

**ОТЗЫВ официального оппонента на диссертацию**  
**на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Богомолова Василия Юрьевича на тему:**  
**"Параметризация внутренних водоемов суши в моделях Земной**  
**системы"**  
**по специальности 05.13.18 - "математическое моделирование,**  
**численные методы и комплексы программ"**

Диссертационная работа В.Ю. Богомолова посвящена физическому расширению модели термодинамических (и биогеохимических) процессов во внутренних водоемах суши, её верификации, внедрению в модель Земной системы Института вычислительной математики (ИВМ) РАН и проведению тестовых расчётов с этой моделью. Актуальность работы обусловлена необходимостью детализации описания взаимодействия атмосферы и деятельного слоя суши ввиду в современных моделях Земной системы ввиду появления новых задач, связанных с экологическими, биогеофизическими и биогеохимическими приложениями, а также ввиду постепенного улучшения пространственного разрешения моделей Земной системы.

Новизна представленной работы связана с внедрением наиболее детальной (из доступных в настоящее время) модели термодинамических и биогеофизических процессов процессов во внутренних водоёмах суши LAKE в единственную российскую модель Земной системы, основанной на модели общей циркуляции атмосферы. Принципиально важно, что автор представленной диссертационной работы лично внёс вклад в развитие модели LAKE, включив в неё схему конвективного приспособления.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи диссертации, кратко описываются структура работы и этапы её апробации.

Единственным замечанием к этой главе является опечатка на с. 4: говоря о проекте сравнения моделей Земной системы CMIP7, автор, по-видимому, имеет в виду проект CMIP6, расчёты в соответствии с условиями которого сейчас активно проводятся в центрах исследования климата, и результаты которого должны составить основу следующего (шестого) Оценочного отчёта Межправительственной группы экспертов по изменению климата.

Первая глава диссертации посвящена расширению модели LAKE за счёт включения в неё схемы конвективного приспособления в водном столбе и сравнению схем турбулентного замыкания в модели, в том числе в связи выбором временного шага и количества вертикальных уровней при интегрировании модели. Результаты этой главы свидетельствуют о высокой физико-математической эрудиции автора и его способности успешно решать сложные задачи, связанные с математическим моделированием характеристик окружающей среды.

В то же время, гл. 1 не свободна от недостатков, например:

- Сравнение схем турбулентного замыкания проводится в виде численного решения задачи Като-Филлипса. Не умаляя важности этого подхода, следует, однако, иметь в виду, что эта задача не учитывает эффектов вращения Земли, потенциально важных для крупных водоёмов суши (например, Каспийского моря или озера Байкал). Влияние этих эффектов никак не обсуждается в представленной работе за исключением указания в конце с. 59 на неприменимость замыкания Хендерсон-Селлерс в случае стремления параметра Кориолиса к нулю.
- Выбор шага по времени и числа вычислительных уровней по вертикали проведён для единственного озера с фиксированной глубиной около 12 м (судя по рисункам).
- В разделе 1.6.5 верификация модели проведена только для периода с мая по ноябрь. При этом не вполне понятна реалистичность динамики в зимний период (подо льдом) и в период весеннего таяния льда.

К этой главе также можно высказать ряд редакционных замечаний:

- Разделы 1.1 и 1.2 являются избыточными. В них проводится описание модели LAKE, которое потом никак не используется при обсуждении результатов работы. При этом в разделе 1.2, посвящённом особенностям численной реализации модели LAKE, не указано, как расположены вертикальные уровни - равномерно по глубине или как-то иначе. Эта информация важна в связи с задачей раздела 1.6.
- Информация разделов 1.3 и 1.4, хотя и связана напрямую с решаемыми в работе задачами, также не используется при обсуждении результатов моделирования.
- Переменная  $X$  в формуле для числа Ричардсона на с. 31 в тексте работы не определена.
- Обозначения на рис. 1.5.2 и в соответствующем ему тексте различны. Это затрудняет чтение работы.
- Непонятно, как оценить количество необходимых итераций из информации рис. 1.5.3 (с. 38).
- На с. 38 утверждается, что при интегрировании модели LAKE в качестве атмосферного форсинга использовались данные реанализа ERA-Interim. Во-первых, здесь следует предостеречь автора от использования слова "форсинг", для которого в задачах о климате общепринятым является значение "мгновенное радиационное возмущающее воздействие", тогда как автор использует его в смысле "меняющиеся во времени граничные условия интегрирования". Во-вторых, следует указать, для какой географической точки и какого интервала времени использовались данные реанализа.
- В формуле для  $D_m$  на с. 40 следует указать размерности этой величины, а также размерности всех входящих в это выражение предикторов.
- Применение переменной  $\sigma^{k,k+1}$  (с. 482) требует дополнительного пояснения:  $T_{ij}^k$  и  $T_{ij}^{k+1}$  в зависимости от группы численных экспериментов

табулируются либо на разных вертикальных уровнях, либо в разные моменты времени.

