

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**доктора физико-математических наук**  
**Степаненко Виктора Михайловича**  
**на тему: «Математическое моделирование теплового режима и динамики**  
**парниковых газов в водоёмах суши»**  
**по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»**

Диссертация Степаненко Виктора Михайловича относится к научному направлению - разработка и создание вычислительных технологий, в данном случае, представлена авторская модель озера LAKE. Кратко перечислим, что в диссертации сделано, – дан вывод одномерных уравнений термогидродинамики водоёма, сформулированы упрощающие и замыкающие гипотезы, проведено детальное сравнение наиболее распространенных в мире одномерных моделей озера, сформулированы их преимущества и недостатки, проведён анализ и моделирование явления заглублённого максимума температуры в стратифицированном по солёности озере, построена модель сейш в многослойной жидкости, исследовано влияние сейш на толщину верхнего перемешанного слоя в небольшом водоёме с устойчивой стратификацией, дано объяснение удовлетворительному воспроизведению вертикального распределения температуры одномерными моделями в пренебрежении горизонтальным градиентом давления, разработана и апробирована на нескольких водоёмах модель, воспроизводящая ключевые процессы, определяющие распределение и динамику метана и углекислого газа в озере.

**Актуальность.** Общая площадь озёр на Земле оценивается в 2.8 млн. км<sup>2</sup>, по последним более точным оценкам, около 3.45 млн. км<sup>2</sup>, а с учетом прудов и водохранилищ – 4.2 млн. км<sup>2</sup>. Это сравнимо с площадью, например, Средиземного моря (2.5 млн. км<sup>2</sup>). Конечно, такие объекты будут оказывать существенное влияние на климат на Земле и должны учитываться в глобальных

климатических моделях. В настоящее время основным средством прогноза погоды и воспроизведения прошлых и будущих изменений климата являются модели общей циркуляции атмосферы и океана, дополненные описанием процессов, происходящих в деятельном слое суши. За последнее десятилетие в ряд глобальных и региональных моделей включены одномерные параметризации озёр, что важно для адекватного описания взаимодействия атмосферы с гидрологически неоднородными территориями суши. Несмотря на распространённость использования одномерных (по вертикали) моделей водоёмов в лимнологии и в климатологии, вопрос об условиях их применимости к описанию реальных объектов изучен недостаточно. К каждому новому водному объекту модель, как правило, адаптируется формальной калибровкой параметров. Но что еще важно, биогеохимические процессы в подобных моделях отражены только в виде, необходимом для расчёта качества воды. При этом, несмотря на эмпирически зафиксированные высокие значения потоков парниковых газов с внутренних водоёмов, подходы к моделированию этих эмиссий разработаны не были.

**Целью** работы является создание математической модели водоёма, воспроизводящей термогидродинамические и биогеохимические процессы, которые определяют его вертикальную структуру и энергомассообмен с атмосферой, и имеющей вычислительно эффективную конфигурацию для параметризации озёр в моделях Земной системы и системах прогноза погоды.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 461 страницу, 66 рисунков и 22 таблицы. В списке литературы 416 работ, из них 331 из иностранных источников.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи, перечисляются защищаемые положения, излагаются научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Глава 1** представляет обзор современного состояния проблемы моделирования термогидродинамических и биогеохимических процессов в

водоёмах в контексте задач прогноза погоды и оценки изменений климата. Основным требованием к моделям водоёма с такой точки зрения становится правильное воспроизведение потоков энергии и массы на границе "вода-воздух".

Процессы взаимодействия озёр с атмосферой разделяются на две группы: "термодинамическое взаимодействие" и "биогеохимическое взаимодействие", последнее отвечает за потоки парниковых газов. Термодинамическое взаимодействие учитывается в ряде систем прогноза погоды и моделей Земной системы (МЗС) с помощью одномерных параметризаций водоёмов. Но эти параметризации существенно различаются, в первую очередь, в описании внутреннего турбулентного обмена. Интеркалибрация одномерных моделей была проведена с участием автора диссертации в рамках международного проекта LakeMIP (Lake Model Intercomparison Project).

