

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

Смирнов Юрий Юрьевич

**Временная динамика зон стабильности криогенных газовых гидратов на  
шельфе российских морей**

Специальность 1.6.17 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург  
2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

*Научный руководитель:*

**Чанцев Валерий Юрьевич,**  
кандидат географических наук, доцент  
кафедры ПО и КУПЗ ФГБОУ ВО «РГГМУ»

*Научный консультант:*

**Матвеева Татьяна Валерьевна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
ученый секретарь – и.о. начальника сектора  
НРУ ФГБУ «ВНИИОкеангеология»

*Официальные оппоненты:*

**Васильев Александр Алексеевич,** доктор  
геолого-минералогических наук, главный  
научный сотрудник отдела Мониторинга и  
информационно-геосистемного моделирования  
криолитозоны ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

**Рокос Сергей Игоревич,** кандидат  
географических наук, ведущий геолог  
Геологической партии АО «АМИГЭ»

*Ведущая организация:*

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки **Тихоокеанский  
океанологический институт им. В. И.  
Ильичева** Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Владивосток

Защита диссертации состоится **29 января 2026 года в 15:00** на заседании диссертационного совета РГГМУ 24.2.365.03 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «РГГМУ» <https://rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО составителя, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д.79, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.365.03 Ершовой А. А., а также в формате pdf на e-mail: [ds@rshu.ru](mailto:ds@rshu.ru).

Ученый секретарь диссертационного  
совета 24.2.365.03, к.г.н.

А. А. Ершова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Газовые гидраты – кристаллические соединения воды и газа, образующиеся при высоком давлении и относительно низких температурах – в условиях, называемых «равновесными» [Sloan, 1998; Мах, 2000]. Основным гидратообразователем природных гидратов является метан. Изучение природных газовых гидратов требует комплексирования методов геологии, геофизики и океанологии, поскольку предмет изучения расположен на стыке этих наук. За последние десятилетия изучение газовых гидратов вышло за рамки одной дисциплины, оказавшись на пересечении множества научных направлений от физической химии до океанологии и геологии.

Газовые гидраты – это часть тонкой структуры осадочной оболочки нашей планеты, чувствительная к изменениям её динамической системы. Образование газовых гидратов в природных обстановках определяется множеством факторов, одними из самых важных для подводных газовых гидратов являются термобарические условия в морских отложениях и придонных водах, определяемые в основном тепловым полем Земли и Мирового океана (МО), а также уровнем МО. Будучи связанными со множеством разномасштабных динамических процессов литосферы и опосредованно – гидросферы, газовые гидраты можно рассматривать как элемент системы, характеризующий её инерционность – скорость и интенсивность изменений литосфере и гидросфере под действием эндогенных и экзогенных факторов. В этом заключается фундаментальная значимость природных газовых гидратов, к изучению которых человечество приступило с 60-ых годов XX века, когда впервые в мире советскими геологами были открыты природные гидраты метана в зоне многолетнемерзлых пород Западной Сибири [Макогон, 1974]. Стоит отметить, что первый в мире керн, содержащий газовые гидраты морских отложений был также отобран отечественными исследователями в 1972 году со дна Черного моря [Кузнецов и др., 2003].

Как индикатор состояния динамической системы, изучение природных и в частности, «криогенетических», то есть связанных с геологическими процессами, вызванных многолетним промерзанием и оттаиванием влагосодержащих пород, газовых гидратов важно в контексте наблюдаемых в настоящий момент глобальных климатических изменений на Арктических шельфах, в зонах сохранения реликтовых многолетнемерзлых пород. Процессы, протекающие в криосфере Земли, затрагивают криогенетические газогидраты и подводную многолетнюю мерзлоту, что вызывает озабоченность ученых всего мира в связи с интенсивной деградацией последней [Osterkamp, 2001; Angelopoulos et al., 2019]. Как следствие, возможная дестабилизация криогенетических газовых гидратов,

способных заключать в себе значительные количества природного газа [Shakhova et al., 2014], является актуальной проблемой. Вопросы потепления климата, деградации мерзлых толщ и активизации опасных криогенных процессов, влияющих не только на природные обстановки, но и осложняющие инженерно-геологические работы в Арктике, в том числе, и вдоль трассы Северного морского пути, ставят в ряд приоритетных проблему пространственно-временной изменчивости подводной мерзлоты и, особенно - ее глобальное распространение. Роль газовых гидратов в планетарном цикле углерода, объемы заключенных в них ресурсов природного газа, а также отклик природных газовых гидратов на современные изменения климата – актуальные вопросы, неразрывно связанные с состоянием субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП) на шельфе.

Поскольку документальных сведений о распространении мерзлых пород (особенно реликтовых) на Евразийском арктическом шельфе России относительно немного, и все они приурочены к Баренцево-Карскому и очень локально к Лаптевоморскому шельфам, таких данных явно недостаточно для обоснованного картирования СММП в региональном масштабе. Известны немногочисленные данные о наблюдении верхней границы реликтовой мерзлой зоны по данным бурения, пробоотбора и геофизики (сейсморазведка и электроразведка) в Печорском, Карском морях и в море Лаптевых. Но нет никаких фактических данных (по крайней мере, опубликованных) о глубине залегания подошвы СММП.

Оценки характера распространения газогидратов на арктическом шельфе при его очень неравномерной геолого-геофизической изученности остаются близкими к случайным, поэтому прогнозирование условий газогидратоносности на региональном этапе изучения арктического шельфа заключается именно в прогнозировании термобарических условий – расчете и картировании зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) – области литосферы, гидросферы и криосферы, где образованные ранее газовые гидраты могут сохраняться в стабильном состоянии. Особым фактором, осложняющим прогноз ЗСГГ, является наличие в прошлом покровного оледенения на западноарктическом шельфе, которое, несомненно, повлияло на условия гидратообразования, и влияние которого в российском секторе ранее не было исследовано.

Таким образом, представления о закономерностях распространения СММП и ЗСГГ носят прогнозный характер и являются, по сути, моделями, основанными на палеогеографических и термобарических данных. Поэтому основным инструментом ее изучения на арктическом шельфе остается численное моделирование.

**Степень разработанности.** Прогнозные построения, связанные с мерзлотой, производятся на основе уравнения теплопроводности (задача Стефана)

с привлечением различных методик и моделей. Одни из первых карт распространения подводной мерзлоты и условий газогидратообразования были представлены в работах [Соловьев и др., 1987; Соловьев, Гинсбург, 2004], где картирование СММП и зон ЗСГГ основывалось на методике решения задачи теплопроводности [Молочушкин, 1970; Шарбатян, 1974].

Численное моделирование СММП на восточно-арктическом шельфе затем было развито в работах Н.Н. Романовского, А.В. Гаврилова, В.Е. Тумского, А.Л. Холодова и др. [Романовский и др., 1997; Kholodov et al., 2001; Романовский и др., 2003], использующих модель Г.С. Типенко [1990, 1999] с учетом палеореконструкций температур, эвстатических колебаний уровня моря и теплового потока.

Аналогичный подход применялся В.В. Малаховой с соавторами [Malakhova, Eliseev, 2017; Golubeva et al., 2018; Gavrilov et al., 2020a; Malakhova, 2020] с использованием региональных данных геотермии и теплофизических параметров отложений. В этих работах получил развитие подход к синтезу верхнего граничного условия с использованием глобальных палеоклиматических моделей. Публикации [Разумов и др., 2014; Малахова, Елисеев, 2020] исследовали влияние диффузии солей в морских отложениях на СММП. Однако сложность математического описания процесса диффузии солей и возникающие с этим дополнительные аномалии и неопределённости все еще слабо изучены.

