

*Утверждаю*

И.о. директора

ФГБУ «Гидрометцентр России»

к.ф.-м.н.

Д.Б. Киктев



“ 25 ” сентября 2018 г.

## **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного учреждения

«Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

**на диссертационную работу Богомолова В.Ю.**

**«Параметризация внутренних водоемов суши в модели Земной системы»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность.** В настоящее время развитие моделей, описывающих изменения климата идет по пути включения описания ранее не учитываемых процессов, происходящих в Земной системе. Применявшиеся ранее совместные модели атмосферы и океана постепенно «обрастают» все новыми и новыми блоками (процессы, связанные с малыми газовыми составляющими, морским льдом, биохимии океана, детальным описанием процессов на поверхности суши). В современной литературе постепенно закрепился термин «модель Земной системы». Работа Богомолова Василия Юрьевича посвящена включению одномерной модели озера в климатическую модель ИВМ РАН, в которой ранее отсутствовал учет тепло- и влагообмена атмосферы с внутренними водоемами. Модели внутренних водоемов в настоящее время включены в большинство современных моделей климата и прогноза погоды, поэтому данная работа является весьма своевременной и актуальной.

**Новизна.** В диссертации впервые выполнено сравнение результатов использования различных турбулентных замыканий в модели озера, как в идеализированных, так и реальных расчетах. Автором исследована сходимость численного решения для одномерной модели водоема в идеализированных расчетах и расчетах реального водоёма при использовании различных турбулентных замыканий. Создан оригинальный программный комплекс,

позволяющий в автоматическом режиме создавать карту распределения площадей и глубин водоемов на сетке климатической модели с дальнейшей коррекцией маски типов суши модели. В климатическую модель ИВМ РАН интегрирована термодинамическая одномерная модель водоема.

**Научная и практическая значимость.** В работе показана возможность качественного воспроизведения термического режима водоемов при использовании достаточно простой параметризации коэффициента теплопроводности и достаточно больших шагов по времени в рамках климатической модели ИВМ РАН. Автором создана вычислительно эффективная модификация одномерной модели водоема для использования в системах прогноза погоды и моделирования климата. В результате в климатической модели ИВМ РАН обеспечена возможность исследования вклада водоемов в энергетический и углеродный баланс деятельного слоя почвы и в формирование регионального климата атмосферы.

Диссертация В.Ю.Богомолова включает в себя введение, три главы, заключение и список литературы. Объем диссертации составляет 107 страниц, список литературы включает 77 источников.

Во **введении** приводится обзор современных подходов к параметризации процессов во внутренних водоемах, указывается на необходимость использования большого шага по времени в параметризации. В итоге автор обосновывает актуальность работы. Формулируются цели и задачи диссертационного исследования, приводятся положения, выносимые на защиту, научная новизна работы, её теоретическая и практическая значимость.

**Первая** глава содержит исследования чувствительности численного решения одномерной модели водоема LAKE к пространственному и временному разрешению и сходимости применяемой конечно-разностной схемы к точному модельному решению при использовании турбулентного замыкания  $k - \epsilon$  и параметризации Хендерссон-Селлерс.

В ней автор описывает включение в модель водоема LAKE параметризации коэффициента теплопроводности Хендерссон-Селлерс для устойчивой стратификации и предложенную автором схему конвективного приспособления водоема. Приводится блок-схема предложенного алгоритма.

Анализ и оценка условий сходимости численного решения модели проводилась на основе двух численных экспериментов: идеализированный эксперимент Като-Филлипа и эксперимент для озера Куйваярви (Финляндия).

Основным результатом данной главы является то, что в качестве модели турбулентной теплопроводности можно использовать параметризацию Хендерссон-Селлерс, что в свою очередь позволяет использовать большие шаги по времени, требуемые из соображений вычислительной эффективности климатического моделирования, без существенной потери

точности определения температуры поверхности воды и стратификации в водоеме в сравнении с более сложным турбулентным замыканием  $k - \varepsilon$ .

**Вторая** глава включает в себя описание созданного автором на языке FORTRAN комплекса программ подготовки маски и глубин для параметризации внутренних водоемов в климатической модели. Данный пакет программ позволяет создавать карту распределения площади водоемов и глубин на сетке модели с коррекцией распределения типов суши, а также в дальнейшем использовать базу данных водоемов и их глубин для запуска климатической модели с различным пространственным разрешением. Отметим, что наличие подобного пакета позволяет использовать разработанную автором параметризацию и в других глобальных и региональных моделях общей циркуляции атмосферы, в том числе, предназначенных для долгосрочного прогноза погоды. В диссертации приводится описание работы пакета, в т.ч. схема взаимодействия его компонент.