Специальный интерес представляет моделирование термической структуры озёр, стратифицированных по солёности. Физические особенности теплопереноса в этих водных объектах в настоящее время изучены недостаточно.

В диссертации отмечается, что хотя существующие одномерные модели водоёма в целом успешно воспроизводят температуру поверхности, а вертикальное распределение температуры, эволюцию ледяного и снежного покровов воспроизводят в основных чертах, однако они не отражают основные моды динамики течений, в особенности, внутренние колебания. Это приводит, в частности, к неправильному расчёту вертикальной турбулентной диффузии примесей, в т.ч. парниковых газов, через термоклин. В этой связи становится крайне необходимой задача параметризации основных колебательных мод течений в одномерных моделях.

Математическое моделирование биогеохимического взаимодействия водоёмов с атмосферой является новым направлением. Учёт потоков парниковых газов с водоёмов в МЗС требует развития одномерных

биогеохимических моделей, охватывающих широкий спектр природных условий.

В **Главе 2** дается изложение основных подходов к одномерному по вертикали моделированию термогидродинамики водоёмов, приводится их реализация в авторской модели LAKE. Выводятся уравнения для осреднённой по горизонтальному сечению водоёма скалярной величины или компонент скорости.

Граничным условием на разделе "вода-воздух" является турбулентный поток субстанции. Для вычисления этого потока привлекаются, в зависимости от природы субстанции, теория Мони́на-Обухова, уравнение теплового баланса поверхности с учётом влияния холодной плёнки на температуру поверхности, законы газообмена. Для расчёта потоков на нижней границе водоема применяются эмпирические зависимости, связывающие потоки на дне с решением внутри области.

Описываются результаты двух экспериментов в рамках проекта LakeMIP, проведённых с привлечением данных наблюдений на оз. Коссенблаттер (Германия) и оз. Валькеа-Котинен (Финляндия).

По результатам сравнений модельных расчётов по оз. Коссенблаттер сделаны следующие выводы - использование вертикально-разрешающих моделей даже для полимиктического оз. Коссенблаттер позволяет значительно улучшить воспроизведение температуры поверхности по сравнению с моделью полностью перемешанного водоема; учёт теплообмена в донных отложениях несущественно сказывается на ходе температуры поверхности озера в летнее время; тепловой баланс на поверхности водоёма является основным фактором, определяющим её температуру, так что последняя слабо чувствительна к ошибкам воспроизведения температуры дна и стратификации в термоклине.

Результаты сравнения моделей по оз. Валькеа-Котинен - температура поверхности озера воспроизведена моделями в целом успешно, но с завышением средней величины на  $0.1^{\circ}\text{C}$  -  $1.1^{\circ}\text{C}$  и короткими нереальными "выбросами". Потоки явного и скрытого тепла в атмосферу завышены, в среднем,

всеми моделями относительно результатов расчетов по пульсационным измерениям.

Проведено моделирование озера Большой Виллой (восточное побережье п-ва Камчатка) эстуарного типа, стратифицированного по солёности. Для таких озер недостаточно исследован ряд характерных для этих озёр физических явлений, таких как, к примеру, заглубленный максимум температуры, наблюдаемый, кстати, и в Аральском море. Надо заметить, что механизм данного явления изучен недостаточно. Модель озера LAKE продемонстрировала удовлетворительное качество воспроизведения термического режима озера на суточном и недельном масштабах времени. Известное в литературе объяснение этого максимума температуры заключается в том, что при резком градиенте солёности под пресным слоем, рост температуры, вызванный поглощением радиации под этим слоем, не создаёт неустойчивой стратификации. Соискателем показано, что существуют и другие механизмы поддерживающие и усиливающие это явление, а именно, эффект "накачки" максимума температуры, возникающий в следствие сдвига по фаз между суточными циклами глубины перемешанного слоя и максимума температуры. Явление "накачки", обнаруженное впервые автором, приводит к увеличению максимума температуры при характерном суточном ходе потоков радиации и скорости ветра.