Зарубежные исследования [Majorowicz et al., 2012; Overduin et al., 2019; Creel et al., 2024] схожим образом учитывали долгопериодные климатические изменения и локальные колебания уровня моря, но не всегда зональную изменчивость температуры и солености морской воды.

Единственным исследованием, направленным на изучение влияния Евразийского ледника на субаквальную ЗСГГ в Российском секторе Арктики посредством численного моделирования, является работа [Montelli et al., 2024]. Однако данная статья больше нацелена на анализ результатов полевых работ. Таким образом, пространственно-временная изменчивость «субгляциальной» и «постгляциальной» («постледниковой») ЗСГГ в Российском секторе Арктики остается фактически не исследованной.

В опубликованных работах зачастую не приводится анализ и сопоставление исследований предшественников, из-за чего весьма затруднительно оценить качество полученных результатов. Публикуемые карты часто имеют низкое разрешение, а глобальные прогнозные карты высокого разрешения для Евразийского шельфа отсутствуют. Используемые в работах математическая и программная реализация в открытой публикации как правило отсутствуют, что делает наиболее простым решением создание оригинальной модели и программного обеспечения для нее с нуля под собственные нужды.

**Все вышесказанное определяет актуальность исследования.**

**Объектом исследования** является зона стабильности газовых гидратов на шельфе российских арктических морей.

**Предметом исследования** является разработка математической модели термобарических условий отложений морей евразийской части Арктики.

**Цель исследования** – анализ временной динамики субаквальных многолетнемерзлых пород и зон стабильности криогенных газовых гидратов российского шельфа Арктики на основе численного моделирования с учетом изменения термобарических и связанных с ними климатических и ледниковых палеоусловий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Создать математические модели условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом современной климатической зональности, а также динамики ледниковых покровов.
2. Разработать программное обеспечение для реализации моделей на языке «С» (Си), на основе открытых данных и литературных источников сформировать массивы данных для краевых условий.
3. Выполнить прогноз по моделям, валидацию моделирования на основе данных полевых исследований и сравнении с результатами аналогичных работ для оценки качества прогноза.
4. Провести анализ пространственно-временной изменчивости субаквальных многолетнемерзлых пород и зон стабильности газовых гидратов на арктическом шельфе по результатам моделирования.
5. Провести анализ возможности формирования и сохранения зон стабильности газовых гидратов различного генетического типа.

**Научная новизна диссертационного исследования:**

1. Впервые разработаны и программно реализованы математические модели условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом климатической зональности и пространственно-временной динамики ледниковых покровов.
2. Использован детализированный подход к внедрению данных геотермии.
3. Впервые проведено моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород и зоны стабильности криогенных газовых гидратов на высокоразрешающей сети ( $0.08^0 \times 0.08^0$ ), представлены карты глубины залегания кровли модельных субаквальных многолетнемерзлых пород и временная изменчивость площади зоны стабильности криогенных газовых гидратов на евразийском шельфе Арктики.

4. Впервые проанализировано влияние покровного оледенения в эпоху верхнего плейстоцена на формирование и эволюцию субаквальных многолетнемерзлых пород и зоны стабильности газовых гидратов криогенного типа в российском секторе Арктики.

5. Впервые на шельфе Баренцева моря локализовано распространение специфических зон стабильности газовых гидратов криогенного типа.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом современной климатической зональности и динамики ледниковых покровов верхнего плейстоцена, реализованные в программных комплексах PEGAS и PEGAS+Peltier.

2. Региональные особенности залегания и временной динамики субаквальных многолетнемерзлых пород и зон стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе, выявленные на основе численного моделирования и анализа результатов геолого-геофизических исследований.

3. Специфические типы «постмерзлотных» и «постледниковых» зон стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе, выделенные на основе численного моделирования, характеризующиеся их формированием в верхнем плейстоцене и частичным сохранением в современных условиях.

#### **Фактический материал и методика работы.**

В работе использовались массивы данных из архивов ECMWF ERA5 за 44 года [Hersbach et al., 2020], GLORYS12V1 [Lellouche et al., 2021], GEBCO 2023 [<http://www.gebco.net/>, 2023], Global Heat Flow Database [Fuchs, Norden, 2021], модель геотермии Арктики [Petrinin et al., 2022], глобальная реконструкция относительной приземной температуры воздуха и уровня моря [de Boer et al., 2014], данные палеоклиматической модели ICE-7G\_NA [Roy, Peltier, 2017; Roy, Peltier, 2018], результаты буровых работ АО «АМИГЭ» [Оперативный..., 1990; Изучение..., 1996; Рокос и др., 2009; Выполнение..., 2015], результаты буровых работ разных авторов [Фартышев и др., 1993; Overduin et al., 2016; Chuvilin et al., 2021], данные сейсморазведочных работ [Рекант, Васильев, 2011; Kneier, 2018], теплофизические параметры отложений разных авторов [Athy, 1930; Sclater, Christie, 1980; Grevemeyer, Villinger, 2001; Sultan et al., 2004; Гольмшток, 2008; Waite et al., 2009], автоматизация расчета производилась для программы CSMHYD (исполняемый файл Hydoff.exe) [Sloan, 1998], кривые незамерзшей воды выбирались по [Галушкин и др., 2012]. Тепловой режим морских отложений моделировался на основе решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности, решаемого по неявной разностной схеме методом сквозного счета. Модели семейства PEGAS были реализованы на языке программирования

С («Си»). Для подготовки данных к расчету, а также для последующей обработки результатов, их визуализации и анализа были написаны отдельные скрипты на языке программирования Python. Программа-робот для автоматизации расчета равновесных кривых (MAGAS) была написана на языке программирования Python с использованием стандартного модуля Subprocesses. Анализ данных выполнялся средствами Python, включая гармонический анализ полученных рядов температур на различных горизонтах с помощью библиотеки SciPy. Картирование результатов выполнялось средствами библиотеки CartoPy для Python и стандартными средствами ArcGIS 10.8 (ArcMap) [ESRI ArcGIS, 2025].

**Степень достоверности результатов.** Полученные модельные значения хорошо коррелируют с результатами сторонних авторов и данными имеющихся ограниченных исследований на шельфе Западной Арктики и в прибрежной зоне моря Лаптевых. Показателем достоверности и новизны научных результатов работы является их публикация в ведущих рецензируемых профильных научных журналах, представление докладов на международных и всероссийских конференциях, победы и призовые места в конкурсах научных работ и докладов, а также внедрение полученных результатов в работы ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в рамках государственного задания. Программное обеспечение, используемое в работе, получило российские государственные регистрационные сертификаты.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в том, что созданная система моделирования, интегрирующая в себе программные комплексы MAGAS и PEGAS была внедрена в работы ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в рамках государственного задания на тематические и опытно-методические работы по обоснованию минерально-сырьевой базы нетрадиционных источников углеводородного сырья на акваториях Российской Федерации за 2020-2024 гг. Указанные программные комплексы стали базовым программным обеспечением для количественной оценки ресурсов метана в субаквальных газовых гидратах морей в исключительной экономической зоне Российской Федерации, выполненной ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

**Личный вклад автора.** Автор данной работы самостоятельно создал модель теплопроводности морских отложений, основываясь на решении одномерной задачи теплопроводности из работы [Matveeva et al., 2020]. Предложены и реализованы используемая разностная схема, подход к учету содержания незамерзшей поровой воды, синтез верхнего граничного условия, учет влияния ледниковых условий на верхней границе расчетной области, а также блок диффузии соли. Математическая модель была полностью программно реализована автором данной работы в виде программных комплексов PEGAS и PEGAS+Peltier на языке Си. Автором работы предложен, математически и программно реализован способ расчета параметров ЗСГГ в виде программного



