

Динамика и тенденции изменения состояния вод и криолитозоны моря Лаптевых в XX–XXI вв.

Е.Н. Голубева^{1,2}, В.В. Малахова¹, Г.А. Платов^{1,2},
М.В. Крайнева¹, Д.Ф. Якшина^{1,2*}

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 20.01.2017 г.

С помощью численного моделирования исследуются возможные причины известного из данных наблюдений повышения температуры вод придонного слоя моря Лаптевых. Появление аномалий придонной температуры в шельфовой области рассматривается как следствие: а) перераспределения водных масс шельфовой зоны, вызванное сменой режимов циркуляции атмосферы; б) затока в шельфовую зону теплых вод атлантического слоя Северного Ледовитого океана, траектория которых проходит по границе шельфовой зоны; в) формирования аномалий температуры, обусловленных тепловым стоком рек. Анализируется влияние повышения температуры вод придонного слоя в области мелководного шельфа на усиление процесса деградации подводной мерзлоты региона. Для оценки предполагаемых будущих изменений в регионе в качестве атмосферных условий на поверхности океана используются результаты расчетов численных климатических моделей, участвующих в сравнительных экспериментах по прогнозу будущего состояния климатической системы. Получены оценки глубины оттаивания, скорости деградации субаквальных мерзлых пород шельфа в условиях современного климата и для прогнозируемых изменений климата в XXI в.

Ключевые слова: море Лаптевых, циркуляция вод, тепловой сток реки Лены, Восточно-Сибирский шельф, криолитозона, подводная мерзлота; Laptev Sea, water circulation, heat flux, East Siberian Shelf, cryolitozone, subsea permafrost.

Введение

Море Лаптевых расположено в Арктической шельфовой зоне России, между полуостровом Таймыр, островом Северная Земля и Новосибирскими островами. Большая часть моря имеет небольшую глубину (менее 30 м), наиболее мелководная — южная часть. К северу дно постепенно понижается от 50 до 100 м, затем глубина резко увеличивается, от 2000 м и до максимума, равного 3385 м [1]. Физические процессы, происходящие в море Лаптевых, оказывают влияние на формирование ледово-гидрологического режима Северного Ледовитого океана (СЛО). Регион находится под воздействием материкового стока сибирских рек, крупнейшая из которых — река Лена. В летний период сток рек, сосредоточенных по побережью моря, оказывает распространяющее действие на обширной акватории и обеспечивает стабильность стратификации поверхностных вод СЛО. В зимний период характерно формирование припайного льда, что является одной из причин, при-

водящих к образованию полыньи моря Лаптевых, в которой происходит интенсивное образование нового льда, включающегося в дальнейшем в Транс-полярный дрейф [2].

Море Лаптевых — одно из самых суровых арктических морей, около девяти месяцев в году покрытое льдом. Находясь в центральной части обширного Евразийского шельфа, на значительном удалении от Атлантического и Тихого океанов, море Лаптевых лишено непосредственного воздействия тепла, поступающего в Северный Ледовитый океан с тихоокеанскими и атлантическими водами. Однако глубинная часть моря может испытывать воздействие атлантических вод, распространяющихся в СЛО вдоль материкового склона. Данные гидрологических наблюдений, проводимых на континентальном склоне моря Лаптевых, содержат информацию о межгодовой изменчивости состояния вод внешней зоны шельфа, граничащей с материковым склоном. Анализ данных [3] позволяет выделить два относительно теплых периода придонных вод шельфовой зоны моря: 1930–1950 и 1990–2000 гг., и холодный период 1960–1980 гг. Выявленная изменчивость коррелирует с вариациями температуры в ядре атлантических вод, поступающих в Северный Ледовитый океан через пролив Фрама и Баренцево море и распространяющихся в циклоническом направлении вдоль материкового

* Елена Николаевна Голубева (elen@ommfao.ssc.ru); Валентина Владимировна Малахова (malax@ssc.ru, malaxv@list.ru); Геннадий Алексеевич Платов (platov.g@gmail.com); Марина Владимировна Крайнева (krajneva-m@yandex.ru); Дина Фаруковна Якшина (yusupova.dina.f@gmail.com).

склона Евразии [4]. Данные наблюдений для 1920–2009 гг. в мелководной части шельфа и прибрежной зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря отражают значительное повышение придонной температуры (до 2,1 °С), начавшееся с середины 1980-х гг. [5].

