

На правах рукописи



ЯКШИНА Дина Фаруковна

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

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН)

Научный руководитель:

Голубева Елена Николаевна,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Дианский Николай Ардальянович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры физики моря и вод суши отделения геофизики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Макаренко Николай Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории краевых задач механики сплошных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Защита состоится 29 июня 2022 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.061.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВМиМГ СО РАН, тел. +7 (383) 330-71-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВМиМГ СО РАН:
www.icmmg.nsc.ru

Автореферат разослан 26 апреля 2022 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета
Д 003.061.01, д.ф.-м.н.



Рогозинский Сергей Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Изменения климата Земли, наблюдаемые в последние десятилетия, и их последствия, проявляющиеся в различных областях природной среды, способствовали активизации исследований в области изучения климатической системы и ее компонентов. Наиболее интенсивные изменения климата, происходящие в полярных широтах Северного полушария, получили название полярного усиления [Walsh, 2014]. Прежде всего это отражается в ускоренном повышении приземной температуры воздуха полярных широт по сравнению с глобальным средним как для Северного полушария, так и всего Земного шара. Этот процесс сопровождается катастрофическим сокращением площади и объема морского льда Северного Ледовитого океана (СЛО) [Kwok, 2018], повышением температуры поверхностного слоя арктических морей, таянием многолетней мерзлоты, эрозией арктических берегов. Сложные взаимодействия в климатической системе приводят к тому, что процесс сокращения арктического морского льда оказывает влияние на климат и формирование погодных условий как в Арктике, так и за ее пределами.

Исследование физических механизмов, определяющих современное состояние Северного Ледовитого океана, изменчивость арктического морского льда и их возможное состояние в будущем является актуальной задачей. Многочисленные исследования, основанные на анализе данных наблюдений, определяют роль термодинамического воздействия атмосферы в формировании современного состояния морского льда, способствующего как интенсивному таянию в летний период и замедленному замерзанию в зимний, так и ускоренному выносу льда за пределы Арктического бассейна.

Одним из основных физических механизмов, формирующим состояние гидрологического режима Северного Ледовитого океана является взаимодействие его с водами Атлантического и Тихого океанов, являющимися для него источниками тепла. В работах последних лет все чаще подчеркивается важность влияния атлантических вод и тихоокеанских вод на состояние ледового покрова [Alexeev et al., 2013, Иванов, Репина, 2018, Polyakov et.al., 2019, Woodgate et al., 2015, Serreze et al., 2016].

Для изучения климатической системы Арктики, исследований существующих закономерностей и предсказаний будущих изменений климата наивысшую степень важности имеют регулярные измерения климатических характеристик. Однако для понимания процессов, формирующих климатическую изменчивость гидрологических и ледовых характеристик СЛО, 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. Численные модели климатической системы и ее компонент, позволяющие проводить диагностические и сценарные расчеты, интерпретировать данные наблюдений, разрабатываются различными научными коллективами. Модели основаны на одних и тех же базовых физико-математических законах, однако модельные эксперименты показывают различные результаты, что обусловлено выбором пространственного и временного разрешения, физической наполненностью модели и выбором способа описания процессов подсеточного масштаба, методами аппроксимации исходных уравнений и численными алгоритмами.

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 этой цели были поставлены и 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.

Научная новизна. Результаты диссертационного исследования на момент публикации являлись новыми. С помощью численного моделирования воспроизведены основные изменения, происходящие в климатической системе океан - лед Северного Ледовитого океана со второй половины XX столетия по декабрь 2021г: сокращение ледового покрова, изменчивость траектории атлантических и тихоокеанских вод, обусловленная вариациями атмосферной динамики, повышение теплосодержания верхнего слоя океана.

Впервые на основе трехмерного численного моделирования показано, 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.

Научная значимость работы состоит в 1) развитии отечественной модели океана за счет включения параметризаций физических процессов подсеточного масштаба, влияющих на гидрологические и ледовые характеристики Северного Ледовитого океана; 2) исследовании влияния океанических вод на состояние морского льда Северного Ледовитого океана в условиях современного климата. Научная значимость работы подтверждается грантами РФФИ и РФФИ и публикациями в рейтинговых журналах.

Практическая значимость работы. Усовершенствованная версия численной модели динамики океана используется в качестве базовой для определения основных взаимосвязей в сложной климатической системе, для проведения исследований с целью оценки последствий возможных климатических изменений, происходящих в арктической зоне в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Положения, выносимые на защиту.

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 (general ocean turbulent models) моделей вертикального турбулентного и конвективного перемешивания.
2. Проведено исследование климатической изменчивости Северного Ледовитого океана с середины прошлого столетия по настоящее время по результатам численного моделирования с помощью усовершенствованной региональной численной модели океана и морского льда. На основе трехмерного численного моделирования показано влияние атлантических и тихоокеанских вод на состояние ледового покрова в Арктике.
3. Проведено исследование чувствительности моделируемых на основе численной модели SibCIOM океанических характеристик к параметризациям процессов подсеточного масштаба: изопикнической диффузии и вихревого переноса, параметризациям вертикального турбулентного перемешивания, учету солнечной коротковолновой радиации.
4. Исследована чувствительность состояния арктического морского льда к изменению атмосферного воздействия, интенсивности поступления океанических потоков из соседних акваторий, начальному состоянию океана и морского льда на однолетнем и многолетнем периодах.
5. Показано, что сформировавшееся за последние десятилетия современное состояние океана и морского льда является существенной предпосылкой для формирования в летний период обширных акваторий СЛО, свободных ото льда, в которых наблюдается аномально высокая для арктических вод температура воды.

Обоснованность и достоверность результатов. Численная модель SibCIOM, с помощью которой проводятся исследования, принимала участие в международном проекте FAMOS (ранее AOMIP Arctic Ocean Model Intercomparison Project) – проект сравнения численных моделей океан-лед Арктического бассейна. Достоверность результатов, полученных на ее основе, подтверждена многочисленными апробациями численной модели, проводимыми коллективом исследователей на протяжении двух десятилетий.

