

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Гладских Дарьи Сергеевны

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВО ВНУТРЕННЕМ ВОДОЕМЕ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА»,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Актуальность темы диссертации.

Тема диссертации очевидно актуальна в свете современных представлений о роли озер и водохранилищ в формировании климата Земли, как об одном из источников парниковых газов типа метана. Результаты работы важны для построения специального блока внутренних водоемов в модели Земной системы для согласованных оценок изменений глобального и регионального климата и биогеохимии озер и водохранилищ. Для построения систем мониторинга эмиссии того же метана необходима достаточно развитая методика интерпретации контактных и дистанционных данных измерений, которая предполагает использование в своей основе численных моделей совместной гидротермодинамики и биогеохимии. При этом исследование озер и водохранилищ имеет самостоятельное значение для экологии и экономики прилегающих территорий (контроль качества воды, управление рыболовством, судоходство). В работе предлагается вариант такого комплексного подхода с использованием иерархии моделей гидротермодинамики (в зависимости от размеров водоема) и методов анализа данных наблюдений (в данном случае - скорости ветра и ледовитости).

Обоснованность.

В работе использованы общепринятые в современной научной практике подходы к построению моделей гидродинамики, параметризаций подсеточной турбулентности и биогеохимии озер и водохранилищ, поэтому обоснованность результатов не вызывает сомнений. Полученные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, докладывались на представительных конференциях и семинарах, и получили положительную оценку профильных специалистов.

Достоверность и новизна.

Полученные результаты в своей совокупности являются новыми, получены автором лично или в соавторстве, степень участия диссертанта указана. Достоверность результатов обеспечивается корректным физическим и математическим описанием рассматриваемых явлений, и богатым эмпирическим материалом.

Содержание диссертации.

Работа состоит из 5 глав, введения, заключения, списка литературы и приложений.

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 по всем аспектам, рассматриваемым далее 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 3.0. В качестве развития модели предлагаются различные методы вычисления скорости ветра, как главного фактора перемешивания по вертикали - использование более сложных методов позволило существенно уменьшить ошибку в воспроизведении температуры водоема по сравнению с оригинальной версией.

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. Влияние предложенной параметризации на воспроизведение процессов перемешивания продемонстрировано в экспериментах с использованием трехмерной усредненной по Рейнольдсу модели термогидродинамики – как для идеализированной, так и для реалистичной постановки, соответствующей озеру Куйяварви.

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.

В **Главе 5** представлена разработанная автором трехмерная модель генерации, переноса и стока биогеохимических примесей в водоемах суши, дополняющая трехмерную модель термогидродинамики замкнутого водного объекта. Эта часть направлена на исследование механизмов образования и потребления метана и оценки эмиссии парниковых газов из пресноводных экосистем. Проведено сравнение с одномерной моделью и показана важность учета трехмерной циркуляции для корректного описания глубины верхнего перемешанного слоя, богатого кислородом.

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

Достоинства и недостатки работы.

Вопросы и замечания пронумерованы в общем порядке, сначала замечания по существу, далее – редакционные замечания по каждому из разделов.

Замечания по существу.

Во **Введении** дается недостаточно точное описание решенных задач. Было бы полезным некоторые положения, выносимые на защиту, сформулировать более определенно. Например:

Замечание 1. В разделе Цели и задачи диссертационной работы (стр. 5) говорится: «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». Означает ли это, что до выполнения этой работы роль вышеназванных факторов была под сомнением?

Глава 1.

Замечание 2. На стр. 13 утверждается, что трехмерные модели «имеет смысл использовать при наличии подробной информации об изучаемом водном объекте: пространственной временной картине течений, данных о метеорологической обстановке в районе водоема с пространственным разрешением, учитывающим особенности его батиметрии и топографии прилегающей территории». На самом деле трехмерные модели как раз дают трехмерные поля течений и характеристик биохимической системы – именно этому посвящена Глава 5 настоящей диссертации. Особенности метеорологической обстановки с согласованным с масштабом бассейна разрешением приходится учитывать и в одномерных моделях – именно этому в значительной мере и посвящена Глава 2.

Замечание 3. На стр. 19 утверждается, что «температурный профиль после вскрытия льда представляет собой 4°C по всей глубине». Это утверждение спорно, так как температуры талой воды 0°C, ее плотность меньше плотности при температуре 4°C, поэтому при отсутствии интенсивного ветрового перемешивания температура воды как функция глубины не будет константой.

Замечание 4. На стр. 24 упоминается работа Филатова и др., 2019 по моделированию Ладожского озера, однако не делается оценка этой модели и не проводится сравнение модели Филатова с коллегами, и представленной в диссертации модели.

Глава 2 достаточно подробно проработана и полученные результаты хорошо обоснованы.

Без замечаний.

Глава 3.

Замечание 5. Показано существование эффекта от учета параметризации в гидростатической трехмерной модели термогидродинамики, усредненной по Рейнольдсу,

однако расчеты сделаны либо для модельных условий, либо нет сравнения с данными наблюдений или с данными прямого численного моделирования DNS-моделью. Это не позволяет сделать однозначного вывода о практической полезности предложенной параметризации.

Глава 4 – см. Редакционные замечания.

