



УТВЕРЖДАЮ  
директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института физики атмосферы им. А.М.Обухова  
Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)  
д.ф.-м.н.

  
Куличков С.Н.  
« 1 » \_\_\_\_\_ июня 2022

## ОТЗЫВ

ведущей организации 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*

Диссертационное исследование Якшиной Дины Фаруковны на тему **«Исследование влияния океанических потоков тепла на состояние морского льда Северного Ледовитого океана на основе численного моделирования»** состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и списка литературы.

**Актуальность** темы исследования связана важностью исследования современных климатических изменений в Арктическом регионе. Арктика и северные районы Евразии являются одним из наиболее чувствительных регионов к глобальным климатическим изменениям. Рост температуры сопровождается изменениями других атмосферных переменных, в частности сокращением льда в Арктике, изменением гидрометеорологического режимов. При этом Арктика привлекает повышенное внимание не только как регион с наиболее заметными климатическими изменениями, но и как мировая кладовая полезных ископаемых, перспективы разработки которых активно обсуждаются. Для России, владеющей основной частью арктического шельфа, Арктика является и перспективной торговой и транспортной артерией, так как в последние десятилетия открываются новые возможности использования Северного Морского пути.

Для изучения климатической системы Арктики, исследований существующих закономерностей и предсказаний будущих изменений климата наивысшую степень важности имеют регулярные измерения климатических характеристик. Но для понимания

процессов, формирующих климатическую изменчивость гидрологических и ледовых характеристик Северного ледовитого океана, проводимых измерений недостаточно ввиду фрагментарности информации и отсутствия длительных рядов наблюдений. Методы математического моделирования в сочетании с наблюдениями, являются основным и наиболее перспективным инструментом решения задач воспроизведения современного климатического распределения, выявления причин наблюдаемых изменений и прогноза возможных будущих состояний системы. С этой точки зрения представленная работа является актуальной, так как позволяет оценить вклад океанских процессов с современную климатическую изменчивость в арктическом регионе.

**Целью** диссертационной работы является исследование влияния вод Северного Ледовитого океана на изменчивость состояния ледяного покрова в условиях глобального изменения климата с помощью усовершенствованной численной модели океана и морского льда.

Для достижения поставленной цели диссертантом были решены следующие задачи:

1. Модификация численной крупномасштабной модели океана, разрабатываемой в ИВМиМГ СО РАН, на основе учета современных параметризаций подсеточного масштаба: изопикнической диффузии и вихревого переноса, включения семейства турбулентных моделей для параметризации вертикального турбулентного и конвективного перемешивания.
2. Исследование чувствительности численной модели океана к указанным параметризациям подсеточного масштаба, включенным в модель.
3. Исследование изменчивости циркуляции океана и морского льда Северного Ледовитого океана как отклика на меняющееся атмосферное воздействие на основе анализа численных экспериментов, проведенных с региональной моделью океана и морского льда SibCIOM.
4. Исследование чувствительности состояния морского льда к интенсивности поступления в Северный Ледовитый океан атлантических и тихоокеанских вод. Исследование вклада атмосферного воздействия, состояния океана, начального состояния льда в сокращение площади ледового покрова в летний период.

Результаты диссертационного исследования опираются на новые алгоритмы и результаты численного моделирования, которые могут быть рекомендованы для исследования климатической изменчивости в полярных регионах. Это показывает высокую **научную и практическую значимость** работы.

К сожалению ни в диссертации, ни в автореферате не указано в рамках каких проектов и тем госзадания выполнено данное исследование.

**Содержание**, представленной на отзыв диссертации соответствует поставленным цели и задачам, отражает заявленные автором исследовательские подходы и может быть оценено как полное описание аргументаций, выдвинутых соискателем положений на защиту.

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, освещено современное состояние исследуемой проблемы, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена методология проводимых работ.

В **первой главе** описывается численная модель SibCIOM (Siberian coupled ice-ocean model), используемая для исследования климатической изменчивости, а также произведенные автором модификации океанического блока модели. Новая версия модели включает в себя учет изопикнической диффузии, подключенный блок семейства турбулентных моделей GOTM для параметризации вертикального перемешивания. Особенностью схемы является расчет дополнительного адвективного коэффициента для тепла и соли, соответствующий физическому состоянию турбулентного переноса при неустойчивости, вызванной поверхностными силами (первое положение, выносимое на защиту).