В настоящей работе проводилось сравнение с данными наблюдений океанических и ледовых характеристик, анализ которых представлен в научных публикациях, а именно: траекториями распространения, глубиной верхней границы и температурой атлантических и тихоокеанских вод, вертикальным распределением температуры, содержанием пресной воды в море Бофорта и состоянием ледового покрова. Для сравнения ледовых характеристик, таких как толщина, сплоченность льда, площадь ледового покрытия использовались данные национального центра снега и льда, США (NSIDC, National Snow and Ice Data Center).

Апробация результатов. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 4 работы представлены в журналах из перечня ВАК, 3 работы в базе WoS, 3 работы в базе SCOPUS. Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, были представлены на российских и международных конференциях и совещаниях: XIX Всероссийская научная конференция-школа "Современные проблемы математического моделирования», Абрау-Дюрсо, 2021 г.;

Всероссийская научная конференция «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон» (XXVIII Береговая конференция), 2020 г., г. Севастополь; Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2019», Москва; Марчуковские научные чтения – 2019 «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019» (АПВПМ-2019), Новосибирск; XX Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 2019 г.; Международная конференция по вычислительной математике и математической геофизике, посвященная 90-летию со дня рождения академика А.С. Алексеева, 2018 г., Новосибирск; XXIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», 2017 г., Иркутск; XXIII рабочая группа «Аэрозоли Сибири», 2016 г., Томск; The 5th annual FAMOS School and Meeting, Woods Hole Oceanographic Institution, 2016 г.; VIII Всероссийская конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и механики», посвященная памяти академика А.Ф. Сидорова, Абрау-Дюрсо, 2016 г.; Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 2015-2017, 2021 гг., Новосибирск; EGU General Assembly, Вена, 2013 г.

Личный вклад автора.

Проведено усовершенствование численной модели океана за счет модификации блока численного решения уравнений движения; включения параметризации изопикнической диффузии и вихревого переноса, адаптации пакета моделей турбулентных моделей GOTM. Автор принимал участие как в постановке задачи, так и в проведении численных экспериментов, анализе и интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 145 страниц, включая 57 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 214 наименований.

Содержание работы

В **первой главе** описывается численная модель, используемая для диссертационного исследования. Исследование изменчивости состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана опирается на трехмерную численную модель океана и морского льда SibCIOM (Siberian coupled ice-ocean model), разрабатываемую в ИВМиМГ СО РАН [Golubeva, Platov, 2007, Голубева, 2008].

Океанический блок модели представляет собой z-уровневую версию численной модели динамики океана, выписанную в системе криволинейных ортогональных координат ξ_1, ξ_2 , ось z направлена вертикально вниз. Рассматриваются полные нелинейные уравнения гидротермодинамики океана с учетом приближений Буссинеска и гидростатики для переменных, обозначающих компоненты скорости течения – u, v, w , потенциальную температуру T и соленость S .

Уравнения движения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \xi_2} uv - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi_1} vv - fv = -\frac{1}{\rho_0 h_1} \frac{\partial p}{\partial \xi_1} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial u}{\partial z} + F(u, \mu_v), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \xi_2} u u + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi_1} v u + f u = -\frac{1}{\rho_0 h_2} \frac{\partial p}{\partial \xi_2} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial v}{\partial z} + F(v, \mu_v), \quad (2)$$

где

$$L(\phi) = \frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u \phi) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v \phi) \right] + \frac{\partial}{\partial z} (w \phi), \quad (3)$$

$$F(\phi, \mu) = \frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_1} \left(\mu \frac{h_2}{h_1} \frac{\partial \phi}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(\mu \frac{h_1}{h_2} \frac{\partial \phi}{\partial \xi_2} \right) \right]. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v) \right] + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Уравнение гидростатики:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g. \quad (6)$$

Уравнение состояния:

$$\rho = \rho(T, S, p_o). \quad (7)$$

Адвективно-диффузионные уравнения переноса тепла и соли:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + L(T) = \frac{\partial}{\partial z} v_T \frac{\partial T}{\partial z} + F_1(T, \mu_T, \mu_I, \mu_{GM}), \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + L(S) = \frac{\partial}{\partial z} v_S \frac{\partial S}{\partial z} + F_2(S, \mu_S, \mu_I, \mu_{GM}). \quad (9)$$

В системе используются следующие обозначения: p – давление, $p_o = \rho_0 g z$, ρ – плотность воды, ρ_0 – средняя плотность, $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, φ – географическая широта, μ_v, ν_v и $\mu_{T,S}, \nu_{T,S}$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости и диффузии, h_1, h_2 – метрические коэффициенты.

Параметризация слагаемых $F_{1,2}(\phi, \mu_{T,S}, \mu_I, \mu_{GM})$ в уравнениях сохранения тепла и соли включает базовую диффузию, представленную оператором Лапласа, диффузию вдоль изопикнических поверхностей [Redi, 1982] и параметризацию переноса геострофических вихрей [Gent, McWilliams, 1990].

Параметризация изопикнической диффузии осуществляется в форме $\nabla \cdot K_{Redi} \nabla \phi$,

$$\text{где } K_{Redi} = \begin{pmatrix} \mu_I & 0 & \mu_I s_x \\ 0 & \mu_I & \mu_I s_y \\ \mu_I s_x & \mu_I s_y & \mu_I (s_x^2 + s_y^2) \end{pmatrix}, \quad s_x = \frac{\partial \rho}{h_1 \partial \xi_1} / \frac{\partial \rho}{\partial z}, \quad s_y = \frac{\partial \rho}{h_2 \partial \xi_2} / \frac{\partial \rho}{\partial z}, \quad (10)$$

где ρ – потенциальная плотность, предполагается выполнение условия $|s_x| \ll 1, |s_y| \ll 1$.