комплекса MAGAS на языке Python. Автором работы производился подбор, обработка и анализ массивов гидрометеорологических, батиметрических и геотермических данных, а также данных палеореконструкций климата, включая ледниковую модель ICE-7G\_NA. Автор работы произвел поиск, оцифровку и анализ результатов геокриологических изысканий на шельфе Арктики. Автором была произведена отладка работы программных комплексов, выполнен расчет, визуализированы полученные результаты (включая картосоставительские работы) и выполнен их анализ.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Тема диссертационного исследования и его содержание соответствуют требованиям паспорта специальности ВАК 1.6.17 – Океанология по следующим пунктам: п. 2 – «Внешние силы, действующие на океан, и потоки вещества и энергии», п. 7 – «Формирование рельефа дна океанов и берегов, донные осадки», п. 9 – «Взаимодействие в системе литосфера – гидросфера – атмосфера», п. 10 – «Природные ресурсы океана, их рациональное использование», п. 15 – «Методы исследований, моделирования и прогноза процессов и явлений в океанах и морях».

**Апробация работы.** Результаты работы были широко представлены на всероссийских и международных научных конференциях, среди них: пять международных научно-практических конференций «Морские исследования и образование (MARESEDU, 2020-2024 гг., ИО РАН, г. Москва)»; X Международная научная конференция молодых ученых «Молодые - Научкам о Земле» (2022, МГРИ, г. Москва); X международная конференция «Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа» (2023, ИХН СО РАН, г. Томск); VII и VIII Всероссийские научные конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (2023, СПбГУ, г. Санкт-Петербург; 2024, ННЦМБ ДВО РАН, г. Владивосток); I всероссийская конференция с международным участием «Российская газогидратная конференция» (РГК-2024, ВНИИОкеангеология, р/п. Листвянка); Всероссийская Пушинская конференция по мерзлотоведению с международным участием «Проблемы криосферы Земли» (2025, ИФХиБПП РАН, г. Пущино); VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии - наука и бизнес» (2025, МГРИ, г. Москва). Доклад по научной статье [Смирнов и др., 2024] занял первое место в Конкурсе научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии за 2024 г. (СПбф ИО РАН им. П.П. Ширшова, г. Санкт-Петербург).

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации было опубликовано 22 работы, среди них три статьи в журналах с международной индексацией, два свидетельства о государственной регистрации программы для

ЭВМ, одна статья из журнала вне перечня ВАК и 16 тезисов докладов на российских и международных конференциях. Дополнительно, одна статья [Смирнов и др., 2025], имевшая в рукописи статус «в печати», вышла после официальной открытой публикации диссертации и была включена в автореферат под первым номером (см. «Список работ, опубликованных по теме диссертации»).

**Благодарности.** Автор выражает благодарность коллективу сектора нетрадиционных ресурсов углеводородов ФГБУ «ВНИИОкеангеология», где он работает с 2020 г. и персонально ученому секретарю – и.о. начальника сектора нетрадиционных ресурсов углеводородов ФГБУ «ВНИИОкеангеология» и научному консультанту, к.г.-м.н. Матвеевой Татьяне Валерьевне за научное руководство на всех этапах работы. Автор благодарит научного сотрудника Щур (Семёнову) Анастасию Андреевну и к.ф.-м.н. Щура Николая Алексеевича (СПбПУ), оказавших автору значительную научно-методическую поддержку.

Автор признателен научно-педагогическому коллективу Океанологического отделения ИГиО РГГМУ. В первую очередь научному руководителю – доценту кафедры ПО и КУПЗ, к.г.н. Чанцеву Валерию Юрьевичу за долгие годы сопровождения, начиная с бакалавриата, а также доценту кафедры ПО и КУПЗ к.г.н. Гордеевой Светлане Михайловне.

Автор выражает признательность д.г.-м.н. Гаврилову Анатолию Васильевичу (МГУ) и к.ф.-м.н. Малаховой Валентине Владимировне (ИВМиМГ СО РАН) за продуктивное взаимодействие и ценнейший опыт, полученный в ходе подготовки публикаций.

Отдельная благодарность выражается к.ф.-м.н. Александру Яковлевичу Гольмштоку (СПбФ ИО РАН), знакомство с которым стало для автора отправной точкой в изучении газогидратов.

**Структура диссертации.** Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список использованной литературы из 210 ссылок и два приложения. Работа изложена на 124 страницах, включает 50 рисунков и три таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, основную цель исследования, поставленные задачи, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, научную и практическую значимость, личный вклад автора и апробацию результатов исследования.

**Первая глава** рассматривает понятия криолитозоны, СММП и ЗСГГ криогенного типа на шельфе, а также методические подходы к их моделированию. В **разделах 1.5–1.6** описаны изменения палеоклимата и оледенений в четвертичный период, их связь с ЗСГГ. **Разделы 1.7–1.8** содержат

оценку низких геокриологической и геотермической изученности Евразийского шельфа по данным полевых исследований.

**Глава 2** посвящена разработке методологии и созданию математической модели условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе. Рассматривается базовый модельный комплекс PEGAS (Permafrost gas hydrate stability forecast), его начальные и граничные условия, а также теплофизические параметры отложений. В **разделе 2.1** представлено математическое описание модели PEGAS, основанной на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности с фазовым переходом:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \#(1)$$

где  $T$  – температура морских отложений (К),  $\rho$  – плотность морских отложений ( $\text{кг/м}^3$ ),  $C$  – теплоемкость морских отложений ( $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$ ),  $\lambda_e$  – эффективный коэффициент теплопроводности морских отложений ( $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$ ),  $z$  – глубина (м),  $t$  – время (с). Глубина расчетного домена  $Z_{\max}$  составляет 10 тыс. метров с шагом по вертикали – 1 м. Важной особенностью модели PEGAS является представление коэффициента теплопроводности  $n$ -компонентной среды по модели теплопроводности эффективной среды путем решения алгебраического уравнения  $n$ -степени согласно [Гольмшток, 2008]:

$$\frac{1}{\lambda_e} = 3 \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{2\lambda_e + \lambda_i}, \quad \#(2)$$

где  $\lambda_i$  – теплопроводность  $i$ -компоненты осадка, представленной минеральным скелетом ( $\lambda_{sk}$ ), водой ( $\lambda_w$ ), льдом ( $\lambda_{ice}$ ) при достижении температуры замерзания морской воды,  $\delta_i$  – относительный объем (доля)  $i$ -й компоненты в единичном объеме среды.

В связи с ограниченностью сведений о теплофизических свойствах отложений ввиду отсутствия буровых данных на Арктическом шельфе, для расчетов была принята модель уплотнения отложений по закону Ати [Athy, 1930]:

$$\varphi(z) = \varphi_0 \exp(-\varphi_a z), \quad \#(3)$$

где  $\varphi_0$  – пористость придонных осадков,  $\varphi_a$  – коэффициент уплотнения.

Эффективная теплоемкость  $C$  в (1), описывается уравнением:

$$\rho C = \rho_{sk} C_{sk} [1 - \phi] + \rho_w C_w \phi W + \rho_{ice} C_{ice} (\phi - \phi W) + L \rho_w \frac{dW(T)}{dT} H, \quad \#(4)$$

где  $L$  – скрытая теплота льдообразования ( $\text{Дж/кг}$ ) по [Галушкин и др., 2012],  $H$  — функция Хевисайда, равная 1, когда  $T(z, t) < T_f$ , и 0, когда  $T(z, t) \geq T_f$ . Последнее слагаемое в уравнении представляет собой вариант «сглаживания» для  $L$  в методе сквозного счета.