В **Главе 3** описывается метод замыкания горизонтально-осредненных одномерных уравнений движения в замкнутом водоёме при параметризации горизонтального градиента давления. Это важнейшее слагаемое, инициирующее движение вод, в том числе и гравитационные колебания в озёрах (сейши), не представлено ни в одной из существующих одномерных моделей.

Замыкание проводится с использованием уравнений мелкой воды в модели многослойной жидкости. Уравнения используются строго в предположении, что по горизонтали поля скорости и давления заданы первой модой Фурье. Такое приближение, как считает автор, обоснованно, т.к. множество натуральных

измерений в озёрах показывает преобладание первой горизонтальной моды в общем спектре гравитационных колебаний. Выраженный таким образом градиент давления включается в уравнения для горизонтальных компонент скорости одномерной модели. С применением приведённого выше замыкания в одномерной модели появляются сейшевые колебания с первым горизонтальным волновым числом. Количество "разрешённых" моделью вертикальных мод определяется стратификацией озера, т.е. количеством слоев.

В численных экспериментах, воспроизводящих свободные колебания в водоёме, частоты баротропных и бароклинных колебаний в дополненной градиентом давления версии модели хорошо согласуются с теоретическими оценками на основе линейных моделей. Чувствительность одномерной модели к включению параметризации сейш показана на примере оз. Валькеа-Котинен, где использование параметризации сейш действительно привело к существенному уменьшению толщины перемешанного слоя в летний период, что соответствует наблюдениям.

Ещё одним важным следствием включения параметризации сейш в одномерную модель стало появление придонного течения и соответствующего ему турбулентного пограничного слоя, в то время как в классических одномерных моделях горизонтальная скорость отлична от нуля только в верхнем перемешанном слое. Наличие придонного пограничного слоя важно для вертикального переноса растворённых веществ, в том числе парниковых газов, из донных отложений.

**Глава 4** посвящена моделированию процессов генерации, биохимических преобразований, переноса и эмиссии в атмосферу метана и углекислого газа в водоёмах суши. Единственным практически осуществимым подходом к моделированию метана является представление скоростей производства и потребления  $\text{CH}_4$  как эмпирических функций от внешних условий: концентрации кислорода и сульфата, температуры, глубины относительно поверхности донных отложений и т.д.

Моделирование концентраций  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в водоёме производится на основе уравнений реакции-диффузии. Источники в правых частях описывают - фотосинтез, дыхание, биохимическое потребление кислорода в водной толще и на поверхности донных отложений, аэробное окисление метана в водной толще. В более полной версии модели добавляются также уравнения для растворённого и взвешенного органического углерода. В модели учитывается пять газов - метан, углекислый газ, кислород, азот, аргон.

В каждой колонке донных отложений рассчитывается генерация метана, диффузия и образование пузырьков при превышении концентрацией  $\text{CH}_4$  критического значения, определяемого гидростатическим давлением. С любой колонки формируется свой пузырьковый поток метана, затем потоки со всех колонок суммируются в средний по горизонтали поток.

Моделирование эмиссии метана на оз. Щучье. В термокарстовом озере генерация метана происходит не только в результате жизнедеятельности существующей экосистемы в верхней части осадков, но и вследствие образования протаявшей зоны грунта (талика) и разложения попадающей в область положительной температуры законсервированной в мерзлоте органики. Сравнение рассчитанных потоков метана для термокарстового озера Щучье с данными наблюдений показало их хорошее согласие.