Вихревой перенос температуры и солёности, $-\nabla \cdot \phi U^*$, где $U^* = (u^* v^* w^*)$, проводится с помощью параметризации скорости вихря [Gent, McWilliams, 1990] в виде

$$u^* = \frac{\partial \mu_{GM} S_x}{\partial z}, \quad v^* = \frac{\partial \mu_{GM} S_y}{\partial z}, \quad w^* = -\frac{1}{h_1 h_2} \left(\frac{\partial h_2 \mu_{GM} S_x}{\partial \xi_1} + \frac{\partial h_1 \mu_{GM} S_y}{\partial \xi_2} \right). \quad (11)$$

В этом случае к скорости течений добавляются соответствующие составляющие вихревых скоростей. С другой стороны, после дополнительных преобразований [Griffies, 1998]

$$\nabla \cdot K_{Redi} \nabla \phi - \nabla \cdot \phi U^* = \nabla \cdot (K_{Redi} + K_{GM}) \nabla \phi,$$

$$\text{где } K_{Redi} + K_{GM} = \mu_\rho \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2s_x & 2s_y & (s_x^2 + s_y^2) \end{pmatrix}, \text{ при условии, что } \mu_l = \mu_{GM} = \mu_\rho. \quad (12)$$

Область исследования Ω ограничена поверхностью океана $z = -\eta(\xi_1, \xi_2, t)$, рельефом дна океана $z = H(\xi_1, \xi_2)$, «твердыми» боковыми границами Γ_0 , а также «жидкими» боковыми границами Γ_n с соседними акваториями.

Граничные условия для исходной системы принимаются следующими:

$$\text{на поверхности океана } w = -\frac{d\eta}{dt}, \quad k_v \frac{\partial(u,v)}{\partial z} = -\frac{(\tau_x, \tau_y)}{\rho_0}, \quad k_{T,S} \frac{\partial(T,S)}{\partial z} = (Q_T, Q_S), \quad (13)$$

$$\text{на дне } z = H(\xi_1, \xi_2): w = \frac{1}{h_1 h_2} \left[u \frac{\partial H h_2}{\partial \xi_1} + v \frac{\partial H h_1}{\partial \xi_2} \right], \quad v \frac{\partial(u,v)}{\partial z} = -R \sqrt{u^2 + v^2}(u, v), \quad \frac{\partial(T,S)}{\partial z} = 0. \quad (14)$$

Здесь η – уровенная поверхность, τ_x, τ_y – компоненты вектора касательного напряжения трения на поверхности океана, R – коэффициент трения о дно, Q_T, Q_S – потоки тепла и соли на поверхности.

На «твердых» боковых границах задавались условия прилипания равенства нулю для скорости и условия отсутствия потоков тепла и соли:

$$\Gamma_0: \quad u = 0, \quad v = 0, \quad v_{T,S} \frac{\partial(T,S)}{\partial n} = 0. \quad (15)$$

На «жидких» границах, включающих Берингов пролив и устья рек задавались среднемесячные климатические значения расхода, температуры и солёности поступающих вод. На южной границе области, расположенной в Экваториальной Атлантике, равномерно распределенный задавался сброс вод, поступивших через открытые границы, условия свободного протекания выходящего потока и климатические значения температуры и солёности

Численная модель основана на использовании метода расщепления по физическим процессам и на применении явных, неявных и полунявных численных схем по времени. Пространственная аппроксимация уравнений опирается на метод конечных объемов. Для аппроксимации переноса скаляра и скорости используется численная схема третьего порядка QUICKEST [Leonard, 1979] в трехмерной реализации COSMIC [Leonard, 1996].

Для параметризации процессов конвективного и турбулентного вертикального перемешивания в модель включена дополнительная процедура определения неустойчивых слоев на основе интегрального числа Ричардсона [Голубева и др., 1992]. Процедура отслеживает наличие неустойчивых слоев по всей глубине вертикального столба и, параметризуя мгновенное вертикальное перемешивание, устанавливает однородный вертикальный профиль температуры, солёности, скорости с выполнением законов сохранения тепла, соли и импульса. В модели также

работает параметризация склоновой конвекции – стекания плотной жидкости вдоль морского дна [Платов, 2012].

В численную модель адаптирован пакет одномерных турбулентных моделей GOTM [www.gotm.net]. Различия в моделях пакета GOTM заключаются в способах определения неустойчивости, глубины перемешанного слоя, параметрических уравнениях, используемых для расчета коэффициентов диффузии, эмпирических коэффициентах в параметрических уравнениях. Модели, основанные на уравнениях эволюции кинетической энергии и ее диссипации, принято обозначать ТКЕ (Turbulent kinetic energy). В моделях первого порядка (ТКЕ-1) в качестве эмпирических коэффициентов используются константы, в моделях ТКЕ второго порядка – полиномы второго порядка. В диссертационном исследовании рассматривалась схема первого порядка (ТКЕ-1) с коэффициентами, определёнными в соответствии с работой [Schumann and Gerz, 1995], для модели ТКЕ-2 используется полином с коэффициентами [Canuto, 2001] и широко используемая параметризация KPP (Nonlocal K-Profile Parameterization) [Large, 1994]. В схеме KPP проводится расчет диффузионного коэффициента для граничных (верхнего перемешанного и придонного) слоев и для внутреннего океана. Коэффициенты для внутренних слоев океана учитывают сдвиговую, волновую неустойчивость и процессы двойной диффузии. Особенностью схемы является расчет дополнительного адвективного коэффициента (non-local term) для тепла и соли, соответствующий физическому состоянию турбулентного переноса при неустойчивости, вызванной поверхностными силами.

Ледовая модель является адаптацией численной модели CICE (Los Alamos Ice Model, <https://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0/cice/>).

