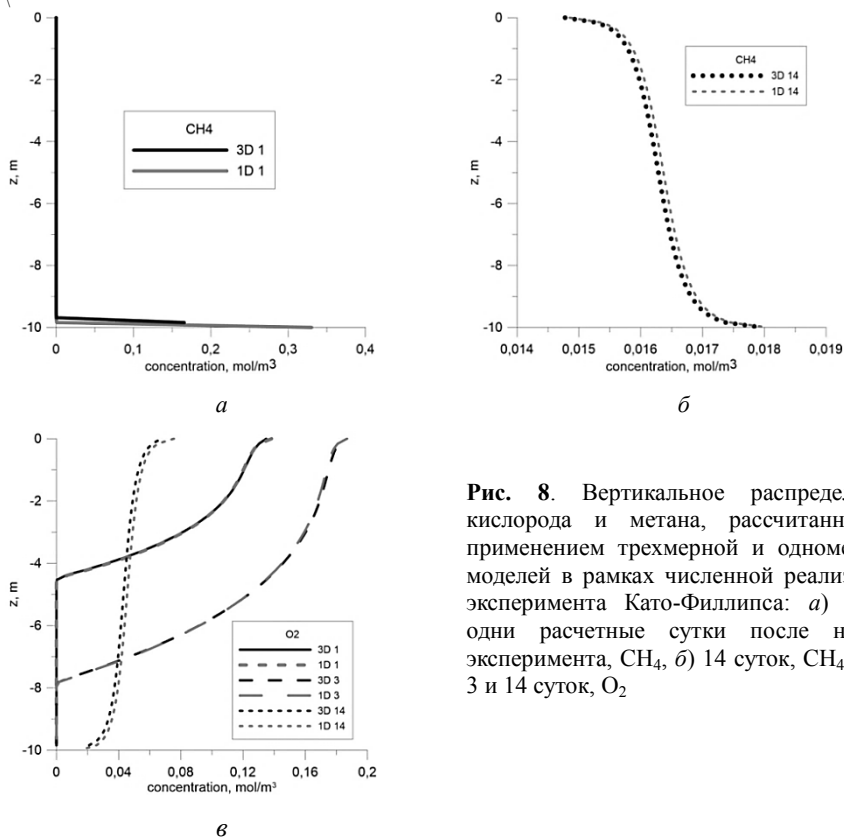


Рис. 8. Вертикальное распределение кислорода и метана, рассчитанное с применением трехмерной и одномерной моделей в рамках численной реализации эксперимента Като-Филлипса: *а*) через одни расчетные сутки после начала эксперимента, CH_4 , *б*) 14 суток, CH_4 , *в*) 1, 3 и 14 суток, O_2

Серия численных экспериментов для идеализированных водоемов при наличии вертикальных стенок подтвердила, что трехмерное описание корректирует недостатки одномерного подхода, связанные с описанием вертикальной диффузии газов, генерации турбулентной кинетической энергии в термоклине (достаточной для того, чтобы коэффициент турбулентной диффузии за-

метно превышал молекулярный аналог) и эффектов, связанных с перераспределением массы и горизонтального градиента давления под влиянием ветрового нагона. В частности, одномерная модель занижает глубину верхнего перемешанного слоя водоема по сравнению с трехмерной моделью за счет того, что не воспроизводит вертикальные циркуляции, переносящие импульс между границами верхнего перемешанного слоя. В трехмерной же модели такой перенос описывается и приводит к усилению сдвига скорости, более быстрому росту толщины перемешанного слоя и насыщению этого слоя кислородом.