Глава 5 представляется естественным продолжением общей логики представленной работы, тем более что делается важный шаг по воспроизведению важных аспектов биохимии внутреннего водоема с учетом трехмерной термогидродинамики. Общая методика работы и сделанные выводы представляются корректными и важными для понимания учета трехмерной циркуляции при воспроизведении даже небольших водоемов. При этом существенным образом используются результаты **Главы 3**. Основные замечания касаются формулировки модели термогидродинамики.

Замечание/Вопрос 6. Коэффициент поглощения солнечного излучения берется один для всего спектра (характерная глубина затухания примерно 0.5м в рассматриваемых экспериментах). В океане в аналогичных задачах выделяется минимум два спектральных интервала. Оправдано ли использование среднего коэффициента? Можно ли, по мнению автора, использовать результаты, полученные для океана, в моделях внутренних водоемов?

Замечание/Вопрос 7. Результаты по моделированию концентраций метана и кислорода носят методический характер и не сравниваются с данными наблюдений хотя бы качественно. С чем это связано?

Закключение – см. Редакционные замечания.

Редакционные замечания.

Введение.

Замечание 8. В разделе Цели и задачи диссертационной работы (стр. 5) утверждается: «Теоретическое исследование основных физических процессов, формирующих гидрологические и биохимические характеристики водоемов; определение наиболее эффективных подходов и методов математического моделирования озер и водохранилищ». На самом деле задача выбора «наиболее эффективных» методов не решалась. Выбор делался между одномерной и трехмерной моделями, выбора модели биохимии как такового не было.

Глава 1.

Замечание 9. На стр. 13 утверждается, что применение двумерных моделей имеет смысл только в специфических задачах. Это утверждение представляется крайне спорным. Есть

довольно большой класс задач с применением двумерных (осредненных по глубине) моделей – расчет наводнений и расчет резервуаров-охладителей, например. Оппоненту известны зарубежные пакеты программ для расчета систем рек и водохранилищ с применением двумерных (осредненных по ширине водоема) моделей.

Глава 3.

Замечание 10. Главный недостаток представленного текста – нет акцента на вкладе автора в полученные результаты, и нечетко сформулирована их новизна по сравнению с работами научного руководителя.

Глава 4 является важной с точки зрения построения общей системы мониторинга и моделирования отдельного водохранилища или озера, однако представляется недостаточно проработанной и несколько выпадает из общего направления диссертационной работы.

Замечание 11. Возможно, было бы правильно перенести эту главу в Приложение, и обозначить как перспективную тему для дальнейшего развития методики с привлечением профильных специалистов.

Глава 5. Основные замечания касаются формулировки модели термогидродинамики. По смыслу – все замечания носят редакционный характер. Диссертант не занимался собственно разработкой модели термогидродинамики и при ее формулировке допустила несколько неточностей. Так, например:

Замечание 12. В уравнении (5.4) пропущено слагаемое, описывающее проникающую радиацию.

Замечание 13. Уравнение (5.6) не имеет смысла. Вероятно, имелось в виду нелинейное кинематическое условие на подвижной верхней границе. В дальнейшем все граничные условия ставятся не на $z=\eta$, а на плоскости $z=0$, так что, вероятнее всего, на самом деле рассматривается линеаризованное кинематическое условие.

Замечание 14. Уравнение (5.7) не содержит важного слагаемого, описывающего гравитационное осаждение детрита. Скорее всего – это опечатка.

Заключение.

Замечание 15. При перечислении результатов говорится о том, что «удалось показать существование турбулентности при значениях градиентного числа Ричардсона выше критического», однако это, как отмечено самим автором диссертации, следует из самой конструкции предложенной параметризации (см. выводы Глава 3, стр 57: «Полученные результаты связаны с особенностями данной параметризации, из которой следует существование турбулентности при значениях $Ri \gg 1$ »).

Замечание 16. В Приложении А на стр. 116 в первой формуле очевидная ошибка, отсутствуют функции b_1, b_2 .

Приведенные замечания не умаляют ценность главных результатов, представленных в диссертации. Работа выполнена на достаточно высоком уровне, изложена грамотным русским языком, аккуратно оформлена. Обзор и список цитируемой литературы позволяет

составить вполне полное представление о состоянии современной науки в данном сегменте.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, в полной мере отражает ее структуру, и дает возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне.

Основные положения диссертации нашли свое отражение в 10 статьях в изданиях, индексируемых WoS/Scopus, 6 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. Работа прошла апробацию на представительных международных и российских научных конференциях и семинарах.

Считаю, что представленная работа Гладских Д.С. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а сама Гладских Дарья Сергеевна заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29- физика атмосферы и гидросферы.

Я, Яковлев Николай Геннадьевич, выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук», д.ф.-м.н. (25.00.29- физика атмосферы и гидросферы), доцент



Яковлев Николай Геннадьевич

199991 Москва, ул. Губкина, д.8, ИВМ РАН

Тел. +7-495-984-81-20 (39-22)

e-mail: nick_yakovlev@mail.ru

«Подпись руки Н.Г. Яковлева заверяю»

Ученый секретарь ИВМ РАН



Д.ф.-м.н., профессор Шутяев В.П.

«13» сентября 2022 г.