Во **второй главе** обсуждаются вопросы, связанные с анализом климатической изменчивости состояния вод и ледового покрова Северного Ледовитого океана. Первоначально проводится обзор работ, описывающих современное состояние Северного Ледовитого океана по данным измерений, выделяются основные процессы, на которые опирается в дальнейшем численное моделирование. Среди них наиболее важными являются вариации в состоянии атмосферы полярных и субполярных широт и последующие изменения в интенсивности поступления в арктический бассейн атлантических и тихоокеанских вод, являющихся одними из основных источников тепла для арктических вод.

Для изучения климатической изменчивости СЛО, а также выявления факторов, оказывающих влияние на эту изменчивость, анализируются результаты численного моделирования современного состояния вод и морского льда. Представлены результаты численных экспериментов, проведенных с использованием региональной модели SibCIOM, данных реанализа атмосферы NCEP/NCAR для расчета потоков на поверхности океана и морского льда, и архивов данных океанологических характеристик, используемых для формирования начальных и граничных данных. Область моделирования включает Северную Атлантику и Северный Ледовитый океан, ограниченный Беринговым проливом. Численные эксперименты проводятся с использованием трехполярной сетки с сеточным разрешением G-1 ($1^\circ \times 1^\circ$ в Атлантике и, в среднем, 37 км в Арктике) и G-0.5 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ в Атлантике и, в среднем, 14 км в Арктике).

Результаты численного моделирования показывают сокращение площади морского льда, наиболее интенсивно происходящее в 21 столетии (рис. 1). Несмотря на то, что пространственное распределение и общая площадь ледяного покрова воспроизводятся численной моделью с определенной долей погрешности в рамках крупномасштабного моделирования, модель позволяет определить основные процессы, ответственные за сокращение арктического льда.

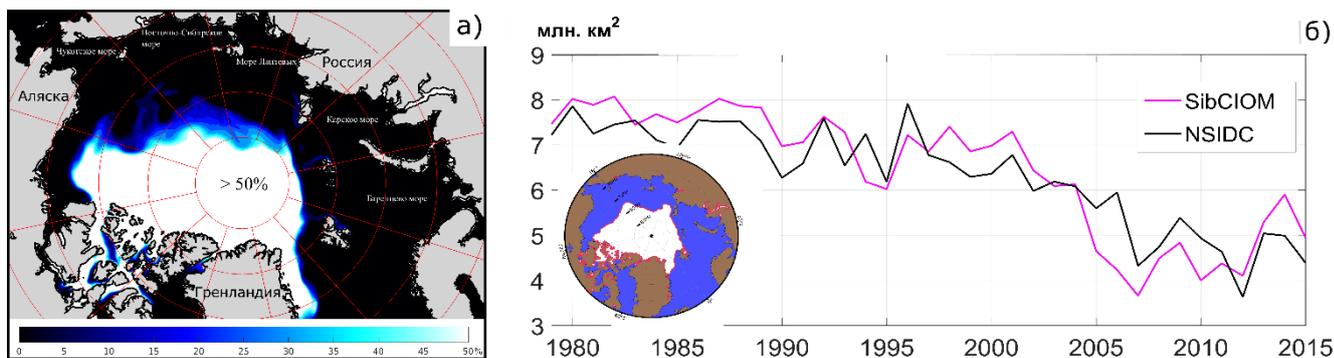


Рис.1. а) концентрация льда в численной модели для сентября, осредненная за 2018-2020; б) временной ход площади льда по данным NSIDC и результатам численного моделирования; граница ледяного покрова для сентября 2019 (15% концентрация) по данным NSIDC.

Анализ результатов трехмерного численного моделирования позволяет проследить изменчивость интенсивности поступления атлантических и тихоокеанских вод в Арктический бассейн. Рис. 2 показывает схематическое представление циркуляции вод СЛО, построенной на основе работ [Rudels et al., 1994, Никифоров, Шпайхер, 1980]: серые стрелки обозначают распространение тихоокеанских вод, Трансарктическое течение, антициклоническую циркуляцию в Канадском бассейне, черные стрелки отражают общепринятую схему циркуляции атлантических вод. Являясь источником тепла для Арктического бассейна, тихоокеанские и атлантические воды оказывают воздействие на состояние ледяного покрова. Изменение положения их верхней границы и траектории способствует перераспределению потоков тепла в вышележащие слои и может оказывать влияние на морской лед.