Шельф морей восточной Арктики рассматривается как область, в пределах которой возможно существование многолетнемерзлых субаквальных пород, достоверные сведения о которых получены на основании буровых профилей [6]. Разрушение субаквальной криолитозоны происходит в основном под действием глубинного теплового потока на нижней границе. Положительная температура придонного слоя может влиять на состояние подводной мерзлоты (усилить процесс деградации многолетнемерзлых пород и способствовать образованию несквозных таликов [7]), что, в свою очередь, может приводить к дестабилизации газовых гидратов Восточно-Сибирского шельфа, зона стабильности которых связана с существованием многолетнемерзлых субаквальных пород, и к газонасыщению верхнего слоя донных отложений. В последние годы в этом районе на отдельных участках шельфа регистрируются интенсивные выбросы метана вблизи дна, что может свидетельствовать о высвобождении газа при дестабилизации гидратов метана [8].

В настоящей работе обсуждаются результаты численного моделирования процессов, происходящих в море Лаптевых, оцениваются возможные изменения состояния придонных вод до конца XXI в., рассчитанные при заданном атмосферном воздействии, соответствующем наиболее экстремальному сценарию антропогенного влияния на климатическую систему Земли, RCP8.5 [9]. Анализируются возможные последствия повышения температуры вод придонного слоя с точки зрения его влияния на термический режим донных отложений моря Лаптевых.

Постановка задачи

Задачей исследования стало воспроизведение циркуляции вод и изменчивости распределения термодинамических характеристик вод моря Лаптевых с помощью непрерывного расчета трехмерных полей на основе численной модели океана и морского льда. В первой части численного эксперимента для формирования потоков на поверхности океана и морского льда использовались данные атмосферного реанализа CORE2 [10] за 1948–2005 гг. Анализ результатов моделирования позволил выявить физические механизмы изменчивости состояния моря Лаптевых, а также оценить возможности модели в воспроизведении физических процессов, происходивших в регионе в прошлом, на основе сравнения с данными наблюдений. Для оценки предполагаемых изменений до конца XXI в. во второй части численного эксперимента, с 2006 до 2100 гг., потоки рассчитывались с использованием атмосферных полей, полученных из расчета по совместной модели климата CNRM CM5 [11] в предположении развития наиболее аг-

рессивного климатического сценария антропогенного воздействия RCP8.5 [9].

Численная модель океана и морского льда

Для проведения численных экспериментов используется трехмерная региональная численная модель СЛО и Северной и экваториальной Атлантики, разработанная в ИВМиМГ СО РАН (далее модель СЛО–СА). Океаническая модель [12, 13] базируется на системе полных нелинейных уравнений гидротермодинамики океана, выписанных в криволинейных ортогональных координатах с использованием традиционных приближений гидростатики и Буссинеска. В модель включены следующие параметризации: диффузионного горизонтального перемешивания на основе операторов второго порядка, мгновенного конвективного перемешивания с привлечением дополнительной модели верхнего квазиоднородного слоя океана; конвективного перемешивания в условиях неполного ледового покрова; переноса аномалий плотной воды вдоль наклонного шельфа [14]. Для описания процессов формирования, таяния и дрейфа льда используется модель морского льда SIC3 [15].

Область моделирования включает СЛО, экваториальную и северную части Атлантического океана начиная с 20° ю.ш. При построении численной модели используется трехполярная сетка. Пространственное разрешение для Северной Атлантики выбрано равным 0,5° × 0,5°, что обеспечивает разрешение в СЛО 15–25 км. Вертикальное разрешение модели 38 горизонтов, при этом в поверхностном слое шаг сетки по вертикали составляет 5 м. Численная модель использует z-систему вертикальной координаты, что ограничивает вертикальное разрешение мелководной шельфовой области 5 расчетными узлами.

Определение граничных условий на поверхности океана и морского льда, расчет потоков на открытых границах, начальные условия описаны в работе [16].

Моделирование изменчивости гидрологических характеристик моря Лаптевых

Результаты численных экспериментов воспроизводят пространственно-временную изменчивость гидрологических и ледовых полей СЛО, вызванную изменениями состояния атмосферы полярных районов северного полушария. Первый этап численного эксперимента, проведенный с использованием данных реанализа атмосферы, показал, что несмотря на грубое разрешение численной модели, расчеты воспроизводят климатическую и сезонную изменчивость состояния вод СЛО и Восточно-Сибирского шельфа, известную из данных наблюдений. В зимний период в большей части моря формируется припайный лед, изолирующий водные массы от непосредственного

воздействия атмосферы. В летний период динамика атмосферы, напротив, является определяющим фактором в формировании циркуляции водных масс шельфовой зоны [17].

Модельные расчеты показывают, что циклонический режим циркуляции атмосферы региона с преобладанием северо-западных ветров в летний период способствует распространению пресных речных вод в восточном направлении (рис. 1, *а, в*). В этот период в поверхностном слое шельфа моря Лаптевых наблюдается поток, переносящий более соленую воду из северных районов океана, что ослабляет устойчивость стратификации средней зоны шельфа. Процесс перемешивания, вызванный штормовым ветром, может приводить к передаче тепла в придонный слой моря (рис. 1, *д*).

