

**УТВЕРЖДАЮ:**  
Директор Учреждения Российской академии наук  
Института водных проблем РАН  
д.ф.- м.н., чл.- корр. РАН  
Гельфан А.Н.



23 августа 2022 г.

### **ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу Гладских Дарьи Сергеевны «Исследование термогидродинамических и биогеохимических процессов во внутреннем водоеме на основе модифицированных моделей турбулентного переноса», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа Гладских Дарьи Сергеевны посвящена исследованию термогидродинамических и биогеохимических процессов водоемов суши. Основные методы исследования – теоретический анализ, математическое моделирование и анализ данных дистанционного зондирования.

**Актуальность темы диссертации.** Внутренние водоемы (озера и водохранилища) имеют большое значение в социально-экономическом развитии страны и являются объектом исследования во многих задачах гидрологии, экологии, метеорологии и климатологии. Термогидродинамические характеристики озер и водохранилищ оказывают существенное влияние на процессы региональной циркуляции атмосферы. Изменение теплового режима внутренних водоемов является причиной эвтрофикации, что может приводить к массовому замору рыбы и ухудшению качества воды. В регионах с большим количеством озер и водохранилищ наблюдается выраженное потепление климата. Для учета взаимодействия внутренних водоемов и атмосферы необходимо включать в климатические модели расчет термогидродинамических и биологических характеристик вод суши. Важно корректное воспроизведение термогидродинамики озер в мезомасштабных моделях атмосферы, где пространственное разрешение достигает нескольких километров, что меньше по сравнению с характерными горизонтальными размерами крупных внутренних водоемов.

**Научная новизна.** В диссертации получен ряд новых результатов.

Разработан комплексный подход к исследованию гидрологических, термогидродинамических и биогеохимических характеристик внутреннего водоема, основанный на объединении существующих, модифицированных и разработанных лично диссертантом и при непосредственном участии методов и моделей.

- При моделировании в одномерной постановке предложена модификация процедуры задания входных данных, обеспечившая учет ветрового воздействия на процессы перемешивания.
- На основе усовершенствованной модели турбулентности, учитывающей двустороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергий турбулентных пульсаций, модернизирована стандартная  $k-\epsilon$  схема турбулентного перемешивания, что позволило учесть вклад в мелкомасштабную турбулентность внутреннего водоема стратификации и сдвига скорости;
- Предложен простой метод определения времени замерзания и вскрытия внутренних водоемов, основанный на анализе изменения яркостных температур, регистрируемых радиометром альтиметрических спутников при их движении.
- Разработана 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 будут, несомненно, полезны при разработке моделей гидротермодинамических и биогеохимических процессов в водоемах различных масштабов. Уточненный подход к описанию мелкомасштабной турбулентности может быть применен к задачам, связанным с исследованиями турбулентности в океане и атмосфере. Разработанные методики задания скорости ветра и определения ледовых характеристик внутреннего водоема, не требующие проведения непрерывных натурных измерений, представляют интерес для моделирования и прогнозирования процессов, связанных с взаимодействием атмосферы и гидросферы, а также для исследования гидрологических характеристик озер и водохранилищ на многолетних масштабах. Разработанная автором модель биогеохимических процессов позволит 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, что подтверждают полученные автором свидетельства о государственной регистрации:

1. Программа для расчета и визуализации термических режимов внутренних водоемов на основе одномерной модели термодинамики LAKE
2. База данных натуральных измерений температурных профилей Горьковского водохранилища в период открытой воды 2014-2019 гг
3. Программа «Численная модель термогидродинамики и биогеохимии проточных водоемов LAKE3.0»

**Достоверность результатов** не вызывает сомнений, так как базируется на корректном применении математических методов и подтверждается согласованностью полученных результатов с известными аналитическими и экспериментальными данными. Физическая трактовка полученных результатов, находится в согласии с общепризнанными представлениями. Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием с результатами других авторов, а также экспертизой результатов в процессе публикаций в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и списка основных работ автора по теме диссертации. Работа изложена на 120 страницах, включает 2 таблицы, 42 рисунка и список библиографических источников из 173 наименований.

**Содержание диссертации.** Во введении приведена аргументированная постановка задачи исследования, обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и задачи, приведена общая характеристика работы.

В **первой главе** дан обзор современного состояния исследований термогидродинамики и биогеохимии водоемов суши. Приведена иерархия моделей описания термогидродинамических процессов во внутренних водоемах, указаны преимущества и недостатки моделей различной размерности, основные сферы их применения. Представлен обзор подходов к описанию турбулентности в водных объектах, рассмотрены наиболее широко применяемые турбулентные замыкания. Приведены обоснования необходимости модификации  $k-\epsilon$  схемы для исследования особенностей мелкомасштабных процессов при больших значениях градиентного числа Ричардсона. Представлены методики изучения ледового режима внутренних водоемов. Описаны существующие в настоящее время модели описания биогеохимических процессов в озерах и водохранилищах, подходы, используемые в этих моделях, их преимущества и недостатки. Сформулированы выводы по современному состоянию проблемы исследования термогидродинамических и биогеохимических процессов в водоемах суши как факторов, влияющих на формирование и изменение климата.