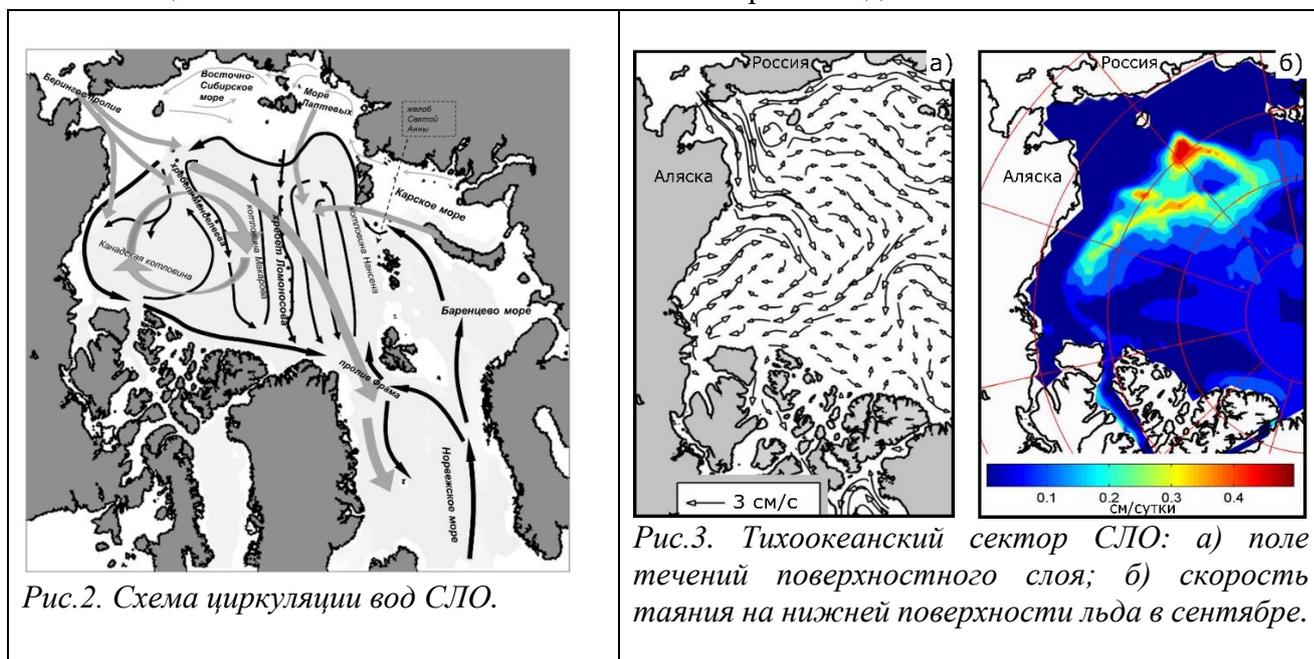


Рис.2. Схема циркуляции вод СЛО.

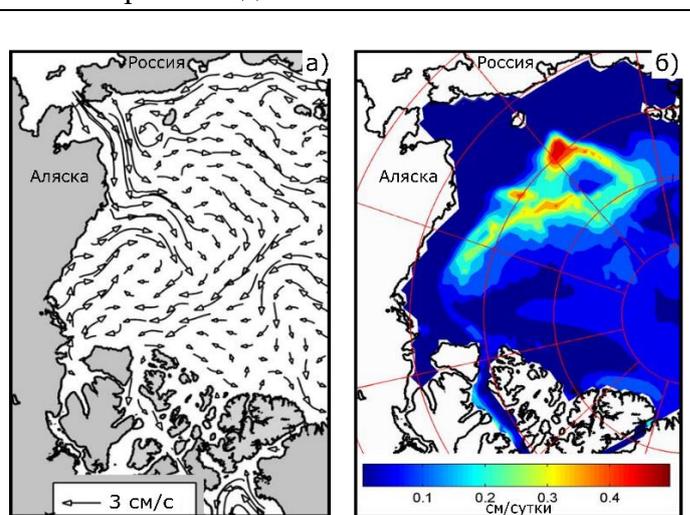


Рис.3. Тихоокеанский сектор СЛО: а) поле течений поверхностного слоя; б) скорость таяния на нижней поверхности льда в сентябре.

В численной модели влияние этих водных масс на распределение и толщину льда проявляется в тихоокеанском (рис. 3) и атлантическом (рис. 4) секторах. В модельных результатах выделяются области, где максимальная скорость таяния на нижней поверхности льда соответствует траектории распространения тихоокеанских и атлантических вод.

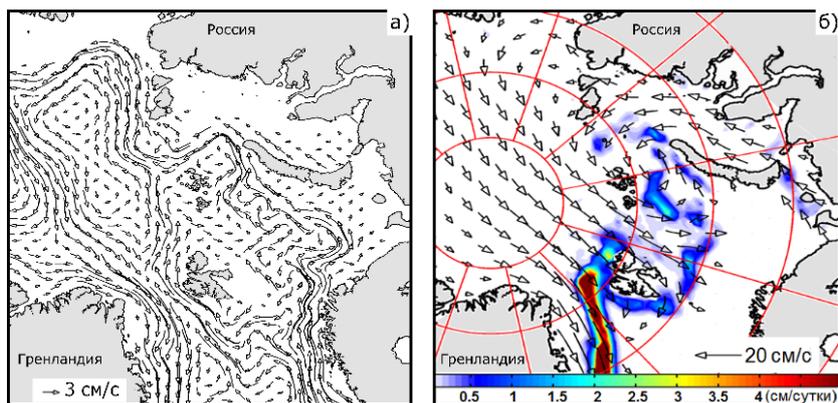


Рис.4. Атлантический сектор СЛО: а) поле течений на глубине 200 м; б) поле дрейфа льда и скорость таяния на нижней поверхности льда в феврале

Для того чтобы оценить роль океана в сокращении арктического льда были оценены потоки тепла на границах океан-лед и атмосфера-лед. Коэффициенты линейной корреляции показывают (рис. 5), что связь между объемом льда и потоком океан-лед наиболее высока в регионах, которые расположены вдоль траектории двух ветвей поступления атлантических вод в Арктику.

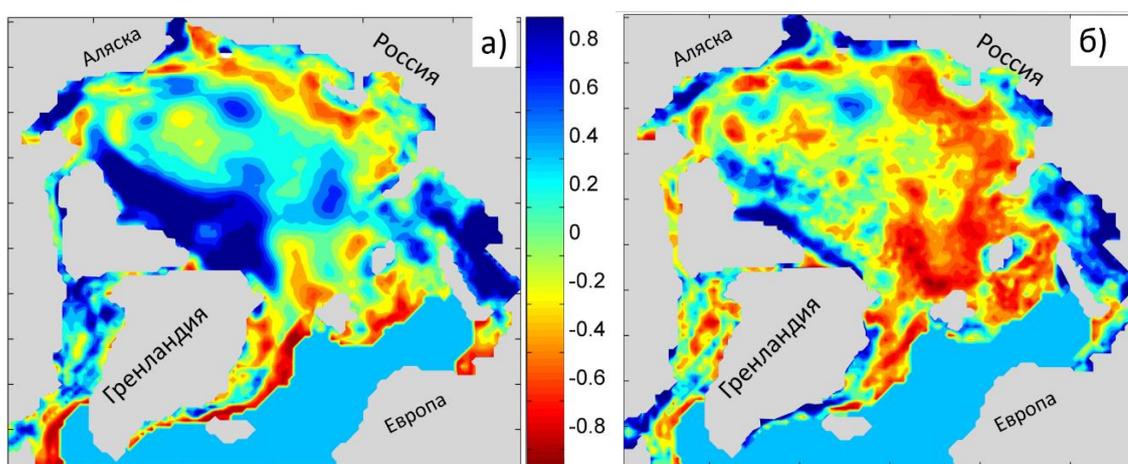


Рис. 5. Распределение коэффициентов корреляции между объемом льда и потоком тепла а) атмосфера-лед; б) океан-лед. Анализ проведен по результатам численного моделирования для временного периода 1997-2015 гг.