В период установления в регионе антициклонической атмосферной циркуляции существенно меняется картина циркуляции вод. В море Лаптевых южный и юго-восточный ветра формируют направленный на север перенос в поверхностном слое шельфа

(рис. 1, *б, з*). Распространение пресных вод реки Лены в северном направлении содействует повышению устойчивости стратификации в области среднего шельфа, что препятствует перемешиванию и распространению тепла поверхностных вод в придонный слой (рис. 1, *е*).

Эпизодическое появление в модели более теплой воды в придонном слое моря на внешней части шельфа, граничащей с материковым склоном (глубины 50–150 м), вызвано контактом с теплыми и солеными водами атлантического слоя, располагающегося в СЛО на глубинах от 150 до 1000 м [4]. В численном эксперименте это происходит в период интенсивного поступления в СЛО Фрамовской ветви атлантических вод, следующих вдоль материкового склона Евразийского бассейна (1989–1995 гг.) (рис. 2, *а*). Изменчивость траектории атлантических вод в СЛО подробно обсуждается в работах [16, 18]. В частности, в отдельные периоды в численных результатах явно выражен апвеллинг на материковом склоне моря Лаптевых (рис. 2, *б*). В зону среднего

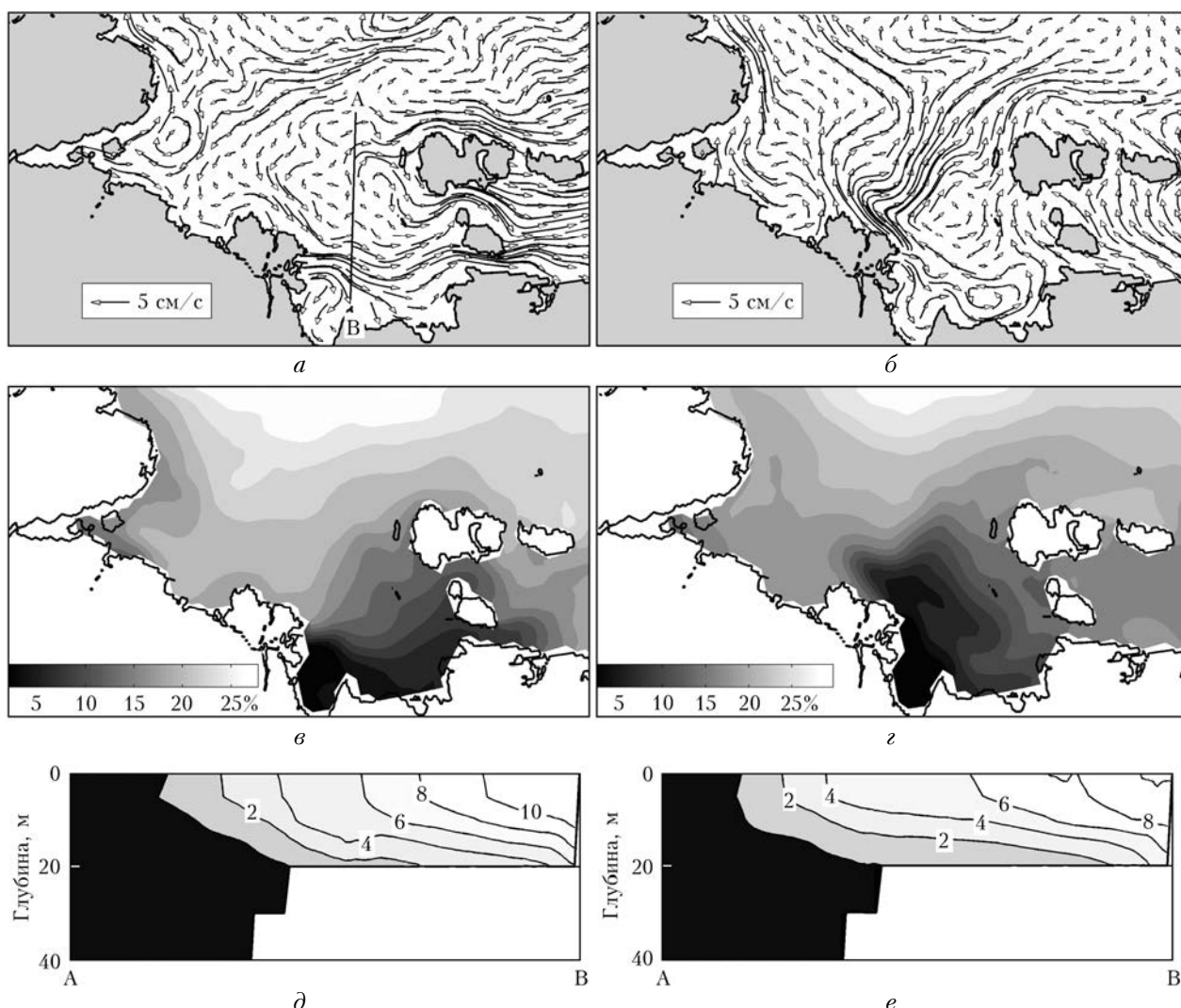


Рис. 1. Два основных режима летней циркуляции в море Лаптевых, определяемых атмосферной динамикой: циклонический (*а, в, д*) и антициклонический (*б, з, е*); *а, б* – поле поверхностных течений; *в, з* – распределение солёности на поверхности моря; *д, е* – распределение температуры (°C) на разрезе, обозначенном на фрагменте *а*