**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. Приводится краткое описание модели, обосновывается выбор объекта исследования, обозначаются основные проблемы, связанные с реалистичным заданием данных сопутствующей

метеорологической обстановки и, в частности, скорости ветра. Представлены три методики процедуры задания скорости ветра: на основе комбинированного метода, совмещающего данные глобального реанализа и данные натуральных измерений, с помощью данных дистанционного зондирования, с привлечением атмосферной модели. Приведены результаты численного моделирования вертикального распределения температуры Горьковского водохранилища, сопоставление этих результатов с данными натуральных измерений, сделаны выводы о применимости методики и перспективах ее совершенствования.

В **Главе 3** рассматривается задача корректного описания турбулентности в стратифицированной жидкости, и предложена модифицированная модель турбулентного переноса, сконструированная на основе  $k$ - $\epsilon$  замыкания с привлечением моделей, учитывающих двустороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергии турбулентных пульсаций. Приведена процедура получения параметризации турбулентного числа Прандтля как функциональной зависимости от градиентного числа Ричардсона. Полученная зависимость позволила модифицировать  $k$ - $\epsilon$  схему с целью учета вклада сдвига скорости и плотностной стратификации в турбулентность и снять ограничение на описание турбулентности при больших значениях градиентного числа Ричардсона. Представлены результаты численных экспериментов для оценки влияния параметризации на моделирование процессов перемешивания. Подтверждена эффективность использования модифицированной схемы для описания переноса энергии, импульса и скалярных субстанций во внутреннем водоеме.

**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. Предложен и описан алгоритм выявления периодов ледостава и открытой воды из анализа яркостных температур, полученных по данным дистанционного зондирования. Эффективность алгоритма подтверждается путем сопоставления результатов расчетов ледовых характеристик с натурными данными Российского Регистра Гидротехнических Сооружений. Показано наличие климатического тренда к более позднему замерзанию, более раннему вскрытию льда, и, тем самым, сокращению периода ледостава за последние 25 лет.

В **главе 5** представлена разработанная автором трехмерная биогеохимическая модель, дополняющая модель термогидродинамики замкнутого водного объекта. Приведены краткие сведения о биогеохимии парниковых газов: метана и углекислого газа, их производстве и потреблении. Описаны основные механизмы образования и потребления метана, даны оценки эмиссий парниковых газов с пресноводных экосистем. Приведены основные уравнения для описания механизмов переноса, диффузии и взаимодействия биогеохимических субстанций и уравнениях термогидродинамики замкнутого водоема, которые объединены в программный комплекс. Приведены результаты верификации разработанной

модели на основе сопоставления с одномерной моделью LAKE 3.0 с помощью численной реализации классического лабораторного эксперимента Като-Филиппа, дополненной граничными условиями для растворенных газов. Серия численных экспериментов в идеализированных водоемах конечного размера подтвердила, что трехмерное описание корректирует недостатки одномерного подхода. Приведены результаты исследования на основе численных экспериментов влияния различных конфигураций рельефа дна на распределение примесей в толще водоема.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации, и обозначены возможные направления дальнейших исследований.

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, которые отражают основное содержание диссертации. Из них 7 статей в зарубежных научных журналах.

**Замечания**, которые можно высказать по работе, сводятся к следующему:

1. Раздел **Личный вклад автора** сформулирован излишне схематично. Следовало бы дать более четкое представление о конкретных результатах в каждом из перечисленных действий: получены новые теоретические зависимости, разработаны и реализованы алгоритмы, сконструирован новый численный метод, поставлены и проведены численные эксперименты.
2. В гл. 1 часть, посвященная обзору современного развития биогеохимических моделей, недостаточно полно представлены последние разработки. Их упоминание сделало бы более очевидными преимущества разработанной автором трехмерной модели, описанной в главе 5.
3. Сравнение результатов расчетов по модели с данными наблюдений в Горьковском водохранилище по двум профилям вертикального распределения температуры представляется недостаточно убедительным. Следовало бы уделить больше внимания верификации модели по данным натурных измерений.
4. Вывод о необходимости учета зависимости коэффициента генерации турбулентности от характеристик ветро-волновой обстановки, а также вклада сдвига скорости и внутренних волн в мелкомасштабную турбулентность, приведенный в конце 2 главы, не следует из ее содержания.
5. В гл. 3 целый параграф 3.1. и частично 3.2 (всего 12 страниц) посвящены изложению основных положений моделей турбулентности других авторов, подробно описывается, как получена модификация стандартного  $k-\epsilon$  замыкания для описания турбулентности в стратифицированной жидкости, а собственно оценка ее влияния на термогидродинамику внутренних водоемов представлено в одном абзаце, где для условий оз. Куйвоярви представлены вертикальные распределения кинетической энергии турбулентности и градиентного числа Ричардсона, которые сами по себе не