- В расчётах раздела 1.6.2 на верхней границе озера задаётся температура 60°C - столь высокое значение не наблюдалась ни в одной точке на поверхности Земли за период инструментальных наблюдений. По-видимому, следовало бы проводить верификацию модели для более реалистичных условий.

- Рис. 1.6.1-1.6.7 недостаточно информативны, особенно в связи с весьма скупым их обсуждением в тексте работы. Возможно, целесообразным было бы привести часть этих рисунков в разностях друг от друга и более подробно обсудить их в тексте.

- Рис. 1.6.8., 1.6.11 и 1.6.12 стали бы нагляднее в случае использования как аргумента оси абсцисс либо шага по времени, либо числа вертикальных уровней в модели, а не номера эксперимента.

Задачей второй главы работы является создание программного комплекса с целью построения цифровой карты типов поверхности суши. При решении этой задачи автор работы проявляет как глубокое понимание задач моделирования Земной системы, так и высокую квалификацию в области создания программных продуктов. Первое обусловлено, например, заложенной в этот программный продукт гибкостью в отношении возможного использования не только для модели ИВМ РАН, но и, в принципе, для любой другой модели Земной системы. В свою очередь, достичь этой гибкости в рамках программного кода возможно только при высокой квалификации программиста-исследователя. Можно ожидать широкого применения этого программного продукта для различных моделей Земной системы - как российских, так и зарубежных.

Единственное замечание к гл. 2 носит редакционный характер: используемый на с. 77 коэффициент сжатия  $KC_i$  в тексте работы не определён.

Глава 3 работы посвящена включению разработанной модели термодинамических и биогеофизических процессов в озеро в детальную модель Земной системы. Результаты этой главы являются пионерскими - расширенная автором модель Земной системы является первой в мире, в которой указанные процессы во внутренних водоёмах суши учитываются физически корректным образом. Уже одно это позволяет очень высоко оценить представленную диссертацию.

К сожалению, однако, проведённая в этой главе верификация построенной модели Земной системы явно недостаточна. В частности, в ней проводится лишь сравнение вновь построенной версии модели Земной системы и её предыдущей версии, в которой внутренние водоёмы суши были представлены в виде очень тонкого слоя воды. Сравнение с данными наблюдений глава не содержит вообще (см. рис. 3.4.2-3.4.4).

Кроме того, к гл. 3 можно высказать ряд редакционных замечаний:

- Подобно уже сказанному в отношении разделов 1.1 и 1.2 работы, раздел 3.1 ничего не даёт для понимания результатов диссертации и может быть исключён из работы без какого-либо ущерба для неё. Попутно отмечу, что этот раздел содержит лишь описание динамического ядра модели ИВМ РАН, но не содержит описания её физических параметризаций, таких как перенос радиации в атмосфере, схемы описания пограничного слоя атмосферы или конденсации в ней), которые были бы потенциально более полезны для интерпретации результатов работы. Примерно половина информации раздела 3.1.1, связанная с описанием процессов в почвогрунте, также вряд ли может быть использована для обсуждения результатов, полученных автором.

В качестве замечания ко всему тексту работы следует отметить:

- Диссертация содержит ряд избыточного материала, при этом не упоминает ряд важных для понимания её результатов аспектов (см. примеры выше), а также отличается чрезмерной скупостью обсуждения полученных автором результатов.

- Текст работы изобилует грамматическими и пунктуационными ошибками.

- Работа оформлена не очень аккуратно, что затрудняет чтение. Одним примером этого являются, например, номера формул, прижатые к самим формулам. В качестве другого примера можно привести неупорядоченный по алфавиту список литературы, при том, что в работе в качестве метода цитирования используется шаблон "Автор, год".

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 того, чтобы совокупность изложенных в ней результатов оценить как решение задачи, имеющей существенное значение для задач в соответствии с паспортом специальности 05.13.18 - "математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" по номенклатуре ВАК.

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 8 - в изданиях, включённых в список ВАК для кандидатских диссертаций. Результаты работы были представлены на целом ряде различных конференций. Всё это говорит о достаточной апробации работы.

Потенциальными потребителями результатов диссертационной работы являются различные организации Российской академии наук, Росгидромета, Министерства науки РФ, других ведомств.

Текст автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18 - "математическое моделирование, численные методы и комплексы программ", а также критериям, определенным п. 9 "Положения о порядке присуждения учёных степеней", предъявляемым Высшей аттестационной комиссией к кандидатским диссертациям.

Таким образом, соискатель В.Ю. Богомолов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - "математическое моделирование, численные методы и комплексы программ".

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

Дата: 28.09.2018

Контактные данные: тел.: 7(916)5896548, e-mail: eliseev@ifaran.ru

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](mailto: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

МГУ,

д.ф.-м.н., профессор



Н.Н. Сысоев.

Дата: 28.09.2018