В **третьей главе** анализируются результаты серии численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности океанических и ледовых полей СЛО к параметризациям физических процессов, не разрешенных в рамках крупномасштабного моделирования.

1. Исследование чувствительности модели к параметризации вертикального конвективного и турбулентного перемешивания. Серия численных экспериментов, проведенных для сравнения, включала базовую параметризацию, используемую в модели SibCIOM: процедуру мгновенного вертикального перемешивания и установления однородного вертикального профиля в поле температуры, солёности, скорости, основанную на интегральном числе Ричардсона (RI) и три схемы из пакета GOTM, описанные выше. По результатам численных экспериментов проводится анализ вертикального распределения температуры и солёности, и сравнение интегральных характеристик, связанные с состоянием ледового покрова и содержанием пресной воды в море Бофорта. Анализируя результаты моделирования, мы показали, что среди тестируемых параметризаций отсутствует универсальная, использование которой в модели SibCIOM дает наилучшее соответствие данным наблюдений (рис. 6). Базовая параметризация RI, используемая в модели, наиболее близка к параметризациям ТКЕ при оценке площади льда, в то же время она дает лучшее соответствие при оценке содержания пресной воды

в море Бофорта. Широко используемая в численных моделях схема KPP давала результаты, наиболее близко отражавшие состояние ледяного покрова СЛО до 2002 г., однако в последующий период значения площади ледяного покрова оказались существенно заниженными.

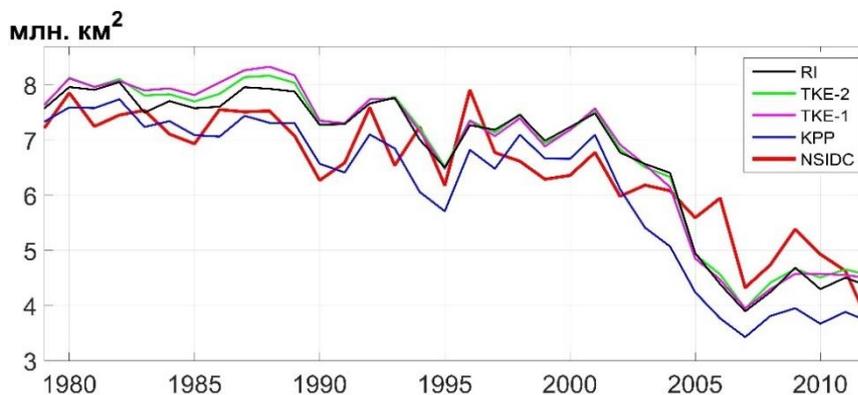


Рис. 6. Межгодовая изменчивость минимальной (сентябрь) площади арктического морского льда для 4-х параметризаций вертикального турбулентного и конвективного обмена и по данным наблюдений NSIDC (<http://nsidc.org/>).

2. Исследование чувствительности модели к параметризации проникающей коротковолновой радиации. Рассматривались два эксперимента: в первом эксперименте предполагалось, что поглощение тепла происходит на основе подхода, предложенного в работе [Jerlov, 1968], заключающегося в распределении коротковолновой радиации в виде суммы двух экспонент. Во втором эксперименте предполагалось, что вся коротковолновая радиация усваивается в верхнем 2.5 м слое океана. Проведенный анализ результатов численного моделирования показал, что в эксперименте с учетом проникающей радиации в верхнем слое океана СЛО (на глубине 10-20 м) формируется подповерхностный температурный максимум (ПТМ), существование которого известно из данных наблюдений. ПТМ выявляется в верхнем слое вертикального распределения температуры в Канадском бассейне СЛО, и несмотря на его сезонное существование и небольшую протяженность по вертикали, играет существенную роль в теплообмене между океаном и льдом. Поглощение радиации только в верхнем слое приводит к исчезновению ПТМ, сглаживанию вертикальных профилей температуры, более интенсивному таянию льда весной и нарастанию осенью, обусловленным изменениями в потоке тепла между океаном и морским льдом (рис. 7).

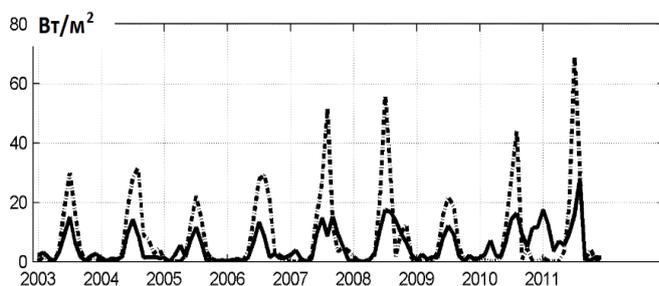


Рис. 7. Осредненный по акватории СЛО поток океан-лед (W/m^2) для периода 2003-2011 гг. Сплошная линия – эксперимент с учетом проникающей радиации, пунктирная линия – эксперимент без учета проникающей радиации.

3. Приведены результаты экспериментов по оценке чувствительности состояния вод Северного Ледовитого океана в численной модели к параметризации диффузии и вихревого переноса. Один из полученных результатов - более интенсивный адвективный перенос, наблюдаемый в картине арктической циркуляции в варианте модели, использующей изопикническую диффузию и параметризацию вихревого переноса, в частности, повышенный приток тепла в Северный Ледовитый океан через пролив Фрама.

