

Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук Вабищевича Петра Николаевича, на диссертационную работу Петрова Сергея Сергеевича

Новая модель динамики-термодинамики морского льда на кусочно-гладкой поверхности и ее параллельная численная реализация на неструктурированных треугольных сетках, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – *математическое моделирование, численные методы и комплексы программ*

Диссертационная работа Петрова С.С. посвящена вопросам разработки и программной реализации численных методов исследования динамики-термодинамики морского льда на неструктурированных треугольных сетках при различном разнесении переменных.

Актуальность работы. Обсуждаемые математические модели динамики-термодинамики морского льда широко используются для краткосрочных прогнозов состояния льда, оценки загрязнения покрытых льдом морей. Такие модели включены в современные прогностические и климатические модели океана. В настоящее время используются около десятка программных комплексов, которые применяются для оперативного прогноза и моделирования климата. Обновление используемых вычислительных методов таких программных средств, их адаптация к архитектуре современных вычислительных средств является актуальной проблемой прикладного математического моделирования.

Структура и содержание работы. Диссертация содержит 142 страниц текста и состоит из введения, 3 глав, заключения и приложения, список литературы содержит 110 наименований.

Во введении приводится краткий обзор основных физических предположений, на которых основаны современные динамические модели морского льда, отмечаются ключевые особенности вычислительных ядер современных зарубежных и отечественных программных комплексов. Автор формулирует цель работы и задачи, которые обеспечивают достижение заявленной цели, отмечает теоретическую и практическую значимость работы, подчеркивает научную новизну работы и выделяет положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена построению аппроксимаций по пространству при решении нестационарных двумерных краевых задач для скалярного уравнения адвекции. Используются общие треугольные сетки при конечно-элементной аппроксимации. На сетке с узловой аппроксимацией искомого решения и скорости (сетка A) используются кусочно-линейные лагранжевые конечные элементы. Для аппроксимации по времени привлекаются явные схемы типа Тейлора-Галеркина, в том числе и в варианте предиктора-корректора. Для аппроксимаций на разнесенных сетках (сетка CD) используются конечные элементы Крузье-Равиара, которые соответствуют конечно-объемной аппроксимации на треугольных сетках. Аппроксимация по времени базируется на схемах Рунге-Кутты при использовании известных процедур монотонизации. На

тестовых проблемно-ориентированных задачах оценивается практический порядок сходимости схем, отслеживаются качественные характеристики приближенного решения (монотонность, положительность). При программной реализации обсуждается масштабируемость вычислительных алгоритмов при использовании многих вычислительных ядер.

Вторая глава посвящена проблемам вычислительной реализации краевых задач для системы уравнений динамики морского льда с учетом вязко-пластичной реологии. Выполнена конечно-элементная аппроксимация по пространству на сетках A и CD. Реологические свойства учитываются использованием эволюционного подхода (метода установления). Представлены результаты тестовых расчетов для плоской и сферической геометрий. Прогноз дрейфа льда в Арктическом бассейне реализован на основе сеток A со сгущением при интерполяции геоданных. Рассматриваются вопросы масштабируемости разработанных алгоритмов при реализации на компьютере параллельной архитектуры.

В третьей главе обсуждаются вопросы численного решения задач термодинамики морского льда со снегом. Используется одномерная модель (зависимость по толщине) тепловых процессов с учетом фазовых переходов (однофазная задача Стефана). Реализован подход с переходом к фиксированной сетке (метод выпрямления фронтов, сигма-метод). По пространству используется конечно-объемная аппроксимация и неявные аппроксимации по времени. Основное внимание уделяется решению нелинейной сеточной задачи на новом слое по времени. Проведено сравнение распределенной (одномерной) и точечной (нульмерной) модели на тестовых выделенных задачах.

В заключении формулируются основные результаты работы.

Практическая и научная ценность работы. Научная ценность диссертации обеспечена выполнением комплекса проблемно-ориентированных исследований по разработке вычислительных технологий для задач динамики-термодинамики морского льда на компьютерах параллельной архитектуры. Математическая модель включает два расчетных блока, которые (i) описывают динамику морского льда с учетом вязко-пластичной реологии в двумерном приближении по пространству и (ii) процессы теплопереноса с фазовых превращений в одномерном по пространству приближении. Вычислительные алгоритмы базируются на использовании неструктурированных сеток и различных конечно-элементных аппроксимациях по пространству. Применяются известные классы аппроксимаций по времени. Имплантированные численные методы отработаны на решении двумерных задач адвекции, задач динамики и термодинамики морского льда.

Практическая значимость диссертационного исследования обусловлена разработкой комплекса прикладных программ на алгоритмическом языке C++ на основе современных технологий конечно-элементного анализа и поддержкой параллельных вычислений для важного класса задач прикладного математического моделирования.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Выносимые на защиту результаты диссертации и сформулированные выводы обоснованы и достоверны. Используется адекватный математический аппарат численного анализа динамических задач, работоспособность используемых численных методов и разработанного программного инструментария демонстрируется на представительном наборе тестовых задач, научные результаты диссертации апробированы публикациями в рецензируемых научных журналах и докладами на научных конференциях.

Замечания по работе:

1. Анализ текущего состояния исследований по разработке численных методов не является полным. В своем исследовании автор, как мне кажется, неоправданно ограничился рассмотрением только публикаций, которые тесно примыкают к прикладной узко специализированной проблематике динамики морского льда. В силу этого, например, во первой главе не нашли отражения многие ключевые работы по численным методам решения задач адвекции, в третьей главе — по задачам с фазовыми превращениями.

2. Название работы не совсем точно отражает ее фактическое основное содержание. В работе используются известные, а не новые, модели динамики-термодинамики морского льда. Разрабатывается прикладное программное обеспечение с имплементацией современных численных методов для компьютеров параллельной архитектуры.

3. Цель работы формулируется не достаточно точно, сформулированные задачи не являются полными для достижения заявленной цели. Сами научные результаты плохо сформулированы и ориентированы на разработку численных методов, а не проблемно-ориентированного комплекса программ.

4. По тексту работы имеются редакционные замечания. В частности, автор слишком часто используется жаргонные выражения, в списке цитируемых работ многие ссылки не являются полными. Надписи на рисунках часто даются на английском языке. Описание постановок задач, алгоритмов часто не является достаточным для независимой воспроизводимости результатов.

Общая оценка работы. Отмеченные выше замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации и не снижают научную и практическую значимость полученных в диссертации результатов.

Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Научные результаты и основные положения диссертации опубликованы с необходимой полнотой в 4 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК, и отражены в тезисах докладов научных конференций.

Считаю, что диссертация **Новая модель динамики-термодинамики морского льда на кусочно-гладкой поверхности и ее параллельная численная реализация на неструктурированных треугольных сетках** отвечает всем квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени

кандидата наук, установленным *Положением о присуждении ученых степеней*, а ее автор **Петров Сергей Сергеевич** заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – *Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ*.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук
(специальность 01.01.07 —

Вычислительная математика), профессор
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
Московского государственного
университета имени М.В.Ломоносова



Вабищевич Петр
Николаевич

13 сентября 2023 г.

Подпись сотрудника МГУ им. М.В.Ломоносова Вабищевича П.Н. удостоверяю



Подпись удостоверяю
ведущий специалист по кадрам

 Т.Г. Коваленко