В качестве условия активации процессов замерзания была выбрана температура замерзания морской воды, согласно [Malakhova, 2020]:

$$T_f = -0.073P \times 10^{-6} - 0.064S_{bot} \#(5)$$

при этом  $P$  – давление (Па),  $S_{bot}$  – соленость придонной морской воды (‰). Давление рассчитывалось согласно [Tinivella et al., 2019] с изменениями для авторского подхода:

$$P_z^t = P_{z-\Delta z}^t + (\rho_{ice}g(1 - W) + \rho_w gW), \#(6)$$

где  $\rho_{ice}$  и  $\rho_w$  – плотности льда и воды соответственно.

Физические параметры отложений, принятые в моделировании, задавались одинаковыми по горизонтали для всего домена, полагая что основной характеристикой теплофизических свойств морских отложений по пространству служит тепловой поток ( $HF$ , мВт/м<sup>2</sup>).

**Раздел 2.2** посвящен верхнему граничному условию модели, а именно  $T$  на поверхности ( $z_0$ ), синтезируемому из четырех различных источников: среднемноголетней температуры придонной воды ( $T_{bot}$ ), среднемноголетней температуры приземного слоя воздуха ( $T_r$ ), палеорекострукции относительной температуры воздуха ( $\Delta T_a$ ) и батиметрии ( $H_{gebco}$ , м):

$$T(\theta, \psi, t_j, z_0) = a(\theta, \psi, t_j) \cdot (T_r(\theta, \psi) + \Delta T_a(t_j)) + b(\theta, \psi, t_j) \cdot T_{bot}(\theta, \psi), \#(7)$$

где  $\theta, \psi$  – широта и долгота места,  $t_j$  – время,  $a$  и  $b$  – весовые множители, определяющие смену эпох в зависимости от относительного уровня моря (**relative sea level, RSL, м**): если  $RSL > H_{gebco}$ , тогда  $a = 0$ ,  $b = 1$  и наоборот. Соответственно, давление  $P$  на верхней границе расчетной области также регулируется сменой трансгрессивно-регрессивных обстановок, где водная толща определяется разностью между батиметрией  $H_{gebco}$  и  $RSL$ .

В данной работе основой для синтезированного верхнего граничного условия являются ряды  $\Delta T_a$  и относительного уровня моря ( $RSL_{db}$ ) из работы [de Boer et al., 2014]. Для того чтобы выявить значения  $T_r$ , были выбраны данные из архива реанализа ECMWF ERA5 (с 1979 по 2020) [Hersbach et al., 2020]. Для  $T_{bot}$  и  $S_{bot}$  – из GLORYS12V1 [Lellouche et al., 2021]. Расчетная сетка составила более 200 тыс. узлов с шагом 0.08. Нижнее граничное условие модели PEGAS задается значениями  $HF$  на основе районирования по возрасту тектономагматической активизации, согласно [Bochkarev et al., 2023]:

$$\lambda_e \frac{\partial T(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_{\max}} = HF(\theta, \psi) \#(8)$$

В качестве начального распределения температуры в отложениях использовался результат решения стационарной задачи с точностью  $10^{-6}$  К на нижней границе.

В **разделе 2.4** описана методика расчета ЗСГГ по модели PEGAS с использованием автоматизации CSMHYD Hydoff [Sloan, 1998] в программном комплексе MAGAS [Свидетельство..., 2024б]. Расчет ЗСГГ определяет термобарические условия стабильности газовых гидратов на основе равновесной

кривой гидратообразования метана (рисунок 1). Условие наличия ЗСГГ на профиле можно представить, как  $P(\theta, \psi, t_j, z_k) \geq P_{eq}(T, S_{bot})$ , где  $P_{eq}$  – равновесное давление гидратообразования по [Sloan, 1998]. Раздел 2.5 содержит результаты настройки модели и оценок сходимости и устойчивости модели при разных шагах во времени. В итоге расчет был произведен с оптимальными шагами по времени  $10^9$  сек и 0.01 К для  $\frac{dW(T)}{dT}$  на масштабе 440 тыс. лет д. В разделе 2.6 перечислены дополнительные вспомогательные статистические инструменты анализа: выделение тренда временного ряда и гармонический анализ, выполненный по горизонтам.

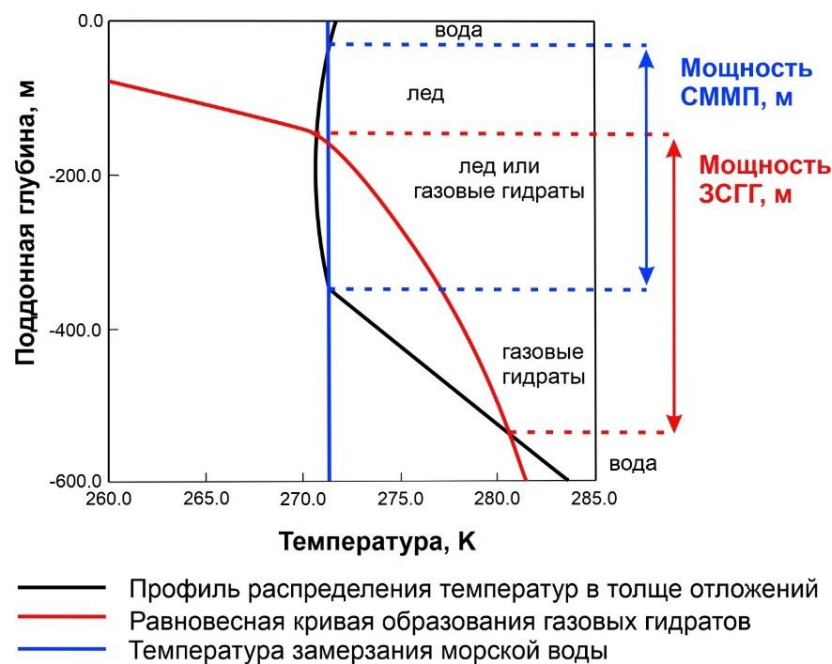


Рисунок 1. Диаграмма равновесных условий стабильности гидратообразования (температура, давление) для определения ЗСГГ в пределах криолитозоны

В результате на основе решения одномерной задачи Стефана создана математическая модель условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом современной климатической зональности, что обосновывает первую (базовую) модель (PEGAS) первого защищаемого положения: *Математические модели условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом современной климатической зональности и динамики ледниковых покровов верхнего плейстоцена, реализованные в программных комплексах PEGAS и PEGAS+Peltier.*

**Глава 3** посвящена прогнозированию СММП и ЗСГГ по базовой версии модели PEGAS и выделению региональных особенностей их залегания. Результаты расчетов подвергались проверке по натурным данным. Так, по данным сейсмоакустического профилирования в Карском море [Рекант, Васильев, 2011] граница СММП практически достигает границы шельфа (рисунок 2). Предварительный расчет показал, что прогнозная граница СММП хорошо коррелирует с данными сейсмоакустических наблюдений, обладающих, однако, большой неопределенностью. Расчеты показали высокую инерционность морских отложений, требующую точной настройки параметров модели. Глубина кровли мерзлоты зависит от разрешения интерполяции температуры и солености. Моделирование СММП в Печорском и Карском морях показало точность горизонтального залегания при некоторых отклонениях вертикальных границ.