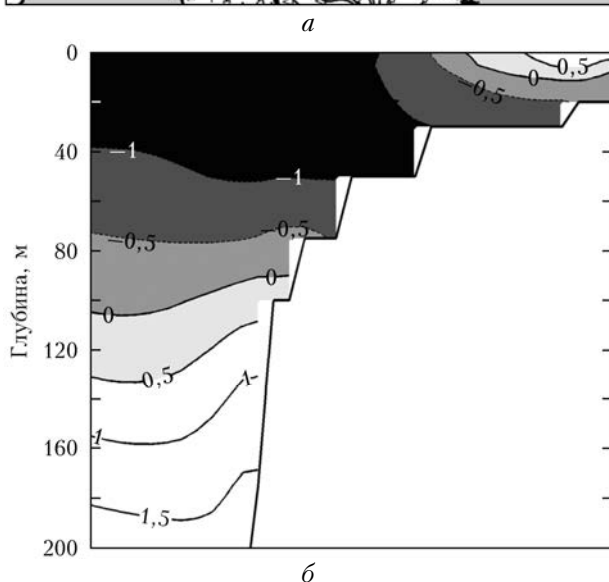
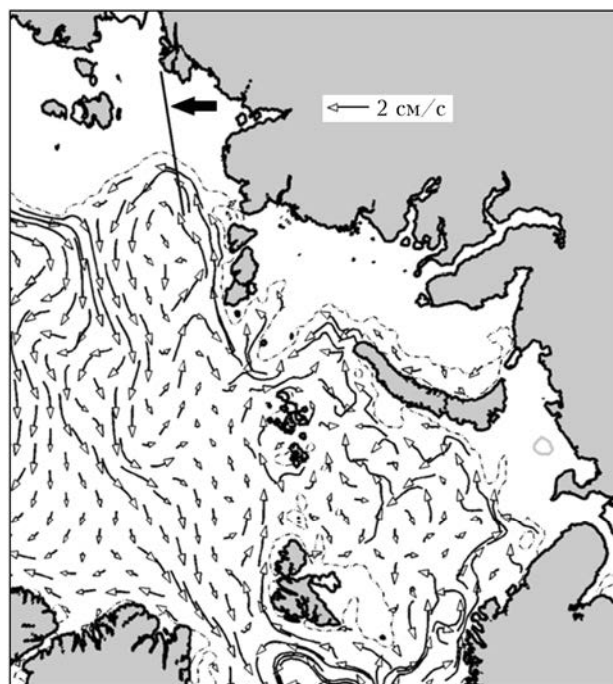


Рис. 2. Возможное влияние атлантического слоя СЛО на температуру шельфовой области: *а* – циркуляция вод на глубине 150 м, распространение атлантических вод вдоль материкового склона; *б* – распределение температуры на вертикальном разрезе, выходящем на шельф моря Лаптевых (разрез показан на фрагменте *а*); подъем изотерм в области внешнего шельфа, выходящего на материковый склон, моделирует передачу тепла от слоя атлантических вод шельфовым водам

шельфа (глубины 30–50 м) проникновение вод атлантического слоя затруднено, а повышение придонной температуры может быть обусловлено вышеописанными процессами перемешивания поверхностных и придонных вод или распространением теплых речных вод.

В работе [19] было показано, что возможным механизмом формирования аномалий температуры придонного слоя мелководной прибрежной части

моря Лаптевых является тепловой сток рек. Поток тепла, поступающий с водами реки Лены, вызывает дополнительное таяние льда в регионе моря Лаптевых (10% по сравнению с вкладом атмосферы). Наибольшие значения аномалий температуры, обусловленных речным стоком, моделируются в непосредственной близости от дельты реки. Распространение аномалий на шельфе моря Лаптевых зависит от циркуляции вод в летний сезон; в осенне-зимний период максимальные значения концентрируются в придонном слое вдоль береговой линии в соответствии с процессами перемешивания и формирующейся системой циркуляции вод.