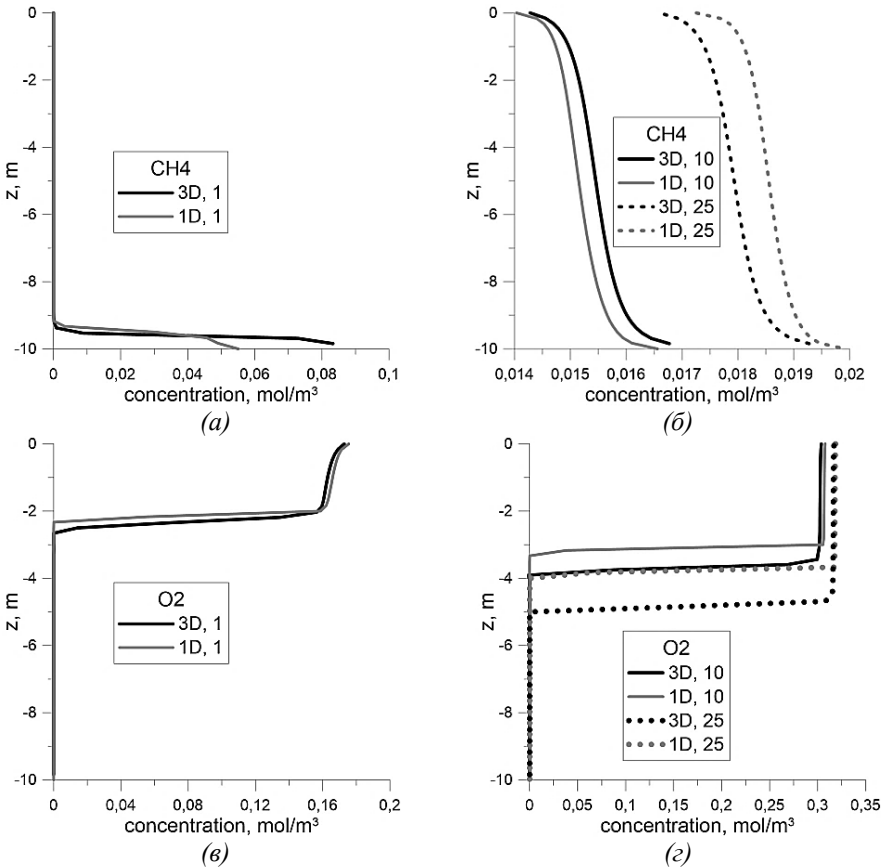


Рис. 9. Вертикальное распределение кислорода и метана, рассчитанное с применением трехмерной и одномерной моделей в рамках численной реализации идеализированного водоема конечных размеров: *а)* через одни расчетные сутки после начала эксперимента, CH_4 , *б)* 10 и 25 суток, CH_4 , *в)* 1 сутки, O_2 , *г)* 10 и 25 суток, O_2

Также приведены результаты численных экспериментов, направленных на исследование влияния различных конфигураций рельефа дна на распределение примесей в толще водоема. Показано, что распределение по вертикали, так и по горизонтали, является неоднородным, вследствие распределения источников на наклонном дне (рис. 10).

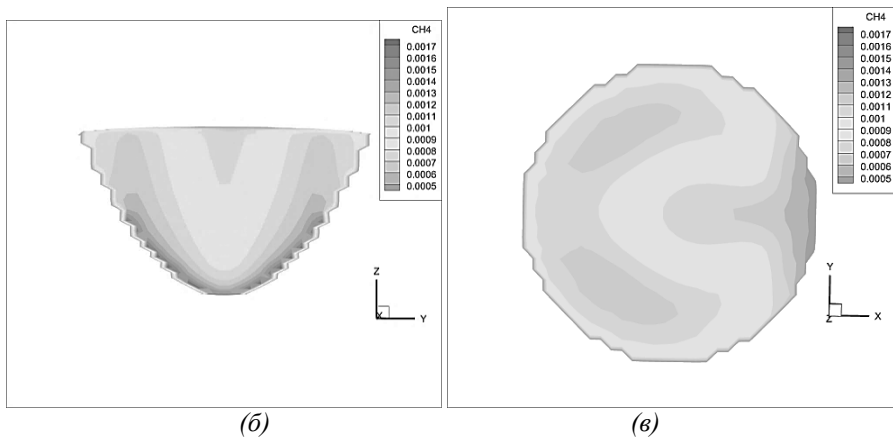
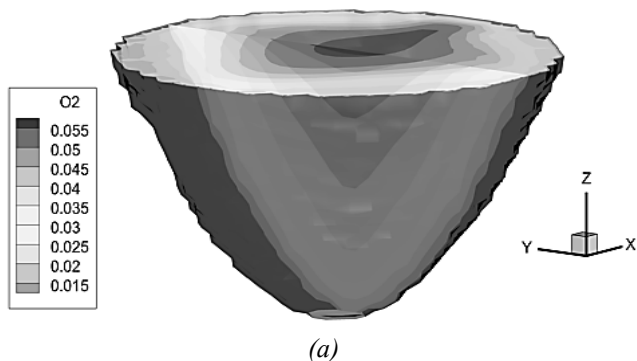


