

ОТЗЫВ

официального оппонента Макаренко Николая Ивановича
на диссертацию Якшиной Дины Фаруковны

**«Исследование влияния океанических потоков тепла
на состояние морского льда Северного Ледовитого океана на
основе численного моделирования»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертация Якшиной Д.Ф. посвящена исследованию влияния вод Северного Ледовитого океана на изменчивость состояния ледяного покрова с помощью усовершенствованной численной модели океана и морского льда. Данная научная тематика безусловно актуальна в связи с современными потребностями в практическом освоении Арктики. Автором решаются следующие задачи:

- Модификация численной крупномасштабной модели океана на основе учета параметризаций подсеточного масштаба.
- Исследование чувствительности численной модели океана к параметризациям подсеточного масштаба, включенным в модель.
- Исследование изменчивости циркуляции океана и морского льда как отклика на меняющееся атмосферное воздействие.
- Исследование чувствительности состояния льда к интенсивности поступления в Северный Ледовитый океан атлантических и тихоокеанских вод.
- Исследование вклада атмосферного воздействия, состояния океана и начального состояния льда в сокращение площади ледового покрова в летний период.

Диссертационная работа объемом 145 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 214 источников, а также приложения. Текст содержит 57 рисунков и 3 таблицы. Во введении сформулированы цели и задачи работы, выделены основные положения, выносимые на защиту; обозначены методы исследования, охарактеризованы актуальность, научная и практическая значимость. Здесь же приведен обзор литературы по теме диссертации, представлены ее структура и содержание.

Первая глава носит подготовительный характер – в ней приводятся необходимые сведения, которые используются в основной части диссертации. В частности, здесь подробно описывается используемая численная модель. Исследование изменчивости состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана и его шельфовых морей опирается на трехмерную численную модель океана и морского льда SibCIOM (Siberian coupled ice-ocean model), разрабатываемую в ИВМиМГ СО РАН. Данная математическая модель основана на нелинейных дифференциальных уравнениях гидротермодинамики с учетом приближений Буссинеска и гидростатики, снабженных соответствующими краевыми условиями на твердых и жидких границах. Численная модель основана на использовании метода расщепления по физическим процессам и на применении явных, неявных и полунеявных численных схем по времени.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с изучением климатической изменчивости состояния вод и ледового покрова Северного Ледовитого океана. Для выявления основных факторов, оказывающих влияние на эту изменчивость, автором анализируются результаты численного моделирования современного состояния вод и морского льда. Здесь отмечается, что в рамках используемого крупномасштабного моделирования оказывается возможным определить основные процессы, ответственные за сокращение арктического льда. В частности, анализ результатов трехмерного численного моделирования прослеживает изменчивость интенсивности поступления атлантических и тихоокеанских вод в Арктический бассейн. Для оценки роли океана в сокращении арктического льда автором также оценены потоки тепла на границах океан-лед и атмосфера-лед.

В третьей главе анализируются результаты численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности океанических и ледовых полей к параметризациям физических процессов, не разрешенных в рамках крупномасштабного моделирования. Здесь проведено исследование чувствительности модели к параметризации вертикального конвективного и турбулентного перемешивания, а также выполнено сравнение интегральных характеристик, связанных с состоянием ледового покрова и содержанием пресной воды в море Бофорта. Кроме того, проведено исследование чувствительности модели к параметризации проникающей коротковолновой радиации и приведены результаты экспериментов по оценке чувствительности состояния вод Северного Ледовитого океана в численной модели к параметризации диффузии и вихревого переноса.

В четвертой главе анализируются сценарные численные эксперименты, направленные на исследование чувствительности модельного ледового покрова к изменению состояния вод верхнего слоя Северного Ледовитого океана. В двух из этих экспериментов анализируются возможные последствия дополнительного усиления циклонической и антициклонической ветровой циркуляции над Норвежским и Гренландским морями. В серии численных экспериментов исследована чувствительность состояния ледового покрова к изменчивости начального состояния льда и температуры верхнего слоя океана. В частности, здесь установлено, что полученное в ходе контрольного эксперимента распределение ледяного покрова адекватно отражает его состояние в последнее десятилетие. Из проведенных экспериментов следует, что на временных интервалах порядка одного года состояние морского льда, образовавшегося в зимний период, является одним из определяющих факторов для формирования его летнего распределения, наряду с тепловым и динамическим воздействием атмосферы.

