

## 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 математическому моделированию температурного режима водоемов суши и динамики растворенных в их водах газов. Автором предложены оригинальные параметризации физических процессов в озерах для использования в численных моделях, а также впервые обоснована возможность адекватного воспроизведения термики озер и их тепло- и газообмена с атмосферой в рамках одномерного приближения.

Известно, что водоемы суши вносят существенный вклад в балансы тепла, водяного пара и газов (в том числе парниковых) и их потоки между атмосферой и подстилающей поверхностью в глобальных масштабах. Вместе с этим, многочисленные озера мира, большинство из которых имеют относительно малые размеры, не разрешаются современными климатическими моделями. Учет роли малых водоемов требует значительных специальных усилий. Теоретически, для этих целей желательно было бы обеспечить сопряжение климатической атмосферной модели с полными трехмерными моделями всех и каждого подстилающих озер, подобно тому, как это делается для морей и океанов. Но, в силу многочисленности и разнообразия озер, сделать это (по крайней мере в настоящее время) невозможно, поэтому используются упрощенные подходы, среди которых – параметризации процессов в озерах с помощью одномерных численных или даже аналитических решений. Использование таких параметризаций позволяет снабдить климатическую модель необходимыми для ее работы

граничными условиями на той части поверхности Земли, которая приходится на озера и водоемы, без особого увеличения вычислительных затрат. Вместе с этим, такой подход сталкивается с определенными трудностями. Как в одномерном приближении физически корректно учесть принципиально неоднородные процессы, такие, например, как влияние горизонтального градиента давления (в том числе, связанного с сейшевыми колебаниями) на вертикальный профиль скорости? Всегда ли этот профиль можно интерпретировать, как результат горизонтального осреднения по площади, и какова роль размеров озера и его морфометрических характеристик? Как в одномерной модели лучше параметризовать коэффициенты турбулентного перемешивания? Этому, безусловно, важному кругу вопросов и посвящена диссертационная работа В.М. Степаненко.

В Главе 1 автор приводит краткий обзор современного состояния вопроса, причем основное внимание уделено численному моделированию озер. Глава 2, которая, вероятно, является центральной частью диссертации, посвящена формулировке и обоснованию одномерного приближения при численном моделировании термогидродинамики озер. Автор начинает с того, что аккуратно выводит одномерные уравнения движения и теплообмена посредством горизонтального осреднения трехмерных уравнений. Хотя физический смысл одномерной модели озера интуитивно понятен и, как кажется, не требует особого обоснования, подобный строгий вывод уравнений, безусловно, полезен. Другим важным результатом этой главы является параметризация баротропного градиента давления, допускающая воспроизведение сейш. Здесь же представлены все основные уравнения и граничные условия авторской модели, обсуждены некоторые вычислительные аспекты, а также описана схема замыкания турбулентности. Продолжается глава весьма подробным и обстоятельным сравнением результатов применения модели автора к двум конкретным озерам с результатами нескольких других известных моделей и с натурными данными. Завершающая часть Главы 2 посвящена моделированию «заглубленного максимума

температуры» на примере камчатского озера Большой Виллой. Подобные максимумы в вертикальных профилях температуры иногда наблюдаются в стратифицированных по солености озерах и играют там значительную роль как в формировании термохалинного режима и обменов озера с атмосферой, так и по отношению к состоянию биоты. Их происхождение связано с аккумуляцией тепла в подповерхностном слое на глубинах, куда, при достаточной прозрачности воды, еще проникает значительная часть солнечной радиации, но откуда тепло выносится слабо из-за подавления турбулентного перемешивания устойчивой плотностной стратификацией. Предложен оригинальный механизм «накачки» тепла в подповерхностный слой, связанный с фазовым сдвигом между суточными циклами солнечной радиации и толщины верхнего перемешанного слоя. Глава 3 диссертационной работы полностью посвящена параметризации гравитационных и инерционных колебаний (сейш - как поверхностных, так и внутренних) в одномерных моделях озер. С этой целью автором обосновано и выполнено обобщение параметризации градиента давления, предложенной в предыдущей главе, на случай многослойного по плотности водоема. Показано, что в больших озерах, горизонтальные масштабы которых значительно превышают радиус деформации Россби, гравитационные колебания играют второстепенную роль по сравнению с эффектами вращения, однако в малых водоемах необходимо включать в осредненное одномерное уравнение движения горизонтальный градиент давления. В конце этой главы приводятся результаты применения одномерной модели, учитывающей сейшевые колебания, к озеру Валькеа-Котинен в Финляндии. В Главе 4 диссертации представлена достаточно комплексная биогеохимическая модель генерации и переноса парниковых газов (метана и двуокиси углерода) в озерах. Несмотря на то, что эта модель использует для параметризации составляющих соответствующих балансов множество эмпирических соотношений и калибровочных параметров, автору удается достичь впечатляющей близости результатов моделирования и данных натурных наблюдений, выполненных на

