

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"

Диссертационная работа В.М. Степаненко посвящена разработке и верификации математической модели водоёма, воспроизводящей термогидродинамические и биогеохимические процессы в нём. При этом внимание уделено вопросам вычислительной эффективности с целью дальнейшего использования этой модели в моделях Земной системы и системах прогноза погоды.

Актуальность и научная новизна работы обусловлены значительным влиянием внутренних водоёмов суши на обмен энергией, импульсом и массой между деятельным слоем суши и атмосферой. Горизонтальный размер таких водоёмов (часто это сотни метров или километры), как правило, значительно мень-

ше типичного размера вычислительной ячейки глобальных моделей Земной системы (десятки или даже сотни километров). При этом относительно малые водоёмы суши характеризуются огромным вкладом в биогеохимический обмен с атмосферой, что дополнительно указывает на важность поставленных в диссертации задач. Кроме того, в работе выявлено, что даже уровень развития гидро- и термодинамических компонент существующих моделей озёр недостаточен для адекватного описания физических процессов в них.

Во Введении обоснована актуальность работы, формулируется её цель, ставятся задачи, представлены защищаемые положения, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В разделах первой главы диссертации представлен обзор современного состояния проблемы моделирования термогидродинамических и биогеохимических процессов в водоёмах в контексте задач прогноза погоды и оценки изменений климата. Специально отмечено, что основным требованием к моделям водоёма является воспроизведение потоков энергии и массы на границе между водой и воздухом. В частности, в главе указано, что взаимодействие озёр с атмосферой происходит при участии двух групп процессов — термодинамического (более точно было бы использовать термин "гидротермодинамического") и биогеохимического. При этом последняя группа процессов ни в одной модели Земной системы не учтена. Таким образом, разработка и верификация блока моделирования биогеохимических процессов — важная составляющая научной новизны представленной диссертационной работы. Очень важной частью этой главы является обоснование использования именно одномерных моделей для описания влияния озёр с размерами, меньшими размеров вычислительной ячейки глобальной или региональной модели Земной системы.

Вторая глава диссертации является, по сути, центральной главой работы. В ней подробно выводится одномерное приближение для уравнений модели озера. При этом в отличие от других работ учитывается наклон дна и возможное изменение уровня воды в озере. Последнее, в частности, потенциально позволяет использовать разработанную модель для описания термокарстовых озёр, цикл жизни которых принципиальным образом связан с заполнением де-

прессии почвогрунта водой и последующим дренированием озера. Учёт этих особенностей в модели озера проведён впервые и, таким образом, дополнительно увеличивает научную новизну представленной диссертации. Кроме того, обсуждаются вопросы замыкания осреднённых по Рейнольдсу уравнений на основе так называемой $k - \varepsilon$ -модели, отличающейся как достаточной строгостью, так и вычислительной эффективностью, необходимой для включения модели озера в глобальную модель Земной системы. Это естественным образом приводит в обсуждению аспектов численной реализации модели. Наконец, проводится верификация модели озера в идеализированном эксперименте Като–Филлипса и по данным прямых измерений для трёх неглубоких озёр — двух пресноводных и одного, характеризующегося стратификацией по солёности. Выбор неглубоких озёр для верификации модели следует признать весьма удачным — именно для таких озёр наилучшим образом проявляется значимость дополнительных процессов, учёт которых произведён в разработанной автором модели озера. Дополнительно отмечу весьма интересный с точки зрения глобального и регионального моделирования Земной системы результат, согласно которому учёт термодинамики подозёрных отложений уменьшает отклонение модельных результатов от соответствующих данных измерений вдвое.

Темой третьей главы является метод замыкания горизонтально–осреднённых одномерных уравнений движения в замкнутом водоёме с целью параметризации роли горизонтального градиента давления. Несмотря на важность этого слагаемого, ранее в одномерных моделях озёр оно не учитывалось. Разработка такой параметризации — существенная часть научной новизны работы. Кроме того, она позволяет ограничить заглубливание перемешанного слоя, что необходимо для адекватного воспроизведения процессов в водоёме. В диссертации отмечено, что в ряде моделей это ограничение достигается сохранением кориолисова слагаемого в уравнениях движения, так что желаемый результат получается физически некорректным способом. Таким образом, разработка автором замыкания горизонтально–осреднённых одномерных уравнений движения — один из принципиальных шагов создания физически адекватной мо-

дели внутренних водоёмов суши.