- несут никакой информации о преимуществах модификации. А профили температуры, полученные с помощью стандартной и модифицированной схем перемешивания, можно было бы сравнить с данными наблюдений, но они приведены только для идеализированного расчета. В связи с этим некоторые выводы, приведенные в главе, не кажутся очевидными.
6. Из текста главы 4 непонятно, что сделано автором, а какие результаты взяты из других работ, потому что на них нет ссылок. Нет ни одной ссылки на работы, где была дана теоретическая часть метода. Не приводятся ссылки в подрисуночных подписях на рисунках, которые были заимствованы из других работ без участия автора.
  7. В гл. 5, посвященной разработанной автором модели, нет никакой информации о численной схеме, шаге счета по времени, сетке.
  8. В гл. 5 автор подчеркивает, что трехмерная модель в качестве данных, полученных в результате расчетов, предоставляет вертикальные профили, осредненные по горизонтали, а также двумерные и трехмерные поля. Однако двумерные поля, наиболее информативные с точки зрения представления о распространении примеси, не приведены в диссертации.
  9. На стр. 92 отмечается, что «в профилях скорости наблюдается противотечение в нижней части перемешанного слоя, связанное с градиентом давления, направленным против скорости ветра, а сама структура течения является квазистационарной. В термоклин наблюдаются гравитационные колебания, амплитуда которых подавляется горизонтальной вязкостью». Этот вывод следовало бы объяснить подробнее, т.к. про ветровой форсинг не было ничего сказано до этого. Было бы также не лишним привести вертикальное распределение коэффициента турбулентной вязкости.
  10. Отсутствует рисунок, на который дана ссылка в тексте: «Помимо примитивных конфигураций рельефа дна, в модели реализована возможность задания карты глубин реального водоема и данных атмосферного форсинга. Так были проведены тестовые расчеты циркуляции Горьковского водохранилища (рисунок 2.13).
  11. Почему в разработанной автором модели не была использована модификация  $k-\varepsilon$  схемы перемешивания, ведь по утверждению автора в работе подтверждена принципиальная роль предложенной модификации замыкания при расчете термодинамики водоема в условиях сформировавшегося термоклина и можно ожидать, что использование параметризации может влиять на перенос биохимических примесей в небольших внутренних водоемах, в частности, через термоклин, что поможет дать более корректные оценки концентраций примесей и, тем самым, оценки последующей эмиссии парниковых газов в атмосферу?

Имеется также несколько замечаний технического и/или стилистического характера

1. В нескольких местах в тексте диссертации встречается некорректное выражение «влияние параметризации на процессы перемешивания». Есть

даже параграф 3.3 с таким названием. Способ параметризация не может влиять на природный процесс.

2. В гл. 1 на стр. 18 не дописана фраза, несущая важную смысловую нагрузку: «Условие (\*) является общим следствием уравнения баланса турбулентной энергии, означающим, что генерация энергии турбулентности за счет сдвига...»
3. В гл. 2, посвященной **одномерному** моделированию, не нужен рисунок 2.8, представляющий мгновенное распределения температуры поверхности и горизонтальной компоненты скорости течения в расчетах циркуляции Горьковского водохранилища с применением **трехмерной** модели.
4. Ошибка в подписи к рис. 5.9. Распределение концентрации кислорода вблизи поверхности водоема и на вертикальном сечении. Должно быть «метана».
5. Отсутствует рисунок, на который дана ссылка в тексте: «Помимо примитивных конфигураций рельефа дна, в модели реализована возможность задания карты глубин реального водоема и данных атмосферного форсинга. Так были проведены тестовые расчеты циркуляции Горьковского водохранилища (рисунок 2.13).

Высказанные замечания не затрагивают основных результатов и выводов диссертации и не снижают общего положительного впечатления от работы.

Автореферат отражает основную информацию, представленную в диссертации.

### **Заключение.**

Диссертационная работа Гладских Дарьи Сергеевны «Исследование термогидродинамических и биогеохимических процессов во внутреннем водоеме на основе модифицированных моделей турбулентного переноса» вносит существенный вклад в понимание процессов, формирующих гидрологические и биогеохимические характеристики водоемов, в создание наиболее эффективных подходов и методов математического моделирования озер и водохранилищ, которые позволяют решать как локальные задачи, направленные на исследования конкретных гидрологических и биохимических характеристик внутренних водоемов, так и глобальные проблемы взаимного влияния вод суши и климатической системы Земли. Полученные в работе результаты и выводы представляют интерес для специалистов в области гидродинамики, гидрологии, климатологии и экологии.

Таким образом, диссертационная работа Гладских Дарьи Сергеевны «Исследование термогидродинамических и биогеохимических процессов во внутреннем водоеме на основе модифицированных моделей турбулентного

переноса» является самостоятельной работой, полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., в действующей редакции, а автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв ведущей организации на диссертацию Гладских Д.С. обсужден и одобрен на заседании Ученого совета ИВП РАН (протокол №5 от 22 августа 2022 г.)

Отзыв подготовила доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник ИВП РАН  
Дебольская Е.И.