Тенденции возможного изменения температуры придонных вод

Атмосферный форсинг второй части численного эксперимента, полученный в результате работы модели климатической системы [11] для наиболее экстремального сценария, показывает устойчивый положительный тренд температуры атмосферы полярных широт (рис. 3, *а*). Использование в модели СЛО–СА этих расчетных полей для формирования потоков приводит к появлению положительных аномалий температуры и в поверхностном слое СЛО и, в частности, моря Лаптевых. Результаты численного эксперимента показывают, что начиная со второй половины XXI в. происходят исчезновение летнего ледового покрова, повышение температуры поверхностных вод и постепенное проникновение тепла в нижележащие слои, способствующие установлению положительной придонной температуры в области мелководного шельфа (рис. 3, *б*). В области глубокого шельфа, выходящей к материковому склону, в этот же период происходит еще и значительное повышение температуры в придонном слое (рис. 3, *в*), что может быть вызвано только интенсификацией поступления теплых атлантических вод и затокном их в шельфовую область.

Моделирование динамики шельфовой криолитозоны

Анализ придонной температуры вод морей Восточно-Сибирского шельфа представляется важным, поскольку сезонная и межгодовая динамика температуры придонного слоя обеспечивают современное состояние подводной мерзлоты и влияют на интенсивность процессов ее деградации. Для расчета теплопереноса в грунте используется модель мерзлоты, разработанная в ИФА РАН, адаптированная для случая субаквальной криолитозоны в донных отложениях [20, 21]. Постановка задачи включает уравнение теплопроводности для талого и мерзлого слоев донных отложений (при условии сопряжения их контактов), начальные условия, краевые условия на поверхности и нижней границе мерзлого слоя. Для исследования динамики мерзлоты и определения ее мощности используется палеогеографический

