

# **ОТЗЫВ**

**официального оппонента**

**на диссертацию на соискание ученой степени**

**кандидата физико-математических наук**

**Майорова Павла Александровича**

**на тему: «Балансно-характеристический подход к численному  
моделированию гидродинамических течений со свободной поверхностью  
в гидростатическом приближении»**

**по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ**

## **Актуальность выбранной темы.**

Актуальность работы обусловлена практической значимостью решения задач о динамике слоистой жидкости со свободной границей. Задачи такого рода возникают на широком спектре пространственных масштабов – от технических конструкций до Мирового океана. Рассмотрение предела движений жидкости с ускорениями, малыми по сравнению с приведенным ускорением свободного падения, называемого гидростатическим (или, более точно, квазистатическим), имеет определенную научную и практическую ценность, так как именно такие движения отмечаются в морях и океанах, и именно в них сосредоточена основная часть кинетической энергии. При этом, как показывают наблюдения, в глубоком океане наблюдается ярко выраженная слоистость, ярким проявлением которой является существование придонных потоков антарктических вод, распространяющихся на огромные расстояния без смешения с окружающими водами. Воспроизведение таких течений в свободной океане представляет собой большую проблему для крупномасштабных моделей, имеющих, как правило, завышенные вычислительные вязкость и диффузию. Необходимость точно описывать слоистость океана требуется и в интенсивно развивающихся в настоящее время моделях биохимии океана.

### **Степень обоснованности положений, выносимых на защиту.**

На защиту выносятся 4 положения, связанные с формулировкой схем, основанных на схеме КАБАРЕ, для расчета течений жидкости в различных ситуациях, реализацией этих схем в виде комплекса программ расчета и обработки, и применением разработанного комплекса программ для решения задач, имеющих практическое значение. Представленные положения в достаточной степени обоснованы.

### **Достоверность и новизна полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов основана прежде всего на корректности используемого математического аппарата, на богатой истории применения схемы КАБАРЕ для различных практических задач, на большом числе численных расчетов в рамках диссертационной работы, и на сравнении результатов расчетов с данными лабораторных экспериментов.

Систематическое использование схемы КАБАРЕ для интегрирования системы уравнений «мелкой воды», двух- и многослойной жидкостей (с контролем обрушения внутренних волн) является новым результатом и представляет интерес как для разработчиков моделей крупномасштабной динамики океана, так и для специалистов в области прогноза паводков, наводнений, и динамики жидкостей со свободными поверхностями в технических сооружениях.

### **Содержание диссертации.**

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, и Заключения. **Введение** посвящено обзору работ в данной области, содержит обоснование актуальности темы работы. Ставятся цели диссертационной работы, приводятся положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения о публикациях и об апробации работы на семинарах и конференциях. Выделяется личный вклад автора, который в данном исследовании

представляется определяющим, что, в частности, можно увидеть по тексту диссертации, содержащим характерную для молодого ученого стилистику.

**Глава 1** направлена на решение осредненных по вертикали уравнений гидродинамики без предположений о постоянстве плотности жидкости (обобщение уравнений Сен-Венана). Работоспособность схемы КАБАРЕ иллюстрируется тестовыми расчетами в идеализированной постановке и в постановке, приближенной к задаче о приливе в Белом море.

**Глава 2** посвящена обобщению результатов первой главы на случай двухслойной жидкости. Экспериментально показано, как происходит потеря гиперболичности решения, что выражается в неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (обрушении внутренней волны).

**В Главе 3** рассматривается многослойная жидкость. Показывается, что механический перенос методики, применимой к двухслойной жидкости, приводит к практически нерешаемой задаче при решении характеристического уравнения степени 6 и более. Для устойчивости численной схемы важным этапом является перестройка сетки по вертикали. Особое внимание автор уделяет выполнению так называемого условия «сбалансированности» над неоднородным рельефом дна.

**Глава 4** посвящена обобщению разработанных ранее методов на трехмерный случай и на проведение многочисленных численных экспериментов по воспроизведению гравитационных течений, результаты которых сравниваются с лабораторными данными.

**В Заключении** формулируются основные результаты работы и указываются направления дальнейшего развития программного комплекса.

К замечаниям оппонента можно отнести следующее:

**Общее замечание** – в работе недостаточно аккуратно сделано сравнение предложенных методов по сравнению с другими подходами и с экспериментальными данными. Часто некоторые из подходов вообще не упоминаются.

**Замечание 1.** Во Введении достаточно много говорится про существующие океанские модели, однако нет никаких указаний на то, как в этих моделях описывается свободная поверхность океана. Между тем, в климатических расчетах учет изменения уровня океана, как за счет динамики самого океана, так и за счет разностей «осадки-испарение», «таяние-намерзание» морского льда, а также потоков пресной воды с материков (реки и материковые ледники) имеет принципиальное значение для обеспечения выполнения законов сохранения тепла, массы солей и пресной воды.