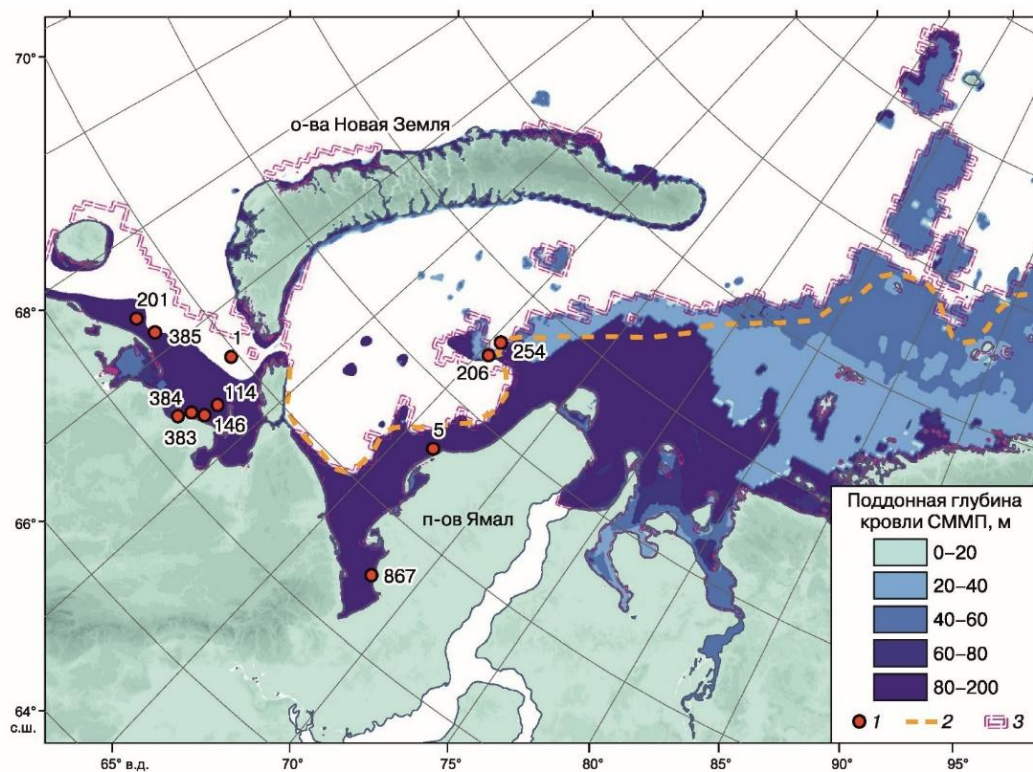


Рисунок 2. Глубина кровли СММП по модельным данным в Печорском и Карском морях. 1 – положение скважин, вскрывших мерзлоту по: [Оперативный..., 1990; Изучение..., 1996]; 2 – граница СММП по сейсмоакустическим данным [Рекант, Васильев, 2011]; 3 – граница СММП по данным численного моделирования [Overduin et al., 2019]

Анализ профилей температур по горизонтам из губы Буор-Хая в море Лаптевых выявил, что ниже 750-800 м температура определяется преимущественно *HF*, а влияние верхней границы незначительно: колебания менее 41 тыс. лет описывают менее 7% дисперсии, что подтверждает существование ЗСГГ под СММП аналогично региону Маккензи. Комплексный



анализ данных подтвердил общую адекватность модели. Моделирование с применением кривой [Gavrilov et al., 2020б] (рисунок 3) выявило фактическое отсутствие СММП в Печорском и юго-западной части Карского моря или островное залегание СММП в Каре к западу от 80° в.д. и сплошное к востоку. В Восточной Арктике прогнозируются мощные СММП, кроме Чукотского моря, где они сохранились только в северной его части.

Моделирование ЗСГГ по PEGAS прогнозирует её широкое распространение на Евразийском арктическом шельфе (рисунок 4).

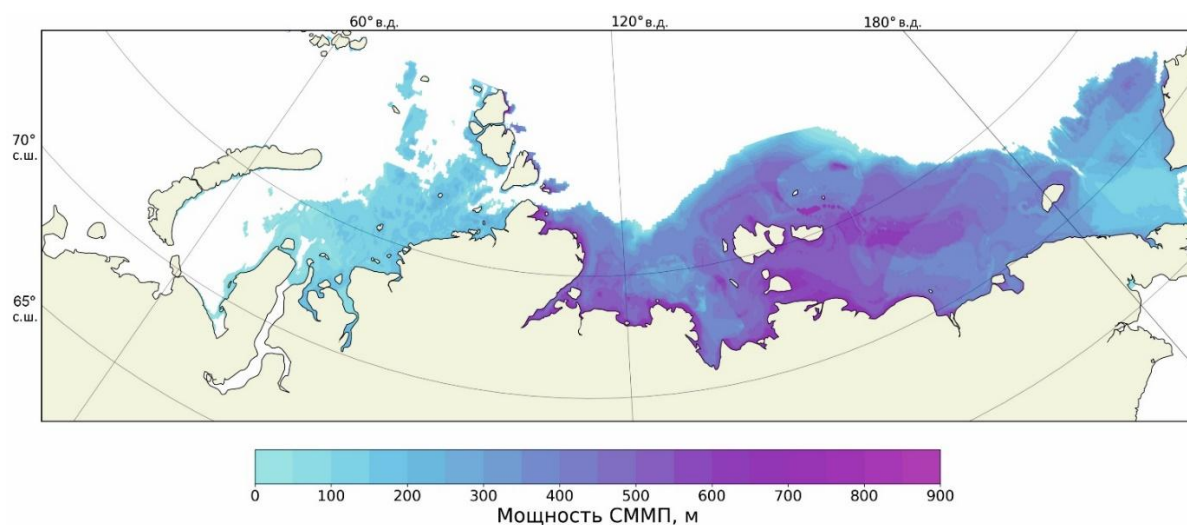


Рисунок 3. Синтезированное распределение мощности модельных реликтовых СММП на евразийском шельфе Арктики по палеореконструкциям для западных [Gavrilov et al., 2020б] и восточных морей [de Boer et al., 2014]

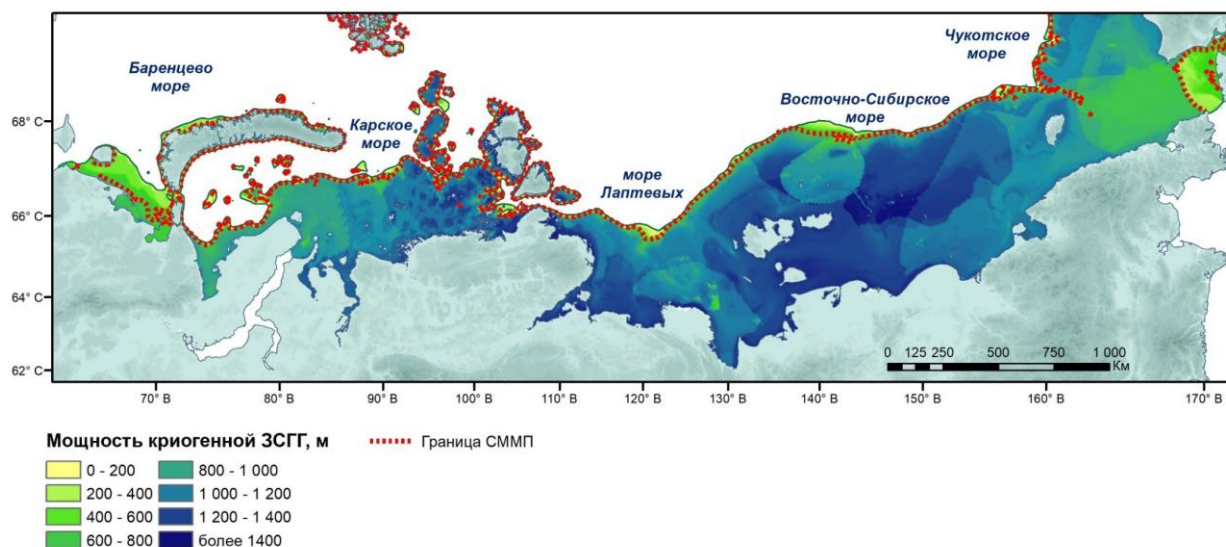


Рисунок 4. Распространение ЗСГГ криогенного типа по результатам моделирования в PEGAS в настоящее время с максимальной границей СММП по кривой [de Boer et al., 2014]

