

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.455.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМЕНИ Г. И. МАРЧУКА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 04.10.2023 г. № 32

о присуждении Петрову Сергею Сергеевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Новая модель динамики-термодинамики морского льда на кусочно-гладкой поверхности и ее параллельная численная реализация на неструктурированных треугольных сетках» по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите «18» июля 2023 г., протокол № 30, диссертационным советом 24.1.455.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики имени Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН), расположенного по адресу 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8, приказ о создании диссертационного совета № 1356/нк от 15.12.2021, изменение состава согласно приказу Минобрнауки России № 1215/нк от 12.10.2022.

Соискатель Петров Сергей Сергеевич, 1997 года рождения, в 2020 году окончил с отличием магистратуру Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) по направлению 03.04.01 «Прикладные математика и физика».

С 01.10.2020 по 30.09.2023 гг. проходил обучение в очной аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института вычислительной математики им. Г.И.Марчука Российской академии наук.

В настоящее время работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики им. Г.И.Марчука Российской академии наук в должности младшего научного сотрудника в лаборатории суперкомпьютерных технологий математического моделирования Земной системы.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент **Яковлев Николай Геннадьевич**, ведущий научный сотрудник ИВМ РАН.

Официальные оппоненты:

Вабищевич Пётр Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,

Дюкина Надежда Сергеевна, доцент, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики института информационных технологий, математики и механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук», в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником ИВМиМГ СО РАН **Платовым Геннадием Алексеевичем**, указала, что работа соответствует всем необходимым требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор **Петров Сергей Сергеевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 5 опубликованных работ по теме диссертации:

1. Петров С. Конечно-элементная модель динамики морского льда и ее параллельная реализация с использованием библиотеки INMOST // Проблемы информатики. – 2021. – Т. 1. – С. 36-48.
2. Petrov S. S., Iakovlev N.G. The suite of Taylor–Galerkin class schemes for ice transport on sphere implemented by the INMOST package // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2021. – Т. 36. – №. 4. – С. 227-238.
3. Petrov S. S., Zyuzin V.K., Iakovlev N.G. The new sea ice thermodynamics code for the INM RAS Earth System model: The design and comparison of one- and zero-dimensional approaches with the observational data // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2023. – Т. 38. – №. 1. – С. 47-61.
4. Petrov S. S., Iakovlev N.G. SIMUG - Finite Element Model of Sea Ice Dynamics on Triangular Grid in Local Cartesian Basis // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2023. – Т. 38. – №. 3. – С. 145-160.
5. Петров С. Методы суперкомпьютерного конечно-элементного моделирования динамики морского льда с вязко-пластичной реологией // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XX международной конференции. – 2020. – С. 299-304.

Из этих работ 4 работы [1–4] удовлетворяют требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тематикой исследований, проведенных в диссертации.

Вабищевич Петр Николаевич является известным специалистом в области численного моделирования динамики жидкости. Данный оппонент на дату принятия диссертационной работы к защите работал в ИБРАЭ, а при написании отзыва в другом месте – ВМиК МГУ. Оба места работы удовлетворяют всем требованиям «Положения о присуждении учёных

степеней» предъявляемым к оппонентам.

Дюкина Надежда Сергеевна – специалист в области конечно-элементных пространственных аппроксимаций для задачи механики деформируемого твердого тела. Тематика диссертации соответствует области экспертизы ведущей организации.

На автореферат диссертационной работы поступили следующие отзывы:

1) отзыв, составленный доктором физико-математических наук, профессором РАН, заведующей лабораторией взаимодействия атмосферы и океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики и атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Репиной Ириной Анатольевной.

2) отзыв, составленный кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником ИПМИ КарНЦ РАН, Черновым Ильёй Александровичем.

3) отзыв, составленный доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником лаборатории геоинформатики и Геомагнитных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизический Центр Российской академии наук, Лебедевым Сергеем Анатольевичем.

Отзывы на автореферат положительные.

Диссертация посвящена вопросам разработки и реализации численных методов решения уравнений динамики-термодинамики морского льда на неструктурированных треугольных сетках с различным типом разнесения переменных. Использование моделей льда, построенных на неструктурированных сетках позволяет более детально учитывать неоднородный рельеф береговой линии и лучше воспроизводить динамику льда в узких проливах, однако требует разработки и реализации специальных конечно-элементных и конечно-объемных пространственных аппроксимаций. Данному вопросу посвящены первые две главы диссертации. Помимо динамического ядра, в моделях морского льда присутствует блок локально-одномерной термодинамики, разработке которого посвящена третья глава работы. Модели динамики-термодинамики морского льда являются

неотъемлемой частью океанического блока современных прогностических и климатических моделей Земной системы. В диссертационной работе решается актуальная задача разработки универсальной, независимой и хорошо масштабируемой модели льда, способной работать как в режиме сверхвысокого разрешения (шаг сетки порядка километра) для целей оперативного прогноза, так и на сетке грубого разрешения (порядка десятка/сотни километров) для проведения долгосрочных климатических расчетов.