Четвёртая глава посвящена моделированию процессов генерации, биохимических преобразований, переноса и эмиссии в атмосферу метана и углекислого газа в водоёмах суши. Блок биогеохимических процессов в настоящее время является необходимым в моделях Земной системы. Как следствие, указанная глава придаёт общую законченность диссертационной работе. Разработанная автором модель биогеохимических процессов в озёрах и подозёрных отложениях существенно расширяет уже существующие подобные модели.

В Заключении приведены основные выводы диссертационной работы.

К работе можно высказать ряд замечаний:

1. К "Введению":

Выносимые на защиту положения неоднородны по значимости. Первое положение ("Существует система общих точных одномерных уравнений термо-, гидродинамики и биогеохимии водоёма . . . ") является очень общим и важным (хотя и сформулировано недостаточно точно, см. замечания ко всему тексту работы). Это же можно сказать и о положении 6 (" . . . построена модель переноса и биогеохимических преобразований углекислого газа и метана в водоёмах суши . . . "). С другой стороны, положения 3–5 посвящены отдельным аспектам вклада сейш в динамику водоёмов.

2. К главе 1:

- Как уже отмечалось, важной частью главы является обоснование использования одномерных моделей процессов в озёрах для целей представленной диссертационной работы. Однако, обсуждая достоинства одномерных таких моделей и недостатки трёхмерных, автор вообще не упоминает двумерные модели. Вместе с тем, использование двумерных моделей озёр в приближении цилиндрической геометрии позволило бы при умеренных вычислительных затратах описать боковой перенос энергии к озеру и к отложениям под ним от расположенного рядом почвогрунта. Этот перенос, в свою очередь,

может играть важную роль в развитии и последующей динамике подолёрного талика.

- На с. 15, говоря о доли покрытия озёрами разных регионов, следовало бы уточнить, регионы какого размера имеются в виду.
- Представляется целесообразным расширить табл. 1.1 описанием свойств моделей проекта LakeMIP, имеющих отношение к задачам представленной диссертации (типом осреднения, типом турбулентного замыкания и т.д.).
- В ряде мест этой главы неправильно указаны размерности величин (вместо "тг" следует писать "Тг" , вместо "пг" — "Пг").

3. К главе 2:

- Эта глава неудачно структурирована. Создаётся впечатление, что автор работы механически собрал свои публикации в разделы этой главы без необходимого обобщения. В качестве примера можно отметить, что целых три раздела этой главы носят название "Выводы". Это затрудняет чтение главы и понимание её результатов.
- Не совсем удачно проведена верификация разработанной автором модели озера. Эта верификация проводится в рамках проекта LakeMIP. Это позволяет поставить результаты верификации модели в контекст соответствующих результатов с другими подобными моделями. Однако при этом представляется целесообразным не подробное описание результатов расчётов с каждой из моделей проекта LakeMIP, а обобщение их результатов с увеличением доли дискуссии, приходящейся на собственно модель LAKE. Это сделало бы текст более компактным и лучше соответствующим задачам диссертации.
- Утверждение 2 раздела 2.8.2 следовало бы сформулировать более точно. По-видимому, под словами о необходимости второго порядка точности по пространству и времени автор имел в виду желательность такого порядка для большей вычислительной эффективности модели.

- Смысл включения в главу результатов вихреразрешающего моделирования (раздел 2.12) непонятен.
- Требуется дополнительное пояснение утверждение на с. 93 о том, что различие результатов вычислений профиля температуры озера может быть обусловлено только разными схемами приводного слоя и учётом/неучётом потока тепла в донные отложения. Почему, например, оно не может быть вызвано различием схем переноса радиации в озере или различием схем расчёта баланса энергии на его верхней границе?
- Средние (а не среднеквадратичные) ошибки на рис. 2.13, 2.15, 2.16, 2.19 и 2.21 имеют один и тот же знак для всех моделей. Означает ли это, что все модели характеризуются систематической ошибкой одного и того же знака для переменных, изображённых на этих рисунках? По моему мнению, этот результат заслуживает дополнительного обсуждения.
- Неудачным является обсуждение результатов включения параметризации сейш на с. 146, т.к. сама эта параметризация обсуждается только в гл. 3.
- В табл. 2.1 следует указать размерности величин. Табл. 2.2 целесообразно пополнить описанием схем переноса радиации в озере.
- Переменные ρ_{sn} в (2.41) и ρ_s в (2.49) не определены.
- Ссылки на рисунки в работе даны не по порядку. Сначала (с. 97) обсуждается рис. 2.14, а только потом (с. 101) — рис. 2.13. Рис. 2.19 в тексте вообще не обсуждается.
- Предложение "Так же, как и для потока явного тепла, суточный ход потока скрытого тепла для всех месяцев в период с мая по сентябрь имеет близкую форму" на с. 122 нечитаемо.
- Смысл переобозначений $F_V \equiv F_1$, $F_C \equiv F_2$ и т.д. в тексте сразу после формулы (2.104) требует пояснения.