Максимальные мощности (до 1417 м) прогнозируются к востоку от Новосибирских островов. Наиболее благоприятные условия для гидратообразования — в Северо-Карском бассейне, морях Лаптевых и Восточно-Сибирском. В Печорском, Чукотском морях и Беринговом проливе модельная ЗСГГ сохраняется как **постмерзлотная** на участках с деградировавшей мерзлотой при сохранении немёрзлой криолитозоны за счет высокой инерционности морских отложений как динамической системы. Необходимо учитывать, что при СММП < 200 м залежи газовых гидратов маловероятны, согласно выявленной статистической закономерности из [Osadetz, Chen, 2010].

Временная динамика площадей распространения показала, что сокращение ЗСГГ отстает от СММП на 5 тыс. лет. За ледниковый цикл площади могут сократиться вдвое и успеть восстановиться. Основное сокращение площадей приурочено к этапам регрессий (рисунок 5).

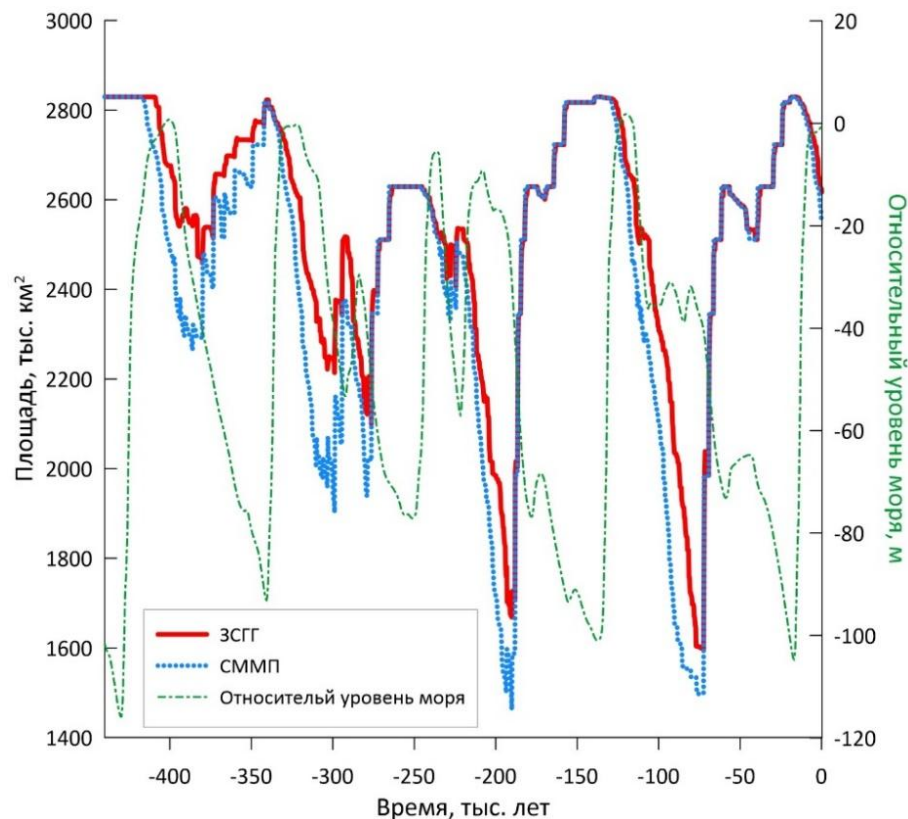


Рисунок 5. Временная динамика площадей СММП (синим) и ЗСГГ (красным) в сравнении с относительным уровнем моря (зеленым) по [de Boer et al., 2014]

Таким образом, результаты численного моделирования и их анализ позволили обосновать второе защищаемое положение: **Региональные особенности залегания и временной динамики субаквальных многолетнемерзлых пород и зон стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе, включая площадь, мощность и**



характер распространения, выявленные на основе численного моделирования и анализа результатов геолого-геофизических исследований.

Глава 4 описывает экспериментальную модель PEGAS+Peltier, разработанную для учета ледниковой динамики, влияющей на криолитозону из-за давления Евразийского ледника и формирующей подледниковую ЗСГГ. Вздвигание дна (**TopoDiff**, м), вызванное ростом ледника (**Stgit**, м), является процессом, обратным понижению *RSL*. Тогда уровень моря составляет:

$$RSL(\theta, \psi, t_j) = \begin{cases} RSL_{db}(t_j) & \text{при } t_j < -26 \text{ тыс. лет} \\ -TopoDiff(\theta, \psi, t_j) & \text{при } t_j \geq -26 \text{ тыс. лет} \end{cases} \quad \#(9)$$

Учет давления и температуры, создаваемыми ледником на верхней границе, производился, согласно [Doyle et al., 2018] для субгляциальных периодов. Для  $T(\theta, \psi, t_j, z_0)$  была учтена разница между  $T_r$  и температурой грунта за счет учета высоты снежного покрова ( $H_s$ , см) с помощью пересчета по эмпирической формуле [Шестерюков, Анисимов, 2018]:

$$\Delta T_s = 2.167 \ln(H_s - 5) + 0.7679 \quad \#(10)$$

$$T(\theta, \psi, t_j, z_0) = \begin{cases} T_a(\theta, \psi, t_j) + a(\theta, \psi, t_j) \cdot \Delta T_s & \text{если } Stgit(\theta, \psi, t_j) = 0 \\ 273.16 - \gamma(P_g(\theta, \psi, t_j) - P_{tp}) & \text{если } Stgit(\theta, \psi, t_j) > 0 \end{cases} \quad \#(11)$$

где  $T_a = a(\theta, \psi, t_j) \cdot (T_r(\theta, \psi) + \Delta T_a(t_j)) + b(\theta, \psi, t_j) \cdot T_{bot}(\theta, \psi)$ ,  $H_s = 50$  см,  $P_{tp} = 611.73$  (Па) – давление тройной точки воды,  $\gamma = 0.0742 \times 10^{-6}$  (К×Па)<sup>-1</sup> – константа Клаузиуса-Клапейрона. В свою очередь, давление под ледником  $P_g$  (Па):

$$P_g(\theta, \psi, t_j) = \rho_i g Stgit(\theta, \psi, t_j), \quad \#(12)$$

Тогда  $P(\theta, \psi, t_j, z_0)$  также получает «гляциальное» описание:

$$P(\theta, \psi, t_j, z_0) = \begin{cases} P_0 & \text{если } Stgit(\theta, \psi, t_j) = 0 \\ P_g(\theta, \psi, t_j) + Bar & \text{если } Stgit(\theta, \psi, t_j) > 0 \end{cases} \quad \#(13)$$

где  $P_0 = a(\theta, \psi, t_j) \cdot Bar + b(\theta, \psi, t_j) \cdot (\rho_w g (H_{gebc0}(\theta, \psi) + RSL(\theta, \psi, t_j)) + Bar)$ .

