

**Отзыв**  
**официального оппонента на диссертационную работу**  
**Богомолова Василия Юрьевича**  
**«Параметризация внутренних водоемов в модели Земной системы»**  
**по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные**  
**методы и комплексы программ»**  
**на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

**Актуальность темы исследования.** Развитие численного моделирования климатических процессов в настоящее время переживает период подъема, причиной которого является ряд очевидных последствий глобальных климатических изменений, связанных с увеличением средней температуры атмосферы Земли. Наиболее важным направлением является численные исследования климата Земли на основе созданных многомодульных моделей Земной системы, включающих атмосферу, океан, лед и сушу в качестве основных компонент системы. Совершенствование вычислительных технологий позволяет увеличивать разрешение таких моделей, что в свою очередь требует явного описания многих мезомасштабных процессов, в том числе и формирование локальных погодных условий вблизи внутренних водоемов.

Создание и развитие методов описания таких процессов является необходимым этапом исследования климата Земной системы. Исторически работы в этом направлении велись с начала прошлого века и во многом были основаны на наблюдениях. Однако, прогноз дальнейшего развития на масштабах от нескольких дней (прогноз погоды) до столетий невозможно осуществлять без надежных численных реализаций на современных суперкомпьютерных системах, а исследования отдельных механизмов формирования погоды и климата все более направлены на конечную реализацию в виде модулей и параметризаций для моделей глобального климата.

**Цель диссертационной работы** – построение параметризации водоемов суши, пригодной для использования в климатических моделях, т.е. способной качественно воспроизводить основные характеристики взаимодействия водных

объектов с компонентами климатической системы при минимальном расходе вычислительных ресурсов. Для достижения этой цели автор предлагает разработанную с его участием одномерную модель термодинамики водоема, сочетающую вычислительную простоту с физической обоснованностью. Корректность созданной модели подтверждается рядом численных экспериментов как в идеализированных постановках, так и на примере реальных озер. Результаты использования данной параметризации в рамках климатической модели ИВМ РАН также обсуждаются в представляемой работе.

**Наиболее значимые теоретические и практические результаты.** В результате сравнения результатов использования различных способов турбулентного замыкания, исследования сходимости численного решения, создана вычислительно эффективная модификация одномерной модели водоема. Новый инструмент позволяет более полно исследовать вклад малых водоемов в энергетический и углеродный баланс деятельного слоя и в формирование регионального климата.

**Научная новизна.** Предложенный автором способ учета турбулентности на основе параметризации Хендерсон-Селлерс со схемой конвективного приспособления показал свою эффективность при возможности использования больших шагов по времени, характерных для климатических моделей. Результаты верификации показывают, что рассчитанная температура поверхности озер близка к реальным значениям, причем результаты оказались одинаково приемлемыми для разных широт.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертации обеспечивается применением современных вычислительных методов моделирования. Благодаря продуманной серии численных экспериментов удалось убедительно обосновать выводы диссертации.

Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение и список литературы на 77 наименований.

Во **введении** автор обосновывает актуальность проблемы качественного описания внутренних водоемов суши в моделях прогноза погоды и в моделях

климатической системы Земли. Говорит о целях представляемой работы, новизне подходов и представляемых результатов, практической и теоретической ценности работы, описывает структуру глав диссертации. Описывая существующие подходы для решения задачи описания внутренних водоемов автор демонстрирует хорошие знания опыта различных направлений и школ, теоретическую подготовленность и способность выдвигать и обосновывать свои предположения и гипотезы. Однако, в связи с тем, что в диссертации в дальнейшем предлагается одномерная модель, следовало бы более подробно остановиться на одномерных моделях: в чем общность и отличие существующих подходов, каковы недостатки, где и кем используются, в чем уникальность предлагаемой параметризации.

В **первой главе** приводится общее описание модели LAKE и ее численная реализация. Из текста, правда, непонятно, каково участие автора в создании и развитии модели. Приводящиеся здесь ссылки относятся лишь к отдельным деталям модели, более общая ссылка на авторов модели «в целом» отсутствует. Далее автор подробно останавливается на способах турбулентного замыкания. Поскольку эффективность разработанной параметризации предполагает быструю сходимость алгоритма вычислений, далеко не всякое замыкание приемлемо, даже если оно достаточно точное. Автор сравнивает используемые ранее в модели LAKE три варианта замыкания  $k-\epsilon$ , со схемой Хендерсон-Селлерс, В связи с тем, что последняя работает только в условиях устойчивой стратификации, дополнительно вводится процедура конвективного приспособления. На примере эксперимента Като-Филлипса, показано, что параметризация Хендерсон-Селлерс с конвективным приспособлением оказалась более эффективной и достигает сходимости результатов вычислений к теоретическим значениям с меньшими затратами вычислительных ресурсов. Однако, эксперимент Като-Филлипса – ветровое перемешивание устойчиво стратифицированной жидкости, не отражает всего спектра особенностей формирования турбулентности в водоеме. Насколько эффективной будет предлагаемая параметризация в условиях осеннего



выхолаживания или в период весеннего прогрева (в пресноводном водоеме), когда турбулентность в основном формируется за счёт потоков плавучести.