4. К главе 3:

- Формулировка замыкания горизонтально–осреднённых одномерных уравнений движения в замкнутом водоёме с целью параметризации роли горизонтального градиента давления выполнена лишь для случая плоского дна. Как следствие, её использование в модели LAKE, строго говоря, не позволяет утверждать, что эта модель строго учитывает наклон дна.
- Предложение на с. 179 "В то же время для термоклина и перемешанного слоя отношение (3.40) имеет одинаковый порядок, поскольку для них характерна (для не очень глубоких водоемов) толщина одного порядка, и кроме того они делят общую границу (так что изменение их толщин во времени по меньшей мере, в суточном ходе одинаково, но противоположно по знаку)" нечитаемо.

5. К главе 4:

- Подобно гл. 2, гл. 4 требует улучшения структуры. Верификация биогеохимического блока модели LAKE проводится для озёр, отличных от использованных в гл. 2. Как следствие, часть гл. 4 посвящено верификации воспроизведения термических и гидродинамических процессов в одном из вновь исследуемых озёр — оз. Куй-ваярви. Более уместно было бы отнести этот материал к гл. 2. При этом подобная верификация для оз. Щучье, данные измерений для которого также привлекаются в гл. 4, не проведена вообще. Как следствие, для оз. Щучье затруднительно сделать вывод о влиянии термических и циркуляционных особенностей (а также о влиянии ошибок воспроизведения этих особенностей моделью) на характеристики производства и выделения метана. Кроме того, в гл. 4 возникают новые группы численных экспериментов с моделью (IS+: внутренние сейши параметризованы по Годсмиту и др.; GV+: внутренние гравитационные волны параметризованы по Меллору). Эти численные эксперименты уместно было бы рассмотреть в гл. 2 и 3.
- На с. 229 указано, что начальный радиус пузырьков в озере r_{b0} пред-

писан. Целесообразными являются также расчёты с распределением для r_{b0} .

- Целесообразным также является анализ чувствительности эмиссий парниковых газов из озера к значению радиуса пузырька, при котором пузырёк делится на два (сейчас этот радиус равен 0.5 мм).
- В будущем желательно расширить модель интерактивным вычислением содержания α -хлорофилла в воде. В используемой в диссертации версии модели это содержание предписано (раздел 4.3.5), хотя оно напрямую связано с характеристиками биогеохимических процессов в озере.
- На с. 216 говорится о том, что "вследствие диффузии ацетат и другие компоненты субстрата распространяется ниже" в слое подозёрных отложений. Строго говоря, здесь следует говорить не о диффузии, а о процессах (напр., биотурбация или криотурбация), которые ввиду недостаточности современных знаний о них в моделях донных отложений и почвогрунта представляются в виде искусственной диффузии.
- На с. 224 не определены переменные k_1 и k_2 .
- Цитирование приложений идёт не по порядку: сначала цитируется Приложение Е, а лишь потом — Приложение Д.

6. К "Заключению":

- В п. 4 раздела "Итоги исследования" обсуждается зависимость типа используемых уравнений движения (либо с кориолисовым слагаемым, либо с параметризацией сейш) в зависимости от размеров озёр. Целесообразно дополнить это обсуждение обсуждением аспектов включения модели озёр в глобальную модель Земной системы с учётом того, что разные водоёмы в одной и той же вычислительной ячейке могут иметь относиться к разным группам по отношению к типу уравнений движения.