Во **второй главе** (второе положение, выносимое на защиту) обсуждаются вопросы, связанные с анализом климатической изменчивости состояния вод и ледового покрова Северного Ледовитого океана. Проводится обзор работ, описывающих современное состояние Северного Ледовитого океана по данным измерений, выделяются основные процессы, на которые опирается в дальнейшем численное моделирование. Представлены результаты численного моделирования состояния океана и морского льда в Арктике. Результаты численного моделирования показывают сокращение площади морского льда, наиболее интенсивно происходящее в 21 столетии. По результатам трехмерного численного моделирования исследована изменчивость интенсивности поступления атлантических и тихоокеанских вод в Арктический бассейн.

В **третьей главе** обосновано третье положение, выносимое на защиту. В главе анализируются результаты серии численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности океанических и ледовых полей северного ледовитого океана к параметризациям физических процессов, не разрешенных в рамках крупномасштабного моделирования. Исследуется чувствительности модели к параметризации вертикального конвективного и турбулентного перемешивания и к параметризации проникающей коротковолновой радиации.

**Четвертая глава** посвящена анализу серии сценарных численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности модельного ледового покрова к изменению состояния вод верхнего слоя СЛО. Рассматриваются два численных эксперимента, в которых анализируются последствия дополнительного усиления циклонической и антициклонической ветровой циркуляции над Норвежским и Гренландским морями. Исследуется чувствительность состояния ледового покрова к изменчивости начального состояния льда и температуры верхнего слоя океана и к изменению гидрологических характеристик тихоокеанских вод, поступающих через Берингов пролив (четвертое и пятое положения выносимые на защиту).

В результате рассмотрения вопросов, поставленных в работе перед диссертантом, Якшина Дина Фаруковна приходит к ряду заслуживающих поддержки выводов, отражённых в **заключении**.

1. Усовершенствована региональная численная модель Северной Атлантики и Арктики на основе модификации блока расчета нелинейных уравнений движения, включения современных параметризаций процессов подсеточного масштаба, неразрешенных в численной модели: реализации изопикнической диффузии и вихревого переноса, адаптации пакета GOTM моделей вертикального турбулентного и конвективного перемешивания.
2. С помощью модифицированной численной модели проведено исследование, моделирующее катастрофическое сокращение ледового покрова СЛО в последнее десятилетие 21 столетия.
3. Проведена оценка роли атлантических и тихоокеанских вод в состоянии ледового покрова в Арктике. По результатам численного моделирования показано, что влияние океана на ледовый покров наиболее высоко в регионах, относящихся к начальной траектории распространения атлантических вод в Арктике.

4. Проведен сравнительный анализ климатических характеристик на основе версий численной модели с различными моделями параметризации турбулентного перемешивания. Показано, что среди тестируемых параметризаций отсутствует универсальная, использование которой в модели SibCIOM дает наилучшее соответствие данным наблюдений.
5. Проведено исследование, демонстрирующее необходимость учета проникающей солнечной коротковолновой радиации в океане, покрытым льдом, для воспроизведения подповерхностного температурного максимума температуры (ПТМ), существование которого вносит изменения в поток тепла, поступающий от океанических вод к морскому льду в период формирования льда.
6. Показано, что усиление ветровой активности в преарктическом регионе приводит к вариациям в интенсивности переноса тепла в Баренцево море и через пролив Фрама, что в конечном итоге отражается на состоянии ледового покрова Евразийского бассейна СЛО.
7. Анализ результатов численных экспериментов показал, что повышение расхода и температуры вод в Беринговом проливе, начавшееся после 2004 г., привело к дополнительному повышению теплосодержания верхнего слоя морей западного сектора СЛО и задержке сроков формирования льда в Чукотском море.
8. Результаты численного моделирования показали, что современное состояние океана и морского льда является существенными предпосылками для формирования в летний период обширных акваторий СЛО, свободных ото льда, в которых наблюдается аномально высокая для арктических вод температура воды.

*Основные вопросы, которые возникли при прочтении работы:*

1. Прежде всего, восприятие работы усложняет тот факт, что автор не указывает, результаты каких его публикаций отражены в каждой главе. Это затрудняет и оценку вклада автора диссертации, в частности, в разработку модели. При описании базовых положений модели ссылки идут в основном на старые работы коллектива.
2. Формулировка выводов работы и особенно положений, выносимых на защиту, не отражает собственно результат работы. «Проведено исследование, оценка, анализ» - это не результат, а действие. Из 8 выводов сформулировано 5 положений, выносимых на защиту, при этом решалось 4 задачи. Из формулировки положений сложно выявить защищаемый

результат, его значимость и новизну (проведено исследование, усовершенствована модель, показано...»