**Третья** глава посвящена включению параметризации водоемов в модель Земной системы ИВМ РАН, а также проверке и анализу результатов численных экспериментов, выполненных с обновленной таким образом моделью ИВМ РАН.

В данной главе автором описан процесс создания вычислительно эффективной модификация одномерной модели водоема для использования в системах прогноза погоды и моделирования климата.

Так же решены вопросы, связанные с включением однопроцессорной параметризации водоема в сложную структуру программного комплекса климатической модели, работающей на параллельных вычислительных системах. Автор показал, что включение новой базы данных водоема и новой параметризации водоема существенно меняет среднюю температуру поверхности суши, а также потоки явного и скрытого тепла, что неизбежно приводит к изменениям в климате модельной атмосферы.

Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений для некоторых больших озер показывает, что модель климата с включенной в него моделью озера удовлетворительно воспроизводит среднеклиматическую температуру этих озер.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и обозначены перспективы ее развития.

**Результаты диссертации** представлены в 14 публикациях, в том числе в 8 статьях в изданиях, входящих в актуальный список ВАК по защищаемой специальности.

**Обоснованность и достоверность работы** обеспечивается строгой математической постановкой задачи, детальным исследованием влияния сделанных упрощений, корректным использованием физических и географических данных, а также тем, что результаты исследований согласуются с зарубежными исследованиями аналогичной тематики.



К работе имеются следующие замечания:

1. Работу было бы логично дополнить сравнением климатологии крупных озер по данным модели LAKE, которую включил диссертант, с данными самой климатической модели ИВМ РАН, где эволюция состояния многих крупных водоемов также рассчитывается с помощью блока динамики океана с разрешением  $1 \times 0.5$  градуса.
2. Работу можно было бы дополнить анализом физических причин, по которым включение модели озера в климатическую модель привело именно к таким изменениям. Например, почему в высоких широтах озера в модели LAKE более теплые, а в тропиках – более холодные, чем при старом подходе, используемом в модели климата, когда озера трактовались как слой воды нулевой теплоемкости.
3. Работа не вполне удачно структурирована – первая глава имеет объем 56 страниц, вторая – 9 страниц, а третья глава занимает 17 страниц. Стоило бы разбить первую главу на две части, например, путем выноса п. 1.6 объемом в 29 страниц в отдельную главу.
4. Имеется некоторое количество мелких замечаний редакционного характера. Например, по нашему мнению, широко употребляемое автором слово «валидация», разъясненное во введении, вполне можно было бы во многих местах заменить на «проверка».

Однако высказанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации. Замечания 1 и 2 выходят за рамки специальности, по которой защищается диссертация, и скорее подсказывают направления дальнейшего развития выполненных автором исследований.

Диссертация написана достаточно ясным языком. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Дальнейшее развитие и использование полученных в диссертации результатов можно рекомендовать осуществлять в научно-исследовательских организациях и центрах по моделированию атмосферных процессов, в том числе, в организациях, занимающихся оперативным численным прогнозом погодных явлений: институтах РАН (ИВМ РАН, ИВМиМГ СО РАН, ИФА РАН), Росгидромета (ФГБУ "Гидрометцентр России", СибНИГМИ, ГГО), университетах (МГУ им. М.В.Ломоносова, РГГМУ).

Диссертация Василия Юрьевича Богомолова соответствует паспорту специальности 05.03.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (п.1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п.6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента», п.8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования»). Диссертационная работа В.Ю. Богомолова является научно-



квалификационной работой, в которой успешно решена задача включения модели внутренних водоемов в единственную отечественную глобальную климатическую модель. Эта задача имеет важное значение для развития математического моделирования процессов в Земной системе. Диссертация В.Ю. Богомолова отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, достоин присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Диссертация и отзыв на нее обсуждены и одобрены на межотдельском семинаре Отдела среднесрочных прогнозов и Отдела долгосрочных прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» 10 сентября 2018 г., протокол N5.

Доктор физ.-мат. наук

К.Г. Рубинштейн

Ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13

Тел. (499) 7952295 email: [k.g.rubin@googlemail.com](mailto:k.g.rubin@googlemail.com)

Подпись Рубинштейна Константина Григорьевича

Заверяю

Ученый секретарь ФГБУ «Гидрометцентр России», к.ф.-м.н.

123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13



Н.А. Шестакова