

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИВМиМГ СО РАН)

Просп. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090
Тел.: (383)330-83-53, факс (383)330-87-83, e-mail: director@ssec.ru
ОКПО 03533843, ОГРН 1025403656420, ИНН/КПП 5408100025/540801001

14.09.23 № 15301/ 5-01-27

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИВМиМГ СО РАН

д.ф.-м.н., профессор РАН

/ Марченко М. А. /

« 14 » сентября 2023 г

Отзыв

ведущей организации 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»

Целью диссертационной работы Петрова С. С. является разработка и реализация численных методов решения уравнений динамики-термодинамики морского льда на неструктурированных треугольных сетках с различным типом разнесения переменных.

Актуальность темы исследования. В настоящее время в мире существует не более десятка оригинальных численных моделей динамики и термодинамики морского льда, использующихся как для оперативного прогноза, так и для моделирования климата. Среди отечественных моделей льда выбор еще более узок. Поэтому на данный момент одной из наиболее актуальных задач в области моделирования является разработка таких моделей льда, которые наряду с физическим содержанием были бы хорошо масштабируемы для того, чтобы решать задачи как оперативного оперативного прогноза, требующего высокого пространственного разрешения, так и задачи исследования климата, требующие проведения долгосрочных расчетов.

Научная новизна. В работе предложены схемы двумерной адвекции, построенные на треугольных сетках типа A и CD с целью их применения в задаче динамики морского льда. Для

задачи адвекции на треугольной сетке типа А предложена двухшаговая оптимизация схемы по времени Тейлора-Галеркина, которая сокращает время вычислений примерно в два раза при незначительной потере в точности. Автором разработан алгоритм построения триангуляции Арктического бассейна, позволяющий сгущать сетку и увеличивать разрешение модели в областях высокой сплоченности льда, узких проливов и бухт, основанный на использовании современных отечественных программных пакетов. Для численного решения системы уравнений динамики морского льда предложен локально-декартов подход. Численный метод решения уравнения теплопроводности морского льда со снегом основан на итерационном подходе с использованием подвижной границы и нелинейных граничных условий и соответствует неявной временной схеме.

Содержание диссертационного исследования. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и 1 приложения. Общий объем диссертации 142 страницы. Список использованной литературы содержит 110 работ.

Введение содержит обзор современных моделей морского льда и физических предположений, лежащих в их основе, формулируются особенности их численной реализации, после чего раскрывается цель работы и перечисляются задачи, необходимые для её достижения. Формулируются теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы рассматривается численная схема переноса скаляров на треугольных сетках типа А и CD, определяется вид базисных функций для конечно-элементной пространственной аппроксимации уравнений. Формулируются принципы локально-декартового подхода при моделировании, указываются его сильные и слабые стороны. На сетке типа А предлагается использовать семейство схем по времени типа Тейлора-Галеркина с коррекцией потоков в связке с непрерывным методом Галеркина с линейными на треугольнике базисными функциями Куранта для пространственной аппроксимации. Показано, что на сетке типа CD конечно-элементная пространственная аппроксимация уравнения переноса с помощью элемента Круэзе-Равиар приводит к стандартной конечно-объемной формулировке задачи. Решение задачи по времени осуществляется с помощью семейства многошаговых схем Рунге-Кутты. Порядок пространственной аппроксимации повышается с учетом монотонизирующих схем типа MUST и MUSCL. На примере решения задачи переноса пассивной примеси дивергентным и бездивергентным реверсивным потоком на сфере показан практический порядок сходимости разработанных схем, исследуется их точность и монотонность. Демонстрируется масштабируемость параллельной реализации вычислений.

Вторая глава посвящена вопросу численного решения системы уравнений динамики морского льда. Дается формулировка уравнения баланса импульса в приближении вязко-пластичной реологии. Делается обзор схем дискретизации уравнения баланса импульса по времени.

обосновывающий выбор эволюционного подхода для численной реализации. Строится конечно-элементная пространственная аппроксимация на треугольных сетках типа A и CD. Приводятся результаты тестовых расчетов в задаче с плоской и сферической геометрией. Сравняется качество воспроизведения так называемых «линейных кинематических особенностей», полученных в результате решения для двух типов сетки. Дается описание системы прогноза дрейфа льда в Арктике на сетке типа A. Система включает в себя построение триангуляции со сгущением, интерполяции геоданных на модельную сетку. Из анализа результатов численного моделирования делается вывод о необходимости использования высокого пространственного разрешения для более детального описания линейных кинематических особенностей. Проводится анализ масштабируемости параллельной реализации.