двух озерах (Щучье в Восточной Сибири и Куйварве в Финляндии). На этой основе сделаны выводы о том, что объемы эмиссии метана озерами определяется прежде всего скоростью его производства в донных отложениях, однако характеристики турбулентного перемешивания в термоклине также критически влияют на ее интенсивность. В заключительной части диссертации автор указывает на возможные приложения ее результатов и обсуждает перспективы дальнейшего развития этого направления исследований.

Диссертационная работа В.М. Степаненко представляет собой законченное исследование актуальной и практически важной проблемы. Результаты работы образуют своего рода «инструментарий» для численного моделирования озер (как в отдельности, так и в сочетании с атмосферными климатическими моделями), который в конечном итоге позволит выйти на новый уровень понимания процессов, происходящих в водоемах суши, и их вклада в формирование климатических изменений. При выполнении работы автором продемонстрирован высокий уровень научной квалификации. Вынесенные на защиту результаты широко опубликованы в хороших журналах, доложены на известных международных и российских научных конференциях. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Актуальность избранной темы, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна никаких сомнений не вызывают.

По содержанию работы и представленных в диссертации результатов можно высказать и некоторые критические замечания.

Замечания общего характера:

1. Несмотря на то, что в диссертации цитируются 416 литературных источников, обзор современного состояния проблемы в Главе 1 не показался мне исчерпывающим. Большая часть вводной главы отведена различным аспектам математического моделирования водоемов суши, в которых прекрасно разбирается автор, и только 7 первых страниц – стоящим на

повестке дня общим вопросам лимнологии вообще. Конечно, это отчасти объяснимо, поскольку диссертационная работа целиком основана на моделировании - но ведь моделирование является не целью, а средством, которое предстоит применить для решения актуальных задач. В докторской диссертации, посвященной термическому состоянию водоемов суши и режиму растворенных газов в озерах, не лишним было бы упомянуть хотя бы коротко в обзорной главе о таких важных объектах, как, например, Байкал и его метановые сипы или современное Аральское море - один из крупнейших в мире анаэробных бассейнов с высокими концентрациями растворенных сероводорода и метана. К слову сказать, Аральское море является, вероятно, «мировым рекордсменом» и по величине заглубленного максимума температуры, который составляет один из центральных предметов исследования в диссертации. Амплитуда этого максимума достигает в западном бассейне Арала до  $12^{\circ}\text{C}$ , данные на эту тему опубликованы. Наверное, заслуживали бы упоминания в обзоре и газовая катастрофа озера Ниос, пересыхание озера Чад и другие проблемы в разных озерах мира, о которых есть сведения в литературе.

2. Некоторые из Положений, выносимых на защиту, сформулированы, с моей точки зрения, не самым оптимальным образом. Это относится, например, к Положению 1. Кажется очевидным, что если есть трехмерные точные уравнения, то они всегда могут быть приведены посредством интегрирования (или, что то же самое, осреднения) по горизонтальным координатам к одномерному виду, который может считаться точным настолько, насколько точно выполнено это осреднение. Нетривиальный вывод состоит не в этом, а в том, что можно физически корректно включить в одномерную модель существенно неодномерные явления. Также, с моей точки зрения, не совсем правильно называть существующие одномерные модели частными случаями точного уравнения. Скорее они являются приближениями к нему. В Положении 3 в качестве главных физических факторов образования «максимума температуры» перечислены едва ли не все существующие в

озерах тепловые потоки, что до некоторой степени снижает информативность высказывания. Кроме того, читателю этого Положения, не знакомому с полным текстом диссертации, трудно понять, о каком максимуме тут вообще идет речь.