В четвертой главе анализируется серия сценарных численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности модельного ледового покрова к изменению состояния вод верхнего слоя СЛО.

1. Рассматриваются два численных эксперимента, в которых анализируются последствия дополнительного усиления циклонической и антициклонической ветровой циркуляции над Норвежским и Гренландским морями. Результаты численного моделирования, показывают, что усиление ветровой активности в предарктическом регионе приводят 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.

2. Исследуется чувствительность состояния ледового покрова к изменчивости начального состояния льда и температуры верхнего слоя океана. Полученное в ходе контрольного эксперимента распределение ледяного покрова отражает его катастрофическое состояние в последнее десятилетие. Сокращение ледового покрова сопровождается формированием акваторий с аномально высокой поверхностной температурой. Серия численных экспериментов, в которых варьировалось начальное состояние ледового покрова и вод СЛО, была проведена на однолетнем (декабрь 2019 - декабрь 2020) и пятилетнем временном интервале (декабрь 2016 - декабрь 2020). Вариации начальных данных основывались на состоянии океана и морского льда, относящимся к началу 2000-х годов, и подразумевали более толстый лед и более холодный верхний слой СЛО. 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. Чувствительность ледовых полей к изменению состояния океанических полей в масштабах одного года менее значительна. Однако, сочетание обоих факторов значительно повышает чувствительность модели (рис. 8), способствуя сохранению ледового покрова и препятствуя поглощению солнечного тепла морскими водами.

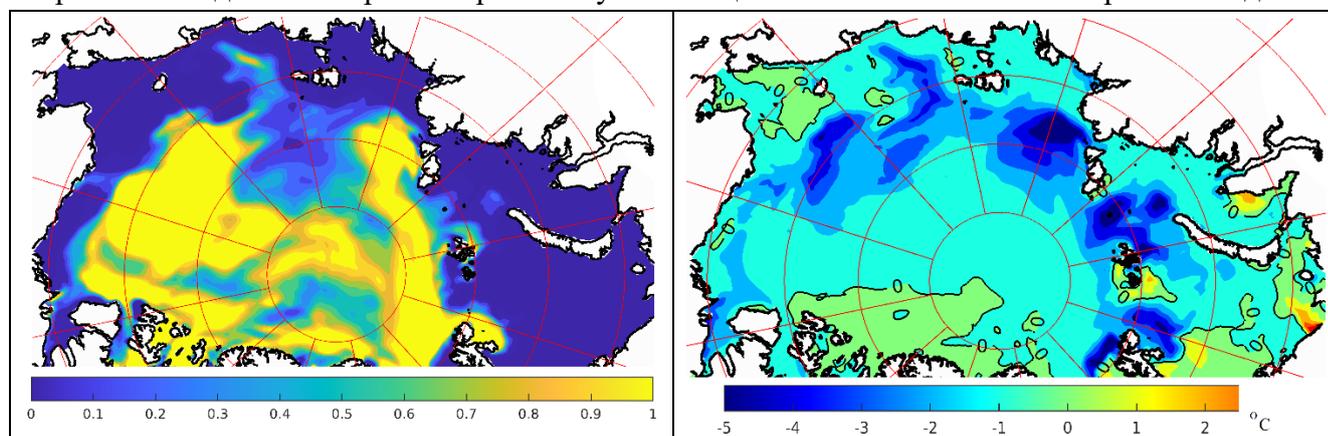


Рис.8. Разность в сентябрьском распределении льда 2020 г. (слева, в м.) и поверхностной температуры (справа) через 1 год расчета (декабрь 2019 - декабрь 2020 гг.) между экспериментом с начальными условиями для 2004 г. и контрольным экспериментом (рис. 1а).

Модель показывает, что при увеличении продолжительности эксперимента до пяти лет отклонения в поле льда из-за различий в его начальном состоянии затухают в первые три года. Отклонения в поле льда, вызванное дополнительным включением более холодного начального состояния океанических полей, наоборот, увеличиваются в течение 2-3 лет, а затем постепенно снижаются до уровня 15-20% по отношению к среднегодовому распределению.

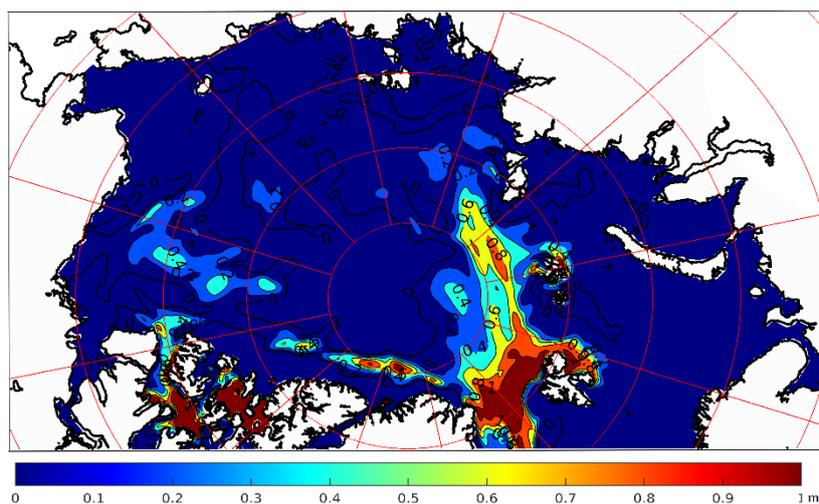


Рис.9. Разность в сентябрьском распределении льда 2020 г. (м) через 5 лет расчета (2016 - 2020 гг.) между экспериментом с начальными условиями для 2004 г. и контрольным экспериментом.