Третья глава посвящена вопросам моделирования одномерной термодинамики морского льда со снежным покрытием. На основе сделанного обзора делается выбор в пользу вычислительной эффективности, достигаемой при использовании сигма-метода. При этом уравнение баланса энтальпии представляет из себя нелинейное уравнение адвекции-диффузии. Предложенная пространственная дискретизация в связке с методом BL99 интегрирования по времени позволяет сохранять суммарную энтальпию на дискретном уровне. Автором предложен итерационный процесс, в ходе которого одновременно рассчитываются профили и значения поверхностных температур, согласованные с нелинейным граничным условием произвольного вида. Реализованы одномерная и нульмерная модели термодинамики морского льда со снегом. Проводится сравнение результатов работы двух моделей.

В заключении суммируются основные результаты работы.

Практическая и научная значимость результатов. Предложенные в работе схемы по времени и пространству реализованы в разработанном программном комплексе. Проведенные численные эксперименты показали способность данного комплекса давать краткосрочный прогноз состояния морского льда в Арктике при использовании реалистичного атмосферного и океанического форсинга. Проведена профилировка написанного кода и проверена масштабируемость адвективного блока и блока баланса импульса. Реализованы универсальные одномерная и нульмерная модели термодинамики морского льда со снежным покровом, использующие разработанный численный метод решения уравнения диффузии тепла. Проведена валидация кода на натуральных данных при моделировании на длительный промежуток времени. Показано, что нульмерная модель удовлетворительно воспроизводит температуру поверхности, но при этом получающаяся толщина льда сильно отличается от толщины, полученной по одномерной модели.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Предложенные методы и подходы всесторонне исследованы аналитически и численно, что служит обоснованием

достоверности результатов работы. В ходе численных экспериментов при решении уравнений двумерной динамики и термодинамики морского льда использовались как искусственный, так и реальный форсинг, а результаты сравнивались с результатами ведущих мировых моделей. Материал, изложенный в диссертации, известен заинтересованной научной общественности, поскольку неоднократно докладывался на научных конференциях.

Публикации и апробация. Результаты докладывались более чем на двадцати российских и международных конференциях и рабочих семинарах, а также изложены в 4 публикациях в изданиях из списка ВАК.

Замечания по работе:

1. На стр 22 при перечислении возможных источников прироста льда упущены снежные осадки с последующей трансформацией снега в лед.
2. Непонятен алгоритм построения береговой линии и триангуляции. По каждому из сформулированных четырех правил «сгрубления» области есть вопросы. Что, например, происходит с узкими полосами (косами), разделяющими бассейн на части? Похоже они исчезнут, поскольку алгоритм избавляется от вершин острых углов. На рисунке с примером триангуляции отсутствуют острова Земли Франца Иосифа, Курильские и Алеутские острова. Применение какого из правил способствовало их удалению? Последние, между прочим, являются важным естественным барьером, отделяющим Охотское и Берингово моря от открытой части Тихого океана. Острова Земли Франца Иосифа являются причиной торошения и формирования ветровой прибрежной полыньи, что особенно важно при моделировании льда.
3. К сожалению, из рассмотрения термодинамики выпала ситуация, когда на поверхности льда формируются резервуары талой воды (снежницы), а также ситуация, когда лед ложится на дно (припай) так, что нижняя граница перестает быть границей льда с водой.
4. На представленном рис. 1.2 не видно того, о чем говорится в комментариях к рисунку.
5. На рис. 1.3 (как и на последующих) вектор e_x^t не направлен в сторону вершины, как об этом говорится в тексте. На некоторых рисунках далее, то же самое.
6. Ошибка в (1.2) – по диагонали должны стоять одноименные орты.
7. На стр. 115 говорится, что температура замерзания воды $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, может $-1.62\text{ }^{\circ}\text{C}$?

В тексте также масса некорректных стилистических оборотов, что, видимо, неизбежно при написании диссертации такого объема.

Общая оценка работы.

Работа выполнена на высоком теоретическом уровне и представляет большой интерес для специалистов в области моделирования климата, компонент климатической системы, физики атмосферы, океана и льда. Соискатель имеет достаточный объем публикаций в ведущих научных

журналах. Замечания, представленные выше, имеют характер общих замечаний и указывают на перспективность дальнейших исследований в данной области.

Заключение.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа С.С. Петрова является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положения 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».

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании научного семинара "Общеинститутский семинар" 13.09.2023 ИВМиМГ СО РАН, протокол №5. Руководители семинара: член-корреспондент РАН Г. А. Михайлов, член-корреспондент РАН С. И. Кабанихин, профессор РАН М. А. Марченко.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником ИВМиМГ СО РАН Платовым Геннадием Алексеевичем.

Г.н.с. ИВМиМГ СО РАН,
д.ф.-м.н.



Г.А. Платов
«13» сентября 2023г.

Подпись Г.А. Платова удостоверяю.

Заведующая отделом кадров ИВМиМГ СО РАН,



Е.Ю. Трофимкина
«13» сентября 2023г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН»

630090, г. Новосибирск, Академика Лаврентьева пр., д. 6

Телефон: +7 (383) 330-83-53

Эл.почта: director@sscc.ru