Далее, перечень крупномасштабных моделей динамики океана выглядит несколько поверхностным. Автор ограничивается тремя моделями, оставляя без внимания такие широко известные модели, как MOM (Лаборатория геофизической гидродинамики, США), FESOM (Институт им. А. Вегенера, Бремерхафен, ФРГ), ROMS и HYCOM. При этом модель MOM, версия 6, как и HYCOM, используют изопикническую вертикальную координату, что с физической точки зрения близко к идеологии рассматриваемой диссертационной работы. Модель FESOM также сформулирована в терминах произвольного Лагранжево-Эйлера подхода (ALE), что также можно трактовать как многослойную модель. Также в моделях HYCOM и MOM6 предлагаются методы контроля обрушения внутренних волн.

**Замечание 2.** На стр. 7 говорится о требовании к консервативности схемы с учетом действия ветра – это неверно, так как в этом случае консервативности нет в принципе.

**Замечание 3.** Почему ставится задача сохранения только импульса и массы (что не так сложно при использовании методов конечных объемов, и точной схемы по времени), и нет желания сохранять также и квадратичные инварианты, такие как энергия и энстрофия?

**Замечание 4.** Отдельно следует рассмотреть раздел 1.6. Задача о приливной динамике в Белом море. По существу, у оппонента имеется не одно, а несколько замечаний по этому разделу.

**4.1.** Как аппроксимируется сила Кориолиса и есть ли проблемы с ее учетом в рамках предложенного метода? В моделях с разнесенными сетками есть определенные проблемы, связанные с генерацией двухшагового шума в поле дивергенции скорости – и, значит, и в поле уровня океана. Кроме того, обычно требуется специальная пространственная аппроксимация для обеспечения двух квадратичных законов сохранения – кинетической энергии и энстрофии. Как эти вопросы решались в данной работе?

**4.2.** Нет описания граничного условия на границе с Баренцевым морем, в то время как постановка этого условия – одна из сложностей корректной постановки задачи о нелинейных приливах в незамкнутой области.

**4.3.** Автор пишет, что на береговой границе ставилось условие прилипания. Однако это условие можно ставить в случае, когда есть горизонтальная вязкость (самое простое – в виде оператора Лапласа с постоянным коэффициентом). В данном случае представляется, что такое условие избыточно – достаточно потребовать выполнения условия непротекания и скольжения (контур берега совпадает с линией тока). Необходимо дополнительное пояснение.

**4.4.** Обычно считается, что основная диссипация кинетической энергии прилива происходит в придонном слое (с этим связана и проблема использования в глубоком море осредненных по вертикали уравнений). Учитывалось ли трение о дно, как именно, какие выбирались параметры и не помешал ли учет трения о дно использовать метод КАБАРЕ?

Дополнительно отмечу, что важной составляющей в диссипации кинетической энергии может быть обрушение внутренних волн, возникающих при обтекании рельефа дна приливными течениями, и при развитии неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца.

**4.5.** Представленные результаты расчетов не дают возможности оценить качество предложенного метода. Нет сравнения ни с другими моделями, ни с данными наблюдений. Автор не приводит карты амфидромий, что является стандартом для представления приливов. Приведенные две карты (Рис. 1.9) не позволяют оценить качество расчетов. Непонятно, в какие фазы и какого именно прилива (или суммы приливов?) приводятся карты уровня моря. Судя по приведенным картам, высота прилива не превосходит 1м, в то время как в реальности Белое море отличается высокими – порядка 10м – приливами, что и является препятствием для использования моделей с линеаризованным кинематическим условием на свободной поверхности. Не указаны о том, какие максимальные скорости прилива достигаются – а в Белом море эти скорости могут быть весьма впечатляющими!

**Замечание 5.** В Главе 2, на стр. 47 утверждается, что турбулентная вязкость вводится в крупномасштабных моделях (моделях океана, например) ради повышения устойчивости схемы. Это не так, турбулентная вязкость вводится из физических соображений для параметризации подсеточных процессов. Например, обрушение внутренних волн (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца) приводит к перемешиванию жидкости по вертикали – этот процесс описывается как вертикальная вязкость, но с физически

обоснованная и контролируемая. Перестройка же сетки генерирует неявную численную вязкость, величина которой не контролируется. Соискателю рекомендуется изучить формулировку модели MOM6 (GFDL, Princeton, USA).

**Замечание 6.** В Главе 3 прямо в названии главы, и далее несколько раз в тексте, появляется англоязычный термин CABARET-MFSH, не расшифровывается.

Указанные замечания носят частный характер и не умаляют значимости диссертационного исследования в целом. Текст работы написан четким языком, оформление работы аккуратное.

**Автореферат** диссертации соответствует основному тексту и содержит всю необходимую информацию.

Диссертация Майорова Павла Александровича отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Считаю, что Майоров Павел Александрович заслуживает присуждения  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы  
программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука  
Российской академии наук

Яковлев Николай Геннадьевич

\_\_\_\_\_

*подпись*

16 декабря 2025г.

*дата подписания*

Контактные данные:

тел.: 7(916) 2187056, e-mail: nick\_yakovlev@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы

Адрес места работы:

119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук

Тел.: +7(495)984-81-20; e-mail: director@inm.ras.ru

Подпись сотрудника ИВМ РАН Н.Г. Яковлева удостоверяю:

Учёный секретарь ИВМ РАН \_\_\_\_\_ В.П. Шутяев

*дата*