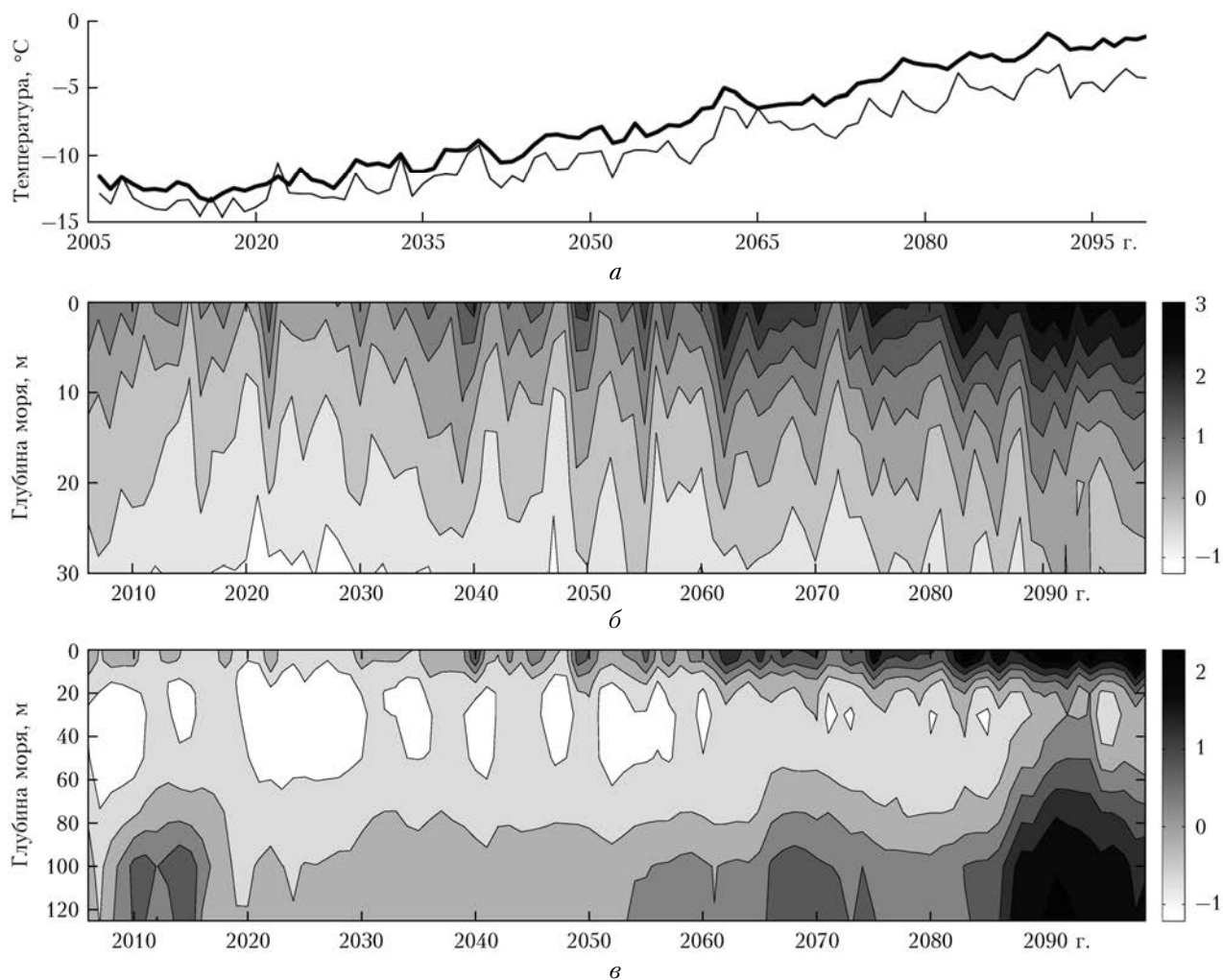


Рис. 3. Численный эксперимент по оценке тенденции изменения температуры моря Лаптевых, 2006–2100 гг.: *a* – средняя по полярным широтам (полужирная линия) и по региону моря Лаптевых (тонкая линия) температура атмосферы, используемая для расчета потоков на поверхности океана; *б* – временная изменчивость температуры вод моря Лаптевых, средняя по мелководному шельфу (< 30 м) и *в* – среднему и внешнему шельфу (> 30 м)

сценарий, учитывающий изменения уровня океана и формирование мерзлых толщ в субарктических условиях [21]. Для периода 1948–2100 гг. моделирование динамики толщи субаквальных мерзлых пород шельфа проводилось с учетом рассчитанной на основе модели СЛО–СА температуры придонной воды.

В настоящей работе принимается во внимание влияние солёности поровых вод на температуру начала оттаивания/замерзания грунта, которое ранее не было учтено. Большую роль в засолении мерзлых пород играют морские трансгрессии. В численном эксперименте задавалось распределение солёности в верхнем слое донных отложений с учетом времени последней трансгрессии 15–5 тыс. лет назад, в соответствии с [22]. Мы исходим из предположения, что за время затопления шельфа морской водой происходит засоление верхнего слоя донных отложений и его глубина зависит от времени трансгрессии. Глубина выравнивания концентрации солей оценивается по формуле $Z_S = \sqrt{Dt_S}$, где t_S – время пребыва-

ния криолитозоны под морем за время трансгрессии, D – коэффициент диффузии солей. При этом поверхностное распределение солёности поровых вод соответствует солёности придонной воды из среднеклиматических данных для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Температура замерзания поровых вод определяется с учетом солёности (S): $T_F = -0,054S$.

Проведенное исследование показало, что положение верхней границы многолетнемерзлого слоя в осадочных разрезах морей Восточной Сибири существенно зависит от содержания солей. Увеличение содержания солей в поровых водах приводит к росту толщины верхнего талого слоя современной зоны многолетнемерзлых пород. В численном эксперименте получено, что на 2012 г. верхняя граница (кровля) мерзлых осадков расположена на глубине 14–27 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа (рис. 4, *a*). В связи с неравномерностью засоления шельфа, которое определяется временем затопления и распределением солёности

в придонном слое воды, кровля мерзлоты понижается в направлении от берега. Получены скорость деградации засоленного мерзлого слоя с 1948 по 2006 г. (0–4 см/г) и температура мерзлых грунтов (около –1,5–2,0 °С).

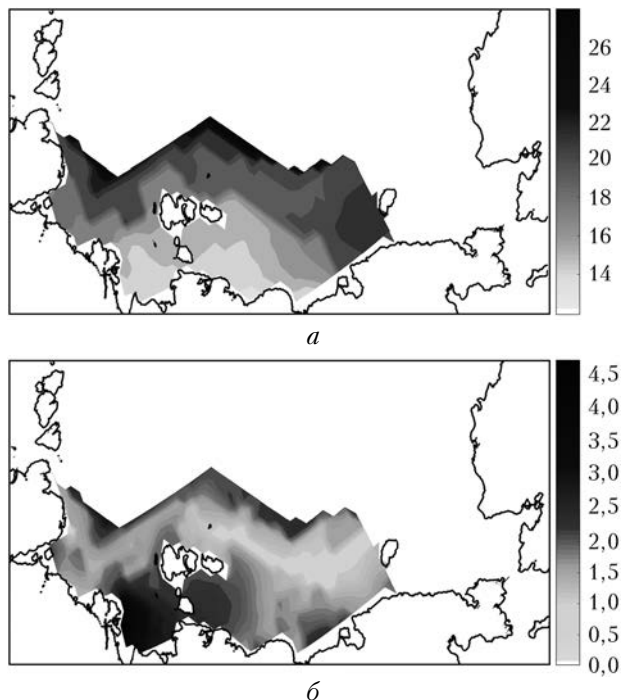


Рис. 4. Модельное состояние подводной мерзлоты на шельфе Восточной Арктики (в м): *а* — положение верхней границы мерзлых пород в донных отложениях шельфа; *б* — глубина оттаивания мерзлых пород от морского дна за период 2012–2100 гг.