Рис. 10. Распределение концентрации метана (a) и кислорода (б) в численном эксперименте с параболической формой дна и постоянным потоком импульса

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе результатов численного исследования с применением одномерной модели LAKE, данных глобального метеорологического реанализа и уточненного описания ветрового воздействия на процессы перемешивания показано, что одномерная модель количественно воспроизводит основные особенности эволюции вертикальной термической структуры внутреннего водоема среднего размера на масштабе порядка сезона (весь период открытой воды).

2. Предложена, разработана и программно реализована модификация k - ϵ -схемы перемешивания, позволяющая уточнить влияние плотностной стратификации и сдвига скорости на турбулентный перенос импульса и скалярных субстанций в толще воды, в частности, через термоклин. Использование параметризации позволило показать существование турбулентности при значениях градиентного числа Ричардсона выше критического. Подтверждена принципиальная роль предложенной модификации замыкания при расчете термодинамики водоема в условиях сформировавшегося термоклина.

3. Для исследований времени замерзания и вскрытия внутренних водоемов, а также продолжительности ледостава, предложена методика анализа данных пассивного микроволнового зондирования, производимого с помощью инструментов, размещенных на спутниках Jason 1,2,3, Topex/Poseidon и SARAL. В основе методики лежит расчет разности яркостных температур вдоль трека, пересекающего водоем. Продемонстрировано наличие климатического тренда к более позднему замерзанию и более раннему вскрытию льда и, как следствие, сокращению времени ледостава на 10–15 суток за 25 лет.

4. Предложена, разработана и реализована трехмерная модель генерации, переноса и стока биогеохимических примесей (растворенных газов и твердого углерода) в водоемах суши, дополняющая модель термогидродинамики замкнутого водного объекта. Модель позволяет воспроизвести концентрации примесей и потоки газов в атмосферу, в том числе, с учетом горизонтальной изменчивости, и ее использование даст возможность уточнить оценки вклада озер и водохранилищ в глобальный углеродный цикл Земли.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heiskanen, J. J., Mammarella Ivan, Haapanala Sami, Pumpanen Jukka, Vesala Timo, MacIntyre Sally, Ojala Anne. Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake // *Tellus B.* — 2014. — Vol. 66.

3. Ljungemyr P., Gustafsson N., Omstedt A. Parameterization of lake thermodynamics in a high-resolution weather forecasting model // *Tellus A.* — 1996. — V. 48. — P. 608-621.