Теоретическая значимость заключается в демонстрации применимости схем высокого порядка по времени типа Тейлора-Галеркина на треугольной сетке типа "А" для задачи адвекции морского льда, в связке с конечно-элементной пространственной аппроксимацией линейными на треугольнике базисными функциями Куранта. Впервые предложено использовать схему MUST для конечно-объемной адвекции на треугольной сетке типа "CD" в динамическом ядре модели морского льда. Предложена реализация описанных схем адвекции с использованием парадигмы локально-декартового базиса. Проведено численное исследование точности, сходимости, монотонности и консервативности предложенных реализаций. Локально-декартова парадигма адаптирована для реализации численного решения уравнения баланса импульса. На результатах численных экспериментов показана универсальность данного подхода для расчетов на двумерной поверхности произвольной геометрии. Предложен итерационный метод релаксации с одновременным пересчетом граничных температур для задачи одномерной диффузии тепла с подвижной границей, который соответствует неявной схеме. Показана сходимость метода в конфигурации с искусственным и реалистичным внешним воздействием.

Практическая значимость определяется тем, что разработан программный комплекс, реализующий предложенные схемы по времени и пространству. Продемонстрирована возможность краткосрочного прогноза состояния морского льда - скорость дрейфа, сплоченность и толщина - в Северном Ледовитом океане с реалистичным атмосферным и океаническим внешним воздействием. Проведена подробная профилировка написанного кода

и проверена масштабируемость отдельных блоков решателя уравнения адвекции и баланса импульса, на основе которых можно подобрать оптимальную конфигурацию модели для реальных расчетов. На основе разработанного численного метода для решения уравнения диффузии тепла реализованы универсальные одномерная и нульмерная модели термодинамики пресного/морского льда со снегом. Проведена валидация кода на данных полевого эксперимента, которая показала хороший результат прогноза профиля температур и толщины одномерной модели в результате моделирования на длительный промежуток времени. Проведено качественное и количественное сравнение результатов предсказаний разработанной одномерной и нульмерной модели термодинамики на основе которого был сделан вывод, что нульмерная модель хорошо предсказывает поверхностную температуру, однако дает существенную ошибку в толщине льда по сравнению с одномерной.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Существенно расширен спектр применяемых схем двумерной адвекции для переноса скалярных характеристик в задаче динамики морского льда на треугольных сетках типа "А" и "CD".

2. Предложена двухшаговая оптимизация схемы по времени Тейлора-Галеркина для задачи адвекции на треугольной сетке типа "А", которая в 2 раза сокращает вычислительную сложность шага переноса при незначительной потере в точности.

3. Предложен алгоритм построения триангуляции Арктического бассейна со сгущением в области с потенциально высокой сплоченностью морского льда, узких проливов и бухт, построенный на основе данных береговой линии и реализованный с помощью современных отечественных программных пакетов.

4. Предложен локально-декартов подход для численного решения системы уравнений динамики морского льда, который позволяет избавиться от недостатков использования сферической метрики с особенностью на полюсе.

5. Предложен итерационный численный метод решения нелинейного одномерного уравнения теплопроводности морского/пресного льда со снегом с

подвижной границей, одновременно обновляющий одномерный профиль и значения поверхностных температур, согласованных с нелинейными граничными условиями, который соответствует неявной временной схеме

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обоснована всесторонним аналитическим и численным исследованием предложенных методов и подходов на тестовых задачах, включающих в себя численные эксперименты с искусственным и реалистичным внешним воздействием, как для уравнений двумерной динамики, так и для задачи одномерной термодинамики морского льда, сравнением результатов работы с ведущими мировыми моделями. Материал, изложенный в диссертации, опирается на широкий список научной литературы, посвященный рассматриваемым методам и их аналогам.

Личный вклад соискателя. В работе [1] соискателем реализованы схемы переноса и численный решатель уравнения импульса на треугольной сетке типа "А", проведены тестовые расчеты в квадратной области (работа выполнена полностью соискателем). В работе [2] соискателем реализован полный набор схем Тейлора-Галеркина вплоть до 4 порядка по времени с коррекцией потоков на треугольной сетке типа "А", проведены тестовые расчеты адвекции на сфере. В работе [3] соискателем предложена новая неявная схема по времени для задачи диффузии тепла с подвижной границей, на основе которой реализованы одномерная и нульмерная модели термодинамики морского льда, проведены численные эксперименты с аналитическим и реалистичным внешним воздействием. В работе [4] соискателем реализованы схемы переноса на треугольной сетке типа "CD", реализован mEVP метод для численного решения уравнения баланса импульса на сетках типа "А" и "CD", алгоритмы адаптированы для вычислений в локально-декартовом элементном базисе, проведены тестовые запуски модели в плоской и сферической расчетной области, разработана простейшая система прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне, продемонстрированы результаты краткосрочного двухнедельного прогноза.

На заседании **04 октября 2023 г.** диссертационный совет принял решение за разработку и реализацию на компьютере с параллельной


архитектурой численных методов решения уравнений динамики-термодинамики морского льда присудить **Петрову Сергею Сергеевичу** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 17 докторов наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета

д. ф.-м. н.,

академик РАН

 Тыртышников Евгений Евгеньевич

Ученый секретарь диссертационного совета

д. ф.-м. н.

 Бочаров Геннадий Алексеевич

04.10.2023 г.