Моделирование парниковых газов в оз. Куйваярви. Озеро Куйваярви - это водоём в бореальной зоне на юге Финляндии. Модель LAKE в целом успешно воспроизвела основные особенности пространственно-временного распределения температуры и растворённых газов метана и углекислого газа в озере. Использование параметризации баротропных сейш позволило получить в модели турбулентно-перемешанный гипolimнион, качественно согласующийся с имеющимися эмпирическими данными.

**Заключение.** Здесь представлены выводы по основным разделам диссертации – обоснованность применимости одномерных моделей водоёма, термический режим эстуария, параметризация сейш, роль гравитационных и инерционных колебаний в динамике перемешанного слоя озёр, эмиссия

парниковых газов, сформулированы перспективы развития данного научного направления.

Приложения результатов диссертационной работы Модель LAKE внедрена в модель Земной системы ИВМ РАН в качестве параметризации внутренних водоёмов. На модель LAKE автором получено свидетельство о государственной регистрации №2015060367. Она снабжена технической документацией, руководством пользователя и доступна в сети Интернет (<http://tesla.parallel.ru/Viktor/LAKE/wikis/LAKE-model>).

**Достоинства диссертации.** В диссертации получено много интересных и важных результатов. Особо хотелось бы выделить, на мой взгляд, следующие:

1. Аккуратно оценена применимость распространённых одномерных моделей водоёма, в том числе и авторской модели LAKE, к описанию теплообмена в озёрах умеренных широт. Показано, что хотя энергообмен с атмосферой все модели рассчитывают удовлетворительно, но разница в расчетах температуры донных отложений существенно сказывается на скорости генерации парниковых газов.
2. Раскрыты механизмы формирования заглублённого максимума температуры в озерах, стратифицированных по солёности. Показано, что сопоставимый вклад в формирование максимума температуры вносят - поглощение радиации под пресным перемешанным слоем, вертикальная теплопроводность, теплообмен с донными отложениями, динамика температуры перемешанного слоя и суточный ход толщины слоя максимума температуры. Обнаружен механизм "накачки" максимума температуры в озерах, стратифицированных по солёности.
3. Предложен метод учета сейшевых колебаний в одномерной модели водоёма и показана их принципиальная важность в формировании процессов обмена в озерах.
4. Создан биогеохимический блок в одномерной модели водоёма, описывающий основные процессы, определяющие эмиссию метана и углекислого газа в атмосферу - генерацию газов в донных отложениях,



вертикальный диффузионный и пузырьковый перенос, окисление в водной толще, фотосинтез, разложение органических остатков.

По диссертации имеются **замечания:**

1. Представленная автором в диссертации модель LAKE включает блок расчета температурного режима озера и в зимний период, когда оно покрыто льдом (стр. 67 – 69). Иначе возникли бы вопросы к использованию этой модели в годичном цикле и, следовательно, в климатических моделях. Но в работе совершенно не отражены результаты использования модели в зимний период. А на самом деле для модели в зимний период должны возникнуть дополнительные сложности, например, с параметризацией сейш. В работе (Милс Д., Радок Р. О сейшах и приливах озера Байкал // Сейши на озерах, поверхностные и внутренние. Л.: Наука, 1970. С. 53–55) было показано, что периоды одноузловой и двухузловой сейш подо льдом в оз. Байкал такие же, как для открытой воды, – соответственно 4 ч 37 мин и 2 ч 33 мин. А вот амплитуда первой гармоники при наличии льда существенно уменьшается (в 2 и более раз), амплитуды же второй и третьей, наоборот, существенно возрастают. Аналогичный вывод о существенном уменьшении энергии первой гармоники, т.е. одноузловой сейши, при наличии льда был описан в (Верболов В.И. О байкальских сейшах // Сейши на озерах, поверхностные и внутренние. Л.: Наука, 1970. С. 50–52.) Еще более интересная особенность обнаруживается в повторяемости сейшевых гармоник – наибольшую повторяемость за год в Байкале имеют первая гармоника (84%) и, как ни странно, четвертая (46%). На долю второй приходится только 7%, а третьей и остальных – по 1% и меньше. Отсюда следует, что использование только первой гармоники сейшевых колебаний в модели, может оказаться необоснованным.