4. Michaelis L., Menten M. L. Die kinetik der invertinwirkung // *Biochem. z.* — 1913. — T. 49. — №. 333—369. — С. 352.

5. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2016. – V. 52. – P. 108-115.
6. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* – 2019. – V. 34, № 2. – P.1-14
7. Tsuang B.-J., C.-J. Tu, and K. Arpe. Lake parameterization for climate models. – Report No. 316. – Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 2001. – 72 pp.
8. Zeli T., Qianlai Z. Arctic lakes are continuous methane sources to the atmosphere under warming conditions // *Environmental Research Letters.* – 2015. – Vol. 10, no. 5. – P. 054016.
9. Zilitinkevich, S.S., Elperin, T., Kleerorin, N., and Rogachevskii, I. Energy- and Flux-Budget (EFB) turbulence closure models for stably-stratified flows. Part I: Steady-state, homogeneous regimes // *Boundary-Layer Meteorol.* – 2007. – vol. 125. – P. 167–191.
10. Zilitinkevich, S.S., Elperin, T., Kleerorin, N., Rogachevskii, I., and Esau, I. A hierarchy of Energy and Flux-Budget (EFB) turbulence closure models for stably stratified geophysical flow // *Boundary-Layer Meteorol.* – 2013. – vol. 146. – P. 341–373.
11. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.М. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. // *Водные ресурсы.* – 2021. – Т. 48. № 2. – С. 155-163.
12. Коротеев М.П., Ульбаев Т.С., Артамонова И.М. Роль метана в парниковом эффекте // *Природообустройство.* – 2009. – № 1. – С. 44-49.
13. Островский Л.А., Троицкая Ю.И. Модель турбулентного переноса и динамика турбулентности в стратифицированном сдвиговом потоке // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* – 1987. – № 3. – С. 1031-104.
14. Степаненко В.М. Математическое моделирование теплового режима и динамики парниковых газов в водоёмах суши. Дисс. На соиск. уч. ст. д.ф.-м.н. – 2018. – 361 с.
15. Степаненко В.М. Численное моделирование термического режима мелких водоемов // *Вычислительные технологии.* – 2005. – Т.10, ч.1. – С.100-106.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гладских Д. С., Сергеев Д. А., Байдаков Г. А., Соустова И. А., Троицкая Ю. И. О численном моделировании термических режимов внутренних водоемов с использованием экспериментальных данных // *Процессы в гео-средах.* – 2017. – № 3 (17). – С. 210 - 211.

2. Гладских Д.С., Соустова И.А., Троицкая Ю.И., Мортиков Е.В. О влиянии стратификации и сдвига на турбулентное перемешивание во внутренних водоемах // *Процессы в геосредах*. 2019. № 4 (22). С. 459 - 465.
3. Сергеев Д. А., Гладских Д. С., Байдаков Г. А., Соустова И. А., Троицкая Ю. И. О моделировании термического режима внутренних водоемов с использованием данных глобального метеорологического реанализа на примере Горьковского водохранилища // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 4, с. 104 – 112.
4. Гладских Д. С., Мортиков Е. В., Степаненко В. М. Численное моделирование вертикального переноса биохимических примесей во внутренних водоемах // *Процессы в геосредах*. — 2020. — Т. 26, № 4. — С. 885–891. (ВАК)
5. Соустова, И. А., Троицкая, Ю. И., Гладских, Д. С., Мортиков, Е. В., и Сергеев, Д. А. Простое описание турбулентного переноса в стратифицированном сдвиговом потоке применительно к описанию термогидродинамики внутренних водоемов // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. – 2020. - Т.56, № 6. – С. 689–699.
6. Гладских Д. С., Степаненко В. М., Мортиков Е. В. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя // *Водные ресурсы*. — 2021. — Т. 48, № 2. — С. 155–163.
7. Ivanov, A.V., Troitskaya, Y.I., Sergeev, D.A., Baydakov, G.A., Gladskikh, D.S. Model development for online monitoring of water quality in the lake type reservoir // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. – 2017. – 17(33). – С. 259–266.
8. Gladskikh, D., Sergeev, D., Baydakov, G., Soustova, I., Troitskaya, Y. The Problem of Forecasting of Vertical Temperature Distribution in Inland Hydrophysical Objects with Experimental Data // In: Karev, V., Klimov, D., Pokazeev, K. (eds) *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. PMMEP 2017*. – Springer Geology. Springer, Cham. – 2018.
9. Gladskikh, D., Sergeev, D., Baydakov, G., Soustova, I., Troitskaya, Yu. Numerical modeling of thermal regime in inland water bodies with field measurement data // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Volume 955. – P.012019.
10. Gladskikh, D. S.; Soustova, I. A.; Troitskaya, Yu I.; Zilitinkevich, S. S.; Sergeev, D. A simple description of turbulent transport in a stratified shear flow devoted to the simulation of thermohydrodynamics of inland waters // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Volume 1163. – P. 012033.
11. Gladskikh, D.S., Mortikov, E.V., Stepanenko, V.M. Numerical simulation of turbulent mixing and transport of biochemical substances in inland waters // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – 611(1). – P. 012013.