Численная модель показывает, что чувствительность модельных полей температуры поверхности при изменении начального состояния океана и морского льда

сохраняется в течение пяти лет. Уменьшение скорости таяния льда на его границе с океаном летом из-за более холодного состояния океана способствует сохранению ледяного покрова. Наличие льда летом предотвращает поглощение атмосферного тепла и образование областей аномально теплых поверхностных вод даже при экстремально теплом состоянии атмосферы региона.

3. Исследуется чувствительность состояния океана и ледового покрова западного сектора СЛО (Чукотского моря и моря Бофорта) к изменению гидрологических характеристик тихоокеанских вод, поступающих через Берингов пролив. Для проведения численных экспериментов использовались три типа граничных значений: климатические данные температуры, солености и расхода течения для 1990-2003 гг. и 2004-2015 гг., и данные измерений 2016-2019 гг. Анализ результатов показал, что повышение расхода и температуры вод в Беринговом проливе, начавшееся после 2004 г, привело к дополнительному повышению теплосодержания верхнего слоя морей и задержке сроков формирования льда в Чукотском море.

В заключении приведены основные результаты работы:

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 (general ocean turbulent models) 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 предарктическом 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 положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Golubeva, E.; Kraineva, M.; Platov, G.; **Iakshina, D.**; Tarkhanova, M. Marine Heatwaves in Siberian Arctic Seas and Adjacent Region. *Remote Sens.* 2021, 13, 4436. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13214436> (**Web of Science Q1**)
2. Голубева Е. Н., Г. А. Платов, **Д. Ф. Якшина**, Численное моделирование современного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана. // *Лёд и Снег* 2015, № 2 (130), сс. 81-92, <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-81-92> (**ВАК**)
3. **Якшина Д.Ф.**, Голубева Е.Н. Исследование механизмов формирования подповерхностного максимума температуры в Канадском бассейне Северного Ледовитого океана. // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 11. С. 980–985. (**ВАК**)
4. Платов Г. А., Рапута В. Ф., Крупчатников В. Н., Голубева Е. Н., Малахова В. В., Леженин А. А., Боровко И. В., Крылова А. И., **Якшина Д.Ф.**, Крайнева М. В., Кравченко В. В., Коробов О. А. Создание и развитие многокомпонентного комплекса моделей гидродинамических процессов Земли // журнал "Проблемы информатики", 2019, № 2, с.4-35. (**ВАК**)
5. Голубева Е.Н., Малахова В.В., Платов Г.А., Крайнева М.В., **Якшина Д.Ф.** Динамика и тенденции изменения состояния вод и криолитозоны моря Лаптевых в XX-XXI В в. *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 6. С. 529-535. (**ВАК**).
6. Platov G; **Iakshina D**; Krupchatnikov V. Characteristics of Atmospheric Circulation Associated with Variability of Sea Ice in the Arctic // *Geosciences*, 2020, 10(9), 359; <https://doi.org/10.3390/geosciences10090359> (**Web of Science Q2**)
7. Golubeva E., G. Platov, **D. Iakshina**, M. Kraineva. The simulated distribution of the Siberian River runoff in the Arctic Ocean // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 386 (2019) 012022 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/386/1/012022 (**Scopus**)
8. **Iakshina D.F.** Study of the influence of Atlantic water on the ice cover state in the Eurasian basin of the Arctic Ocean using numerical simulation, *Bul . Nov. Comp. Center, Num.Model.in Atmosph., etc.*, 17 (2019), p 9–19 (**РИНЦ**)

9. Krupchatnikov V., **D F Iakshina**, G Platov, Y Martynova and I Borovko On the interaction of atmospheric dynamics Arctic and mid-latitudes under climate change, В сборнике IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 211, Number 1, 2018 (**Scopus**)
10. **Iakshina D. F.**; E. N. Golubeva. Influence of the vertical mixing parameterization on the modeling results of the Arctic Ocean hydrology // Proc. SPIE 1046 1046657 (30 November 2017); doi: 10.1117/12.2285723 (**Web of Science**)
11. Golubeva, E., Platov, G., Malakhova, V., Kraineva, M., **Iakshina, D.** Modelling the long-term and inter-annual variability in the Laptev Sea hydrography and subsea permafrost state. 2017 Polarforschung 87(2), с. 195-210 (**Scopus**)
12. **Якшина Д.Ф.**, Голубева Е.Н. Исследование влияния атлантических вод на состояние ледового покрова в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана с помощью методов численного моделирования, Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды III Всероссийской научной конференции с международным участием: в 4 т. – Барнаул, 2017. – Т. 2. – 240 с.
13. **Якшина Д.Ф.**, Голубева Е.Н. Изучение влияния ветровой циркуляции над Норвежским и Гренландским морями на морской лед в Арктике., Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 4. № 1. С. 151-155. (РИНЦ)
14. **Iakshina D.F.**, E.N. Golubeva, Studying the influence of the wind circulation above the Norwegian and the Greenland seas on the Arctic Sea ice, Bul. Nov. Comp. Center, Num.Model.in Atmosph., etc., 16 (2017), pp 1–11 (РИНЦ)
15. Golubeva E., Platov G., Malakhova V., **Iakshina D.**, Kraineva M. Modeling the impact of the Lena River on the Laptev Sea summer hydrography and submarine permafrost state Bul. Nov. Comp. Center, Num.Model.in Atmosph.,etc.,. 2015. Т. 15. С. 13-22. (РИНЦ)
16. Голубева Е. Н, Платов Г. А., **Якшина Д. Ф.** Численное моделирование влияния атлантических вод на состояние арктического морского льда // Материалы научного конгресса «Гео-Сибирь-2015», 20-22 апреля 2015г . 2015. Т. 4. № 1. С. 205-209. (РИНЦ)
17. **Iakshina D.**, Golubeva E. Sensitivity study of a warm Atlantic layer to diffusion parametrization in the Arctic modeling, Bul. Nov. Comp. Center, Num.Model.in Atmosph.,etc.,. 2014. Т. 14. С. 1-15. (РИНЦ)