Основные результаты диссертационной работы формулируются следующим образом:

- Усовершенствована новая версия океанического блока региональной численной модели Северной Атлантики и Арктики SibCIOM, включающая учет изопикнической диффузии и вихревого переноса, а также блок семейства турбулентных моделей GOTM для параметризации вертикального перемешивания.
- С помощью модифицированной численной модели проведено исследование климатической изменчивости Северного Ледовитого океана и проведена оценка роли атлантических и тихоокеанских вод в состоянии ледового покрова в Арктике.

- Проведен сравнительный анализ климатических характеристик с различными параметризациями турбулентного перемешивания, диффузии и способа учета солнечной коротковолновой радиации.
- Проведено исследование чувствительности численной модели к вариациям состояний атмосферы, влияющих на интенсивность обмена вод и приводящих к изменению объема льда в западной части Евразийского бассейна и Баренцевом море.
- На основе экспериментов по исследованию чувствительности моделируемого летнего состояния океана и морского льда к начальному состоянию океана и морского льда на однолетнем и пятилетнем временных интервалах впервые показано, что современное состояние океана и морского льда дает существенные предпосылки для формирования в летний период обширных акваторий, свободных ото льда.

В качестве одного из выводов автором диссертации отмечается, что среди всех тестируемых параметризаций отсутствует универсальная параметризация, использование которой в модели SibCIOM дает наилучшее соответствие данным наблюдений. Также показано, что учет поглощения коротковолновой солнечной радиации существенно важен при численном моделировании для воспроизведения подповерхностного температурного максимума температуры в водах Северного Ледовитого океана. Формирование подповерхностного температурного максимума температуры, наличие которого подтверждается данными наблюдений, вносит вклад в изменение потоков на границе между океаном и морским льдом. Помимо охарактеризованных выше центральных результатов диссертации, очень интересными с точки зрения возможных приложений представляются результаты расчетов трассеров для частиц воды в конкретных течениях, приведенные в параграфах 2.7–2.9.

В целом диссертация Якшиной Д.Ф. производит благоприятное впечатление большого труда, потребовавшего от автора разносторонней эрудиции и высокой квалификации в овладении современными методами математического моделирования. Все основные результаты диссертации являются новыми, они своевременно опубликованы в 17 работах, 10 из которых – в журналах из списка ВАК и изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus. Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждена многочисленными апробациями численной модели. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Работа написана ясно и оформлена очень хорошо, опечатки встречаются крайне редко в тексте. Очень удобно для читателя, что каждая из четырех глав завершается кратким резюме с выводами.

В качестве небольших замечаний по тексту диссертации отметим следующее.

1. В параграфе 1.2 на стр. 22 в дифференциальных уравнениях (1.6) и (1.7) переноса – диффузии тепла и соли не оговорен смысл обозначения ϕ . Как следует из вида аналогичных модельных уравнений в системе (1) – (9), приведенных на страницах 6 и 7 автореферата, величина ϕ является “немой” переменной в определении (3) оператора L , введенного для удобства универсальной записи уравнений. В упомянутом фрагменте диссертации определение этого оператора опущено, а переменная ϕ в уравнениях осталась.

2. В параграфе 1.5 на страницах 34 и 35 описывается параметризация вертикального перемешивания, использующая процедуру формирования однородных слоев на основе сравнения локального числа Ричардсона с его критическим значением. Однако далее нигде в тексте диссертации не указано, какое именно значение числа Ричардсона используется в модели в качестве критического значения.
3. На стр. 135 в списке литературы работа под номером 133 цитируется с английского перевода статьи в Известиях РАН - ФАО. Было бы неплохо указать в списке выходные данные и оригинала этой статьи.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают высокой оценки проведенного автором исследования.

Принимая во внимание актуальность темы, оригинальность работы и научную значимость полученных результатов, считаю, что диссертация «Исследование влияние океанических потоков тепла на состояние морского льда Северного Ледовитого океана на основе численного моделирования» удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» к кандидатским диссертациям, а ее автор, Якшина Дина Фаруковна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 01.01.02 — дифференциальные уравнения, главный научный сотрудник лаборатории краевых задач механики сплошных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Тел. +7 383 333 3199

Эл. почта: makarenko@hydro.nsc.ru

« 10 » июня 2022 г.

Макаренко Николай Иванович

Подпись Н.И. Макаренко заверяю

Ученый секретарь Института гидродинамики

им. М. А. Лаврентьева СО РАН

к.ф.-м.н.



 А.К. Хе

10.06.2022