12. Gladskikh D., Soustova I., Troitskaya Y., Mortikov E. On the Influence of Stratification and Shear on the Turbulent Mixing in Inland Waters // In: Chaplina T. (eds) Processes in GeoMedia – Volume II. Springer Geology. Springer, Cham. – 2021.
13. Gladskikh D., Stepanenko V., Mortikov E. On the Factors Affecting Mixed Layer Depth in the Inland Water Objects // In: Chaplina T. (eds) Processes in GeoMedia – Volume II. Springer Geology. Springer, Cham. – 2021.
14. Gladskikh, D. S., Kuznetsova, A. M., Baydakov, G. A., and Troitskaya, Y. I. Numerical Simulation of the Thermal Regime of Inland Water Bodies Using the Coupled WRF and LAKE Models // In Processes in GeoMedia. Springer, Cham. – 2021. –Volume IV —P. 317-325.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Обзор современного состояния описания термогидродинамики и биохимии внутренних водоемов

- 1.1 Иерархия моделей термогидродинамики водоемов суши
- 1.2 Описание турбулентного перемешивания в озерах и водохранилищах
- 1.3 Ледовые характеристики водоемов суши и их исследование
- 1.4 Биогеохимические процессы во внутренних водоемах
- 1.5. Выводы по современному состоянию проблемы.

Глава 2. Исследование вертикальной термической структуры внутреннего водоема на примере Горьковского водохранилища

- 2.1. Краткое описание модели озера LAKE
- 2.2. Процедура задания скорости ветра как важнейшего фактора перемешивания
- 2.3. Численное моделирование сезонных вариаций вертикальной термической структуры Горьковского водохранилища
- 2.4. Выводы по Главе 2

Глава 3. Модификация стандартного k - ϵ замыкания для описания турбулентности в стратифицированной жидкости и ее применение к моделированию термогидродинамики внутренних водоемов

- 3.1. Основные положения моделей турбулентности, учитывающих двустороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергий турбулентных пульсаций
- 3.2. Процедура получения параметризации турбулентного числа Прандтля и модификация турбулентного замыкания
- 3.3. Оценка влияния параметризации на процессы перемешивания
- 3.4. Выводы по Главе 3

Глава 4. Исследование сезонности ледяного покрова крупных озер и водохранилищ Русской равнины и его климатических трендов по данным спутников JASON-1,2,3, TOPEX/Poseidon и SARAL

- 4.1. Алгоритм выявления периодов ледостава и вскрытия льда из анализа яркостных температур
- 4.2. Сопоставление результатов расчетов ледовых характеристик крупнейших водоемов Русской равнины с натурными данными Российского Регистра Гидротехнических Сооружений и выявление климатических трендов
- 4.3. Выводы по Главе 4

Глава 5. Разработка трехмерной численной модели биохимических процессов во внутренних водоемах

- 5.1. Краткие сведения о биогеохимии парниковых газов, их производстве и потреблении
- 5.2. Описание механизмов генерации, переноса и стока примесей
- 5.3. Верификация модели на примере описания взаимодействия метана и кислорода
- 5.4. Выводы по Главе 5

Заключение

ГЛАДСКИХ Дарья Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
И БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВО ВНУТРЕННЕМ ВОДОЕМЕ
НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА**

Автореферат

Подписано к печати 17.06.2022 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 28(2022).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова 46