2. В модели LAKE заложен принцип, что сейши в озере существуют всегда! Но это не так! Сейши в летний и зимний периоды вызываются, главным образом, движущимися барическими возмущениями атмосферного давления. Но генерацию сейш они вызывают не всегда! Если скорость движения барического возмущения меньше скорости длинных гравитационных волн в открытой воде примерно в 3.5 раза, то генерация сейш наблюдается, а при более медленных перемещениях барического возмущения генерации сейш практически нет (Стурова И.В. Влияние ледяного покрова на колебания жидкости в замкнутом бассейне // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 128–135).
3. Сейши в зимний период – единственный механизм передачи импульса от атмосферы вглубь озера. До недавнего времени считалось, что сейши не генерируют остаточный перенос вод, такого же мнения придерживается и автор диссертации. Однако, как было показано экспериментально в (Ермакова О.С., Мальков Ю.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Лабораторное исследование нелинейных течений, возбуждаемых стоячими поверхностными волнами в жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 846–853), стоячие волны, к которым относятся сейши, генерируют остаточные нисходящие течения в пучностях стоячих волн. В узловых линиях сейш будут возникать компенсационные восходящие потоки. Это означает, что сейши в озерах в зимний период играют немаловажную, а может быть, и основную роль в перемешивании вод подо льдом. Как показано в (Зырянов В.Н. Сейши подо льдом // Водные ресурсы, 2011, т. 38, № 3, стр. 259 – 271), длины гравитационных волн подо льдом ограничены сверху в отличие от открытой воды, и не могут превышать критического значения, поэтому проявляться будут более высокие гармоники сейш, длины которых будут меньше допустимого значения, т.е. это может быть далеко не первая мода!

4. В диссертации при параметризации вклада сейшевых колебаний в горизонтальный градиент давления использован синусоидальный вид сейш (стр. 182), который возможен только для водоема с постоянной глубиной. В реальности, большинство озер имеют форму дна в виде чаши. Для таких водоемов форма баротропных сейш описывается функциями Лежандра, а не тригонометрическими функциями (Зырянов В.Н. Сейши подо льдом // Водные ресурсы, 2011, т. 38, № 3, стр. 259 – 271).
5. Так как глубины рассматриваемых озер небольшие и сравнимы с толщиной слоя Стокса для частот сейшевых колебаний, то турбулентная вязкость становится существенной, и необходимо в расчетах использовать редуцированную глубину водоема вместо реальной.
6. При параметризации теплообмена с наклонным дном (стр. 72) принимается на границе вода-дно условие непрерывности температуры. Это означает, что потоки тепла не согласованы. Последнее будет приводить к формированию пограничных диффузионных слоев со склоновыми течениями, которые, кстати, для пресноводных озер всегда восходящие (Зырянов В.Н., Лапина Л.Э. Склоновые течения в морях, озерах и водохранилищах, обусловленные диффузионными эффектами // Водные ресурсы, 2012, т. 39, № 3, с. 292 – 303). Возникающие склоновые течения, несмотря на свою локальность, инициируют глобальную вертикальную вентиляцию вод во всем водоеме и к тому же порождают внутренние волны.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на достоверность полученных в диссертации результатов, не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и

гидросферы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, соискатель Степаненко Виктор Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий лабораторией  
гидродинамики  
Института водных проблем РАН

/Зырянов Валерий Николаевич/

« 06 » декабря 2018 г.

**Контактные данные:**

тел.: (916) 159-51-35, e-mail: v.n.zyryanov@yandex.ru  
Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация: 11.00.08 — океанология

**Адрес места работы:**

119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,  
Институт водных проблем РАН, лаборатория гидродинамики  
Тел.: (499) 135-54-56; e-mail: [tina@iwp.ru](mailto:tina@iwp.ru)