По поводу данной главы есть ряд замечаний, которые относятся к оформлению. Стил ь изложения главы таков, что не позволяет человеку незнакомому с предметом разобраться в материале. Это относится, например,

1. к отсутствию единства обозначений в различных частях главы;
2. к недостаточному описанию вводимых обозначений;
3. к использованию нестандартных обозначений, например, для производных.

Например, на стр. 25 индексы  $i$  и  $j$  обозначают номер вертикального слоя и номер шага по времени, а на следующей странице эти же индексы обозначают компоненты тензора, при этом нет никаких комментариев. На стр. 17 вводится обозначение для отклонений в виде «штриха», а на последующих страницах опять же без комментариев в той же роли используется «тильда». На стр. 30-31 обсуждается некоторая величина  $k^*$ , но нигде нет объяснения, что это такое. Словом, если бы кто-то попытался повторить результаты автора, вряд ли бы ему это удалось из-за качества представленного описания.

На стр. 41 задается начальный профиль температуры  $T=2z+5$ , при этом рассматривается глубина 20 метров, из чего следует что от поверхности до этой глубины начальная температура меняется от 5 градусов на поверхности до 45 на дне, где могут реализовываться такие условия? Удивляет при этом, что далее будут использоваться константы характерные для океана. А на стр. 43 вообще говорится, что почему-то на поверхности нужно задавать 60 градусов.

На стр. 43-57 приводится длинная серия рисунков (всего 21 рисунок), некоторые из которых сильно отличаются, другие вообще не отличаются. В тексте эти рисунки почти не обсуждаются индивидуально. Каков же был смысл их приводить, может вместо использования 15 страниц, использовать одну с суммирующим описанием?

Во **второй главе** описывается программный комплекс для создания цифровой карты типов суши. Вопрос важный для практического моделирования климата, особенно в плане специальности 05.13.18, но на мой взгляд является



вспомогательным, поскольку представляемая работа имеет все же более теоретический и исследовательский характер. Можно было бы содержимое этой главы вынести в Приложение.

**Третья глава** посвящена вопросу включения развитой параметризации, как части модуля деятельного слоя суши в модели климата ИВМ РАН. На мой взгляд эта глава могла бы стать наиболее интересной частью работы. Автор показал, что включение новой параметризации оказало существенное влияние на результаты моделирования особенно в формировании потоков явного и скрытого тепла над сушей. Хорошо было бы в этом более подробно разобраться, и какое влияние это могло бы оказать в более отдаленной перспективе. Однако, большая часть этой главы, опять же посвящена в основном техническим проблемам взаимодействия программных модулей. Валидация модели почему-то проводится на примере крупных озер (Гурон, Виктория, Байкал и Ладога) для которых сама гипотеза о применимости горизонтального осреднения и метод мозаичного агрегирования представляются сомнительными, поскольку масштаб данных водных объектов не является вполне подсеточным.

Разумеется, сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая представляет собой существенный вклад в развитие климатического моделирования в России, где пока еще только единственная модель ИВМ РАН участвует в международных исследовательских программах по исследованию климата, между тем как количество участников, например CMIP-5, в мире около полусотни. Разработанная автором параметризация предназначена для описания эффекта внутренних водоемов в моделях климатических систем и может быть использована не только в модели ИВМ РАН, но в перспективе и в любой другой модели. Например, в разрабатываемой в нашем институте (ИВМиМГ СО РАН) модели климата промежуточной сложности. Автор показал себя как квалифицированный специалист в области математического моделирования и численных методов, способный к самостоятельной работе и к работе в научном коллективе при создании комплексов программ и пакетов приложений и в проведении исследовательских изысканий.

**Заключение.** Считаю, что диссертационная работа Богомолова В. Ю. «Параметризация внутренних водоемов в модели Земной системы» представляет законченное исследование и соответствует требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Богомолов Василий Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

Платов Геннадий Алексеевич

Дата: 30.09.2018

Доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы». Ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, тел. (383) 330-8783, e-mail: [secretary@sscc.ru](mailto:secretary@sscc.ru)

Контактная информация: тел. (моб.) 913-926-7491, e-mail: [Platov.G@gmail.com](mailto:Platov.G@gmail.com)

Подпись д.ф.-м.н., и.о. зав. лаб., в.н.с.

Платова Г. А. заверяю

И. о. ученого секретаря ИВМиМГ СО РАН, д.ф.-м.н.



Куликов И. М.

Дата: 30.09.2018