3. Я не сумел до конца оценить логику построения параметризации сейш, которой полностью посвящена Глава 3. Казалось бы, использование введенного в Главе 2 способа параметризации горизонтального градиента давления (который является вполне естественным с физической точки зрения и возражений не вызывает) должно автоматически приводить к колебательным режимам в одномерном профиле скорости, то есть к сейшам? Разве этого недостаточно? Способ же введения сейш, описанный в Главе 3, кажется несколько искусственным - градиент давления фактически «вручную» задается в виде гармонических функций, и уже потом этот градиент давления порождает соответствующие решения для скорости. В таком случае разве нельзя с тем же успехом сразу вручную же внести сейшевое колебание прямо в профиль скорости? К способу параметризации сейш есть и другие вопросы. Насколько я понимаю, такое их построение в принципе применимо только для одноузловой сейши, или главной моды. Между тем известно, что во многих озерах (по крайней мере, в достаточно больших) важную роль играют многоузловые сейши – как быть с ними?

4. Модель газового режима, изложенная в Главе 4, стремится охватить весь комплекс процессов, влияющих на состояние растворенных газов в толще водоема и в донных отложениях и на их эмиссию в атмосферу – что является, конечно, достоинством модели. Вместе с этим это влечет за собой необходимость опираться на довольно большой набор калибровочных параметров и коэффициентов, а также на целый ряд упрощающих предположений. Проводились ли автором эксперименты, направленные на оценку чувствительности результатов моделирования по отношению к изменениям всего набора этих параметров?

Более частные замечания:

Раздел 2.13.1. Не первичная продукция приурочена к максимуму хлорофилла, а наоборот.

Раздел 2.13.3 – почему не показаны измеренные в озере профили температуры и солености, использовавшиеся в качестве начальных условий для модели?

В разделе 2.13.7 приводятся интересные оценки компонентов “теплового баланса” слоя заглубленного максимума температуры. При этом солнечная радиация и турбулентная теплопроводность сравниваются с оттоком тепла в донные отложения. Но ведь слой максимума температуры не соприкасается с дном – тепло из него сначала отводится в нижележащую часть водной колонны за счет теплопроводности и лишь потом, возможно, передается в донные отложения. Тогда имеет ли смысл такое сравнение?

Раздел 4.2.3 – «В модели принято, что температура пузырька равна температуре воды на глубине, где он в данный момент находится» - Насколько мне известно, в некоторых других подобных моделях процесс «всплывания» пузырьков считается адиабатическим, то есть температура пузырька в процессе подъема к поверхности уменьшается. В какой мере сделанное предположение влияет на результаты моделирования, и что изменится, если вместо этого предположения ввести адиабатическое охлаждение?

Вывод 2 (с. 284) – «термический режим эстуария», так же и в автореферате - какого эстуария? Действительно, сходный описанному в работе механизм образования подповерхностного максимума температуры может реализовываться и в стратифицированных эстуариях, но в диссертации речь идет не об эстуариях, а о водоемах суши, поэтому лучше этот термин здесь не использовать во избежание путаницы.

В нескольких местах: в русскоязычной литературе обычно используется термин «аспектное соотношение» (а не «отношение аспекта»).

Высказанные замечания, однако, ни в коей мере не снижают общей высокой оценки работы. 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, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

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 географических наук,  
член-корреспондент РАН,  
заместитель директора ФГБУН  
«Институт океанологии им. П.П.  
Ширшова РАН»



Завьялов Петр Олегович

29/10/2018 г.

Контактные данные: Тел. (7-916) 9326452,

Е-мэйл: [peter@ocean.ru](mailto:peter@ocean.ru) Специальность, по

которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 25.00.28 –

«Океанология», Адрес места работы:

117997, г. Москва, Нахимовский просп., д.

36, ФГБУН «Институт океанологии им.

П.П. Ширшова РАН» Тел. +7-499-124-

5994, Е-мэйл [peter@ocean.ru](mailto:peter@ocean.ru)

*(Завьялов П.О.)*