Рост температуры придонных вод к концу XXI в. приводит к дальнейшему заглублению верхней границы мерзлого слоя донных отложений, до 5 м относительно 2012 г. (рис. 4, *б*). Понижение верхней границы мерзлоты, по-прежнему, более выражено в юго-восточном секторе моря Лаптевых за счет потепления придонного слоя воды под влиянием теплового стока реки Лены. Скорость деградации мерзлого слоя сверху в этом районе за период 2006–2100 гг. изменилась незначительно (относительно периода 1948–2006 гг.) и составила 4–6 см/г. Более заметное понижение кровли, до 3,5 м, можно наблюдать на внешнем шельфе, который находится под воздействием теплых атлантических водных масс. В результате потепления придонного слоя воды до положительных значений после 2060 г. темпы деградации подводной мерзлоты увеличиваются. Однако скорости деградации в этой области шельфа за весь период расчета с 2006 по 2100 г. не превышают 2,5 см/г.

Заключение

В настоящей работе на основе численного моделирования исследованы возможные причины известного из данных наблюдений повышения температуры вод придонного слоя моря Лаптевых. Результаты

численных экспериментов, проведенных на основе трехмерной численной модели океана и морского льда с использованием данных атмосферного реанализа, восстанавливают изменчивость состояния и циркуляции вод Северного Ледовитого океана и его шельфовой зоны. Среди возможных причин появления аномалий придонной температуры в регионе моря Лаптевых в настоящей работе рассматриваются: *а*) перераспределение водных масс шельфовой зоны, вызванное сменой режимов циркуляции атмосферы; *б*) возможность затока в шельфовую зону теплых вод атлантического слоя СЛО, траектория которых проходит по границе шельфовой зоны; *в*) формирование аномалий температуры, обусловленных тепловым стоком рек. Все эти процессы присутствуют в результатах численного моделирования, однако выделить один из них, наиболее ответственный за наблюдаемое в регионе потепление, не представляется возможным в силу большой неопределенности модельного описания процессов в СЛО и отсутствия необходимого длительного ряда наблюдений.

Численный эксперимент, проведенный с использованием данных атмосферного сценария антропогенного воздействия на климатическую систему, показал катастрофическую реакцию океана на предполагаемое потепление атмосферы полярных районов. Эта реакция выражается в установлении сезонности арктического морского льда и значительном повышении температуры вод шельфовых районов. Результаты численного эксперимента показывают, что прогрев мелководного шельфа происходит за счет поступления тепла из поверхностных в нижележащие слои, а повышение температуры внешнего шельфа обусловлено усилением потока аномально теплых атлантических вод.

На основе совместного расчета по моделям океана и донных отложений получена пространственно-временная изменчивость положения верхней границы многолетнемерзлых пород для шельфа восточного сектора Арктики. Проведенное исследование показывает, что температура придонного слоя морской воды является важным фактором, влияющим на современное состояние субкавальной мерзлоты. Однако большая глубина оттаивания мерзлых донных отложений обусловлена их засолением вследствие миграции солей в поровое пространство после затопления шельфа соленой морской водой в период трансгрессии.

Согласно расчетам с учетом возможных климатических изменений на протяжении XXI в. средняя скорость деградации мерзлоты в период 2006–2100 гг. максимальна в юго-восточной части моря Лаптевых — до 6 см/г. Дополнительное опускание кровли мерзлоты в донных отложениях за счет потепления придонного слоя воды может составить не более 5 м. Проведенные численные расчеты и результаты анализа позволяют предположить, что прогнозируемое потепление недостаточно для полной дестабилизации подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 15-05-02457 А, 16-35-00439 мол а, 16-05-00558 А, 17-05-00396 А, 17-05-00382 А. Исследование проводится в соответствии с темами, обсуждаемыми

на ежегодных совещаниях программы FAMOS, финансируемой National Science Foundation Office of Polar Program и German Federal Ministry of Education and Research (BMBF, Project LenaDNM, Grant identifier 01DJ1400). Авторы благодарны координаторам FAMOS и BMBF за предоставление финансовой поддержки для поездки на совещания.

1. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР*. Т. 11: Море Лаптевых. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 278 с.
2. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 213 с.
3. *Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B., Bauch D., Hölemann J.A., Krumpfen T., Kassens H., Wegner C., Heinemann G., Schröder D.* Impact of the Arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. C08010. DOI: 10.1029/2009JC006020.
4. *Rudels B., Schauer U., Björk G., Korhonen M., Pisarev S., Rabe B., Wisotzki A.* Observations of water masses and circulation with focus on the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s // *Ocean Sci.* 2013. V. 9. P. 147–169. DOI: 10.5194/os-9-147-2013.
5. *Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B., Kassens H., Anisimov O.A., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N.* Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. C10027. DOI: 10.1029/2011JC007218.
6. *Rachold V., Bolshiyarov D.Y., Grigoriev M.N., Hubberten H.W., Junker R., Kunitzky V.V., Merker F., Overduin P.P., Schneider W.* Nearshore Arctic subsea permafrost in transition // *EOS.* 2007. V. 88, N 13. P. 149–156.
7. *Malakhova V.V., Golubeva E.N.* Modeling of the dynamics subsea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf under the past and the future climate changes // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 92924D. DOI: 10.1117/12.2075137.
8. *Shakhova N.E., Semiletov I.P., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Gustafsson O.* The East Siberian Arctic Shelf: Towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philos. Trans. R. S. A.* 2015. V. 373, N 2052. P. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
9. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* / T. Stoker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
10. *Yeager S.G., Large W.G.* CORE.2 Global Air-Sea Flux Dataset. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/10.5065/D6WH2N0S>. (дата обращения 11.01.2016).
11. *Lawrence* Livermore National Laboratory (LLNL ESGF). [Электронный ресурс]. URL: <https://pcmdi.llnl.gov/projects/esgf-llnl/> (дата обращения 17.03.2016).
12. *Golubeva E.N., Platov G.A.* On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. C04S05. DOI: 10.1029/2006JC003734.
13. *Голубева Е.Н.* Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычисл. технол.* 2008. Т. 13, № 5. С. 11–24.
14. *Платов Г.А.* Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Часть II: Результаты регионального и глобального моделирования // *Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 2. С. 409–425.
15. *Hunke E.C., Dukowicz J.K.* An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27, N 9. P. 1849–1867.
16. *Голубева Е.Н., Платов Г.А.* Численное моделирование отклика Арктической системы «океан–лед» на вариации атмосферной циркуляции 1948–2007 гг. // *Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана.* 2009. Т. 45, № 1. С. 145–160. DOI: 10.1134/S0001433809010095.
17. *Dmitrenko I., Kirillov S., Eicken H., Markova N.* Wind driven summer surface hydrography of the eastern Siberian shelf // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L14613. DOI: 10.1029/2005GL023022.
18. *Голубева Е.Н., Платов Г.А., Якишина Д.Ф.* Численное моделирование современного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана // *Лед и снег.* 2015. Т. 55, № 2. С. 81–92.
19. *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 // *Bull. Nov. Comp. Center. Num. Model. Atmos., etc.* 2015. N 15. P. 13–22.
20. *Елисеев А.В., Малахова В.В., Аржанов М.М., Голубева Е.Н., Денисов С.Н., Мохов И.И.* Изменение границ многолетнемерзлого слоя и зоны стабильности гидратов метана на Арктическом шельфе Евразии в 1950–2100 гг. // *Докл. АН.* 2015. Т. 465, № 5. С. 598–603.
21. *Малахова В.В., Голубева Е.Н.* Оценка устойчивости состояния мерзлоты на шельфе Восточной Арктики при экстремальном сценарии потепления в XXI в. // *Лед и снег.* 2016. Т. 56, № 1. С. 61–72. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-1-61-72.
22. *Разумов С.О., Снектор В.Б., Григорьев М.Н.* Модель позднекайнозойской эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых // *Океанология.* 2014. Т. 54, № 5. С. 679–693.

E.N. Golubeva, V.V. Malakhova, G.A. Platov, M.V. Kraineva, D.F. Yakshina. **Dynamics and tendencies of the Laptev Sea hydrology and cryolitozone state in the 20th–21st centuries.**

The variability of the Laptev Sea hydrodynamics is analyzed on the basis of the Arctic Ocean model developed in ICMMG SB RAS. Based on the numerical simulation, we explore possible reasons for the increase in the bottom layer temperature known from observations, including: a) redistribution of water masses over the shelf zone forced by atmospheric dynamics; b) Laptev sea on-shelf inflow of warm and saline waters of Atlantic Layer of the Arctic Ocean, and c) the redistribution of water mass temperature anomalies caused by the heat river flux. The effect of the increase in the bottom layer temperature of the coastal region on the enhancement of underwater permafrost degradation is studied. The upper boundary of the permafrost depth and the permafrost thawing rate are estimated for the modern climate conditions and under the forecasted Arctic climate changes in the 21st century.