3. Как правильно отмечается в диссертации, атлантические и тихоокеанские воды не являются основным источником деградации ледяного покрова и тем более потепления верхнего слоя океана. Правильно было бы говорить о вкладе. Оценивалась ли степень этого вклада в сравнении с атмосферным воздействием – как тепловым, так и динамическим, особенно в летний период?

4. В качестве атмосферного форсинга использовался реанализ. Но реанализ получается по модели, в которую, в частности, заложено и состояние поверхности, в том числе ледяного покрова для Арктики. Это может быть одной из причин хорошего воспроизведения площади морского льда в модели. Правильнее было бы использовать совместную модель океана и атмосферы.

5. Используемая модель льда представлена в рамках одного абзаца. Для лучшего понимания работы было бы полезно дать более детально ее характеристики. Учитываются ли морфометрические неоднородности льда (снежницы, разводья), взаимодействие льда и поверхностного волнения? Есть предположение, что основной причиной летнего минимума 2012 года было как раз волновое воздействие на кромку льда.

6. «Показано, что среди тестируемых параметризаций отсутствует универсальная..» Универсальных параметризаций не бывает. Бывают параметризации, которые обеспечивают наилучшую сходимость с данными наблюдений.

7. стр. 21 «рассматриваются полные нелинейные уравнения гидротермодинамики океана»... так как уравнения записаны с учетом ряда приближений – они уже не являются полными.

8. стр. 62 «были суммированы три составляющих радиационного баланса: поток явного тепла, поток скрытого тепла и поток длинноволнового излучения». Поток явного и скрытого тепла являются турбулентными составляющими теплового баланса, но никак не радиационного. И почему не учитывался поток коротковолнового излучения? Расчеты проводились только для зимнего времени? Откуда брались значения этих потоков? Рассчитывались? По какой схеме? Или брались из реанализа?

9. Почему для расчета ослабления солнечной радиации использовалась именно параметризация Jerlov, 1968? Есть набор параметризаций, разработанных в более поздние годы.

10. «Аномально высокая для арктических вод температура воды» не является открытием, полученным из численного моделирования, а логичным следствием альбедного механизма арктического усиления.

В заключении хотелось бы сказать, что высказанные замечания имеют в основном дискуссионный и рекомендательный характер, и не умоляют общую положительную оценку проделанной соискателем работы.

Основные положения диссертации отражены в её автореферате, в 4 научных публикациях из списка ВАК, а также прошли обсуждения на российских и международных конференциях.

Диссертация представляет собой результат грамотного научного исследования, выполненного на высоком профессиональном уровне и отличающегося новизной предложенных методов и подходов к решению поставленных задач. Следует отметить комплексность исследования.

Результаты, полученные автором, представляют интерес для организаций РАН (ИОРАН, ИФА, ИПФ, ИВМ, ИПМ, ИВП, ИКИ), Росгидромета (ГОИН, ААНИИ, ГГО, ИПГ) и других, занимающихся атмосферными, климатическими и прикладными исследованиями. Изложенные в работе результаты могут быть применимы для задач анализа климатических процессов и мониторинга и прогноза динамики океана.

Обобщая содержание отзыва, можно утверждать, что диссертационная работа Д.Ф. Якшиной представляет самостоятельное, законченное и серьезное научное исследование, соответствующее мировым стандартам в области геофизических исследований. Основные цели диссертационной работы достигнуты. Положения, выносимые на защиту, в совокупности составляют научное достижение, сутью которого является получение оценки связи океанских процессов и климатических изменений в Арктическом регионе.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы. Представленная диссертация **«Исследование влияния океанических потоков тепла на состояние морского льда Северного Ледовитого океана на основе численного**

моделирования», отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Якшина Дина Фаруковна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв подготовлен:

Заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Доктор физико-математических наук, шифр специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Репина Ирина Анатольевна

Работа была доложена и одобрена на совместном семинаре Отдела динамики атмосферы ИФА им. А.М. Обухова РАН и Отдела исследования климатических процессов 26 мая 2022 г. (протокол семинара № 1/22).

Заведующий Отделом динамики атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Академик

Голицын Георгий Сергеевич

Отзыв заверен:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Кандидат географических наук

Краснокутская Людмила Дмитриевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, 119017, Москва, Пыжевский пер. 3. Тел: 8(495) 951 55 65, факс 8(495) 951 16 52 email: [ifaran@ifaran.ru](mailto:ifaran@ifaran.ru)



1 июня 2022