Подобный подход к описанию давления под ледником, примененный ранее в моделях [Patton et al., 2016; Doyle et al., 2018; Montelli et al., 2024], учитывает  $P_g$  на морские отложения при допущениях: ледник контактирует с дном через тонкий слой талой воды, деформирует его и передает  $P_g$ .  $H_s$  выбрана на основе данных о современном состоянии [Радионон и др., 2013] и предположений о большей толщине снега в периоды похолодания до антропогенного влияния на климат. В работе использована модель **ICE-7G\_NA** [Roy, Peltier, 2017] (рисунок 6) с данными об относительной топографии (*TopoDiff*) и мощности ледника (*Stgit*) за 26 тыс. лет.

В разделе 4.2 описаны изменения входных данных модели: вместо кластеризации в PEGAS значения  $HF$  заданы по актуальной геотермической модели [Petrinin et al., 2022]. В разделе 4.3 речь описан расчет ЗСГГ в модели PEGAS+Peltier с использованием равновесной кривой  $P_{eq}$  согласно [Moridis, 2003] с переменной соленостью, интегрированный в программный комплекс. В разделе 4.4 рассмотрена чувствительность модели к температуре верхней границы: точность интерполяции (шаг  $1^0$ ) менее значима, чем неопределенность теплового потока  $HF$ . Раздел 4.5 описывает сценарий  $120G$ , использующий кривые уровня RSL [de Boer et al., 2014] для 120–26 тыс. лет назад и локальные реконструкции ICE-7G\_NA для 26 тыс. лет до настоящего времени.

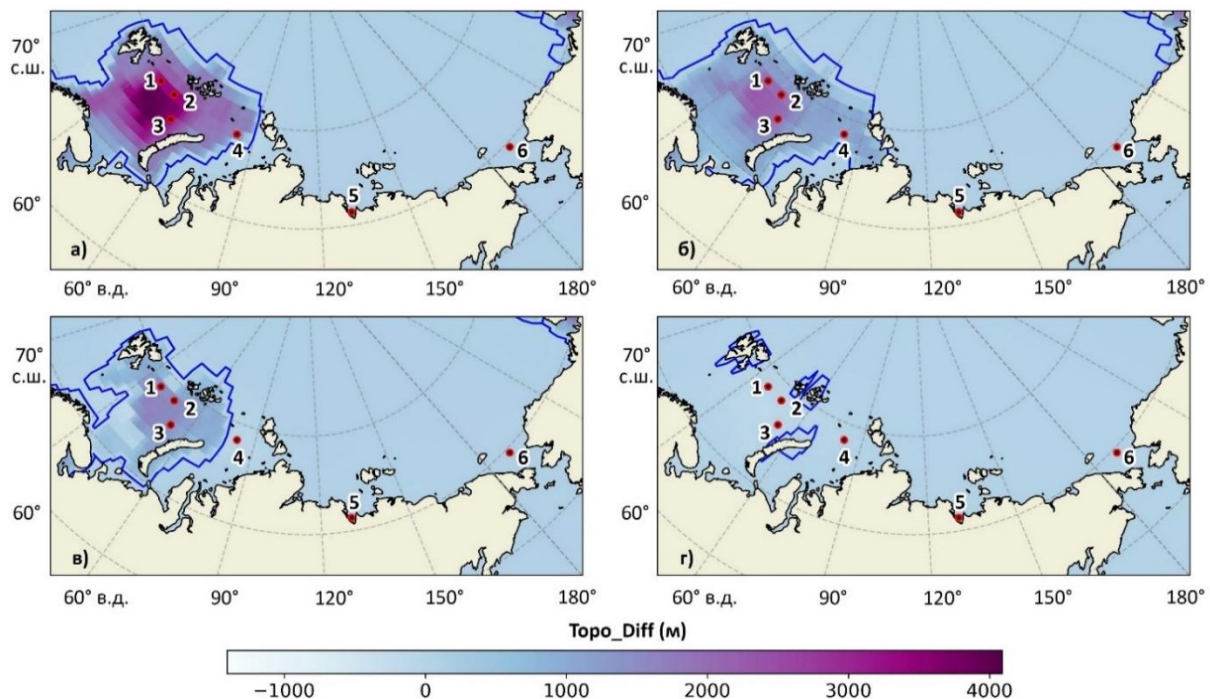


Рисунок 6. Отклонение топографии за счет роста и деградации Евразийского ледника по модели ICE-7G\_NA за последние 26 тыс. лет: А- 26 тыс. лет назад, Б – 20 тыс. лет назад, В – 15 тыс. лет назад, Г – 10 тыс. лет назад. Границы Евразийского ледника оконтурены синей линией

В разделе 4.6 исследована диффузия солей в морских отложениях с нулевой соленостью на нижней границе и сменой трансгрессивно-регрессивных условий на верхней. Различия между расчетами с постоянной соленостью и диффузионным блоком составляют десятки метров мощности СММП и ЗСГГ, что указывает на незначимость процесса диффузии солей при данном масштабе моделирования. Постоянная высокая соленость по профилю существенно препятствует формированию СММП и ЗСГГ, позволяя получить критические оценки.

Таким образом, созданная модель PEGAS+Peltier полностью обосновывает первое защищаемое положение: Математические модели

условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом современной климатической зональности и динамики ледниковых покровов верхнего плейстоцена, реализованные в программных комплексах PEGAS и PEGAS+Peltier.

**Глава 5** посвящена исследованию временной динамики ЗСГГ на евразийском шельфе Арктики по модели PEGAS+Peltier. В **разделе 5.1** по сценарию 120G за 120 тыс. лет (см. пронумерованные точки на рис. 6, рисунок 7) в точках №1 и №3 формирование ледника является единственным фактором, определяющим образование ЗСГГ. В точке №1, сформированная в субгляциальных условиях последнего оледенения, ЗСГГ достигала мощности >1000 м 26–15 тыс. лет назад, но к настоящему времени полностью деградировала.