- В п. 5 этого же раздела утверждается: ". . . несмотря на наличие множества биогеохимических констант, модельный поток метана в атмосферу эффективно контролируется одним параметром — множителем, определяющим интенсивность генерации метана в донных отложениях" . При этом, однако, осталась неисследованной роль значения радиуса пузырька, при котором пузырёк делится на два (см. одно из замечаний к гл. 4).

В качестве замечания ко всему тексту работы следует отметить:

- Выносимое на защиту положение 1 сформулировано недостаточно точно. Строго говоря, система общих точных одномерных уравнений термо- и гидродинамики и биогеохимии водоёма в работе не получена. Например, на с. 24 указано, что в работе не рассматриваются процессы, характерные для глубоких озёр. Пренебрежение слагаемым $\partial(\overline{w'f'})/\partial z$ в (2.11) также снижает общность полученных уравнений. Наконец, исключение метилотрофной биохимической цепочки (с. 214) исключает засоленные озёра. Тем не менее, следует согласиться с автором, что полученные в работе уравнения термических, гидродинамических и биохимических процессов в водоёмах являются достаточно общими в одномерном случае.
- Большая часть диссертации посвящена версии модели с $k-\varepsilon$ -замыканием. Однако в разделе "Приложение результатов работы" указано, что в модель общей циркуляции ИВМ РАН включён вариант с соответствующим замыканием Хендерсон–Селлерс и конвективным приспособлением, что связано с вычислительными ограничениями. При этом, во-первых, на с. 34 автор критикует это замыкание, справедливо утверждая, оно справедливо только для нейтральной и устойчивой стратификации и именно поэтому требует введения схемы конвективного приспособления. Во-вторых, из общей структуры диссертации следует, что в модель общей циркуляции включена схема, не прошедшая столь интенсивной верификации, как схема с $k-\varepsilon$ -замыканием. В-третьих, хотелось бы услышать комментарии автора о дальнейшем использовании варианта модели озе-

ра именно с $k - \varepsilon$ -замыканием.

- Работа оформлена недостаточно аккуратно. В ней много сленга и слов, являющихся дословным переводом с английского (напр., "ипостась" на с. 14, "дурная репутация" на с. 17, "узкое горлышко" на с. 282). Ряд рисунков (2.2, 2.3, 2.31, 4.15) включает слова на английском языке. Ссылки на литературу даны не в едином стиле. Текст работы изобилует пунктуационными ошибками. Наконец, ещё раз отмечу примеры неаккуратного оформления, указанные в замечаниях к отдельным главам.

Приведённые выше замечания к диссертации ни в коей мере не умаляют её значимости и не снижают общего положительного впечатления о ней. Представленная работа выполнена на уровне, достаточном для признания совокупности изложенных в ней результатов как крупного научного достижения, соответствующего пп. 1 ("Строение и физика водоемов суши"), 7 ("Воды океанов, морей и водоемов суши"), 8 ("Взаимодействие гидросферы, атмосферы и литосферы") и 12 ("Природные ресурсы гидросферы") паспорта специальности 25.00.29 по номенклатуре ВАК.

По теме диссертации опубликована 26 статей, из них 24 — в изданиях, включённых в список п. 2.3 "Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова". Результаты работы были представлены на целом ряде различных конференций. Всё это говорит о достаточной апробации работы.

Потенциальными потребителями результатов диссертационной работы являются различные организации Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Росгидромета, других ведомств.

Текст автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.29 — "физика атмосферы и гидросферы" и критериям, определенным пп. 2.1–2.5 "Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова", а также оформлена согласно приложениям № 5 и 6 "Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова".

Таким образом, соискатель В.М. Степаненко заслуживает присуждения учёной степени доктора физико–математических наук по специальности 25.00.29 – "физика атмосферы и гидросферы".

доктор физико–математических наук,
ведущий научный сотрудник кафедры физики атмосферы
физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
ЕЛИСЕЕВ Алексей Викторович

А.В.

Дата: 30.10.2012

Контактные данные:

тел.: +7 916 589-65-48, e-mail: eliseev.alexey.v@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

Адрес места работы: 119991, Россия, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,
стр. 2, МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Тел.: +7 495 939-16-82; e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись сотрудника физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова А.В. Елисеева удостоверяю

Декан физического факультета

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор



Н.Н. Сысоев.

Дата: 01.11.2012