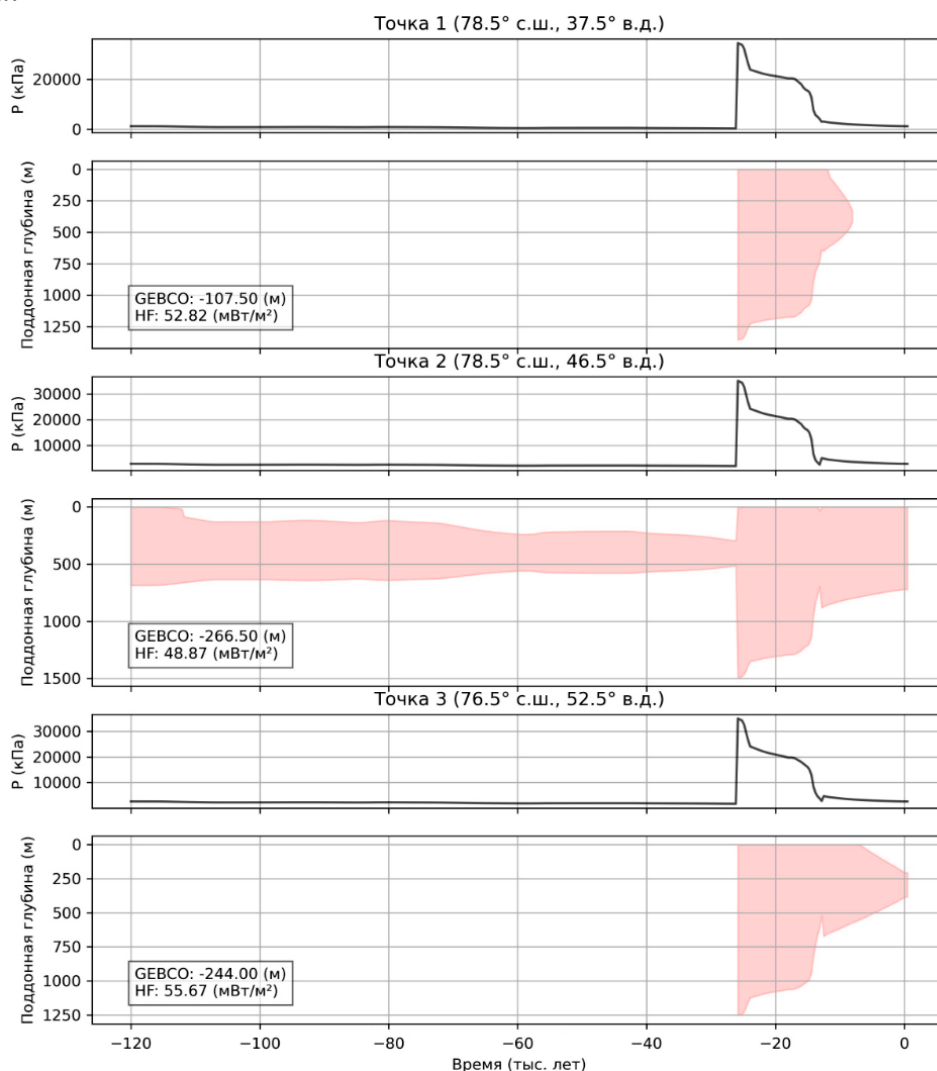


Рисунок 7. Временная изменчивость ЗСГГ (для точек 1-6 (см. рисунок 7). Розовая область – ЗСГГ; черный график показывает изменение давления на верхней границе расчетного домена

В точке №3 после разрушения ледника ЗСГГ сохраняется, как **постледниковая** в состоянии сокращения. Спад уровня моря *RSL* ~11 тыс. лет

назад резко снизил давление  $P$  на верхней границе, уменьшив мощность ЗСГГ, но постледниковый подъем  $RSL$  замедлил деградацию. В точке №2, с низким тепловым потоком  $HF$  и высокими глубинами  $H_{gebo}$ , ЗСГГ существовала до оледенения;  $P_g$  от ледника увеличило ее мощность в 10 раз. Поле температур морских отложений, сформировавшееся под ледником, в голоцене замедляет деградацию ЗСГГ, длящуюся 20 тыс. лет исключительно снизу.

В разделе 5.2 представлено пространственно-временное распределение СММП и ЗСГГ по модели PEGAS+Peltier. Обращает на себя внимание прогнозирование к настоящему моменту постмерзлотных и постгляциальных участков сохранения ЗСГГ (рисунок 8). В западной Арктике наличие постмерзлотной ЗСГГ характерно для Печорского моря, в Восточной Арктике – в мористой части в районе 80 изобаты.

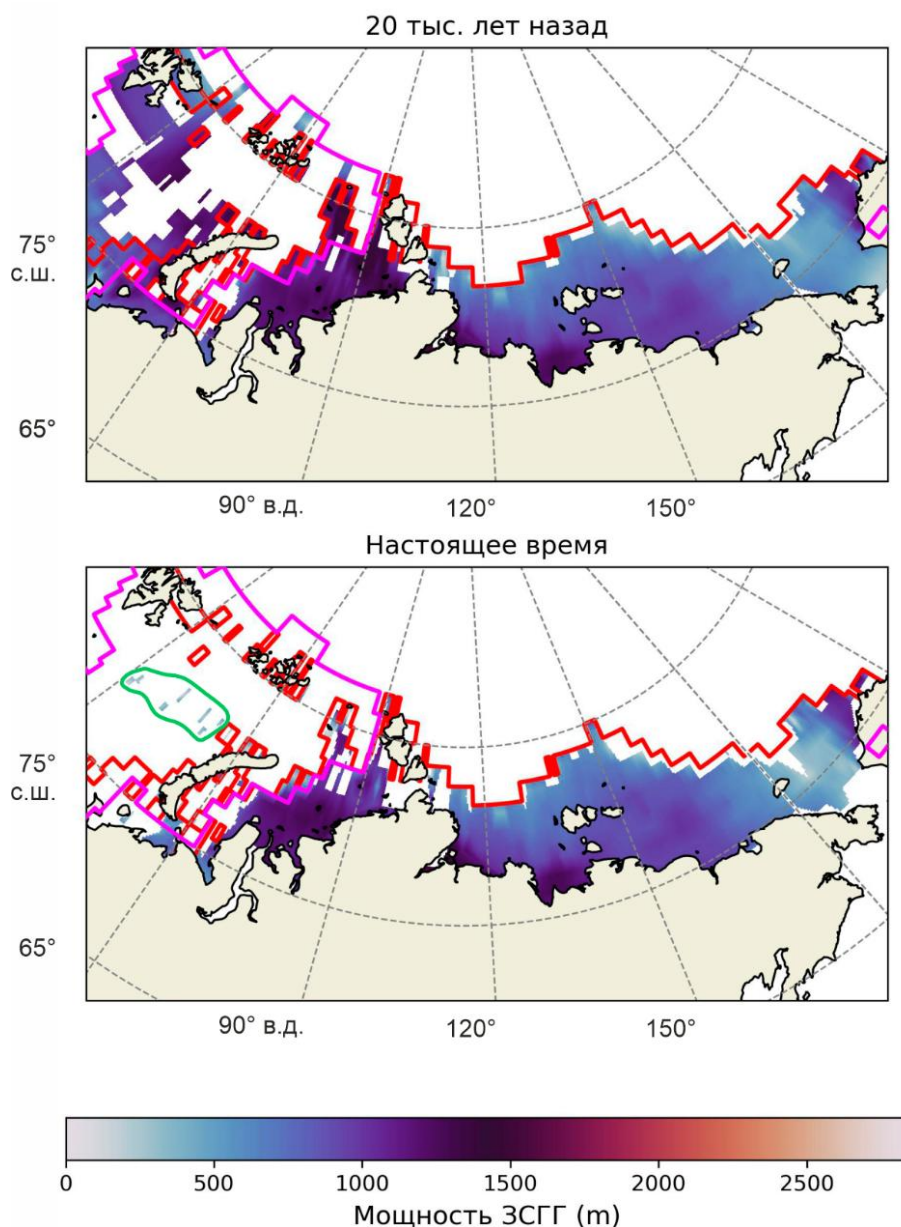


Рисунок 8. Пространственно-временная изменчивость криогенной и гляциальной ЗСГГ по данным моделирования в сценарии 120G. Зеленым выделен

участок с островной постледниковой ЗСГГ на шельфе в настоящее время. Красным – изобата 120 м, розовым – площадь распространения Евразийского ледника 26 тыс. л.н.

Постледниковая ЗСГГ сохраняется в центральной части Баренцева моря вдоль 77-77.5° с.ш. в виде отдельных островков. В прошлом, однако, субгляциальная ЗСГГ имела широкое распространение, в первую очередь в западной части Баренцева моря. По модели, Евразийский ледник не мог сформировать СММП, способные сохраниться к настоящему времени. Более высокие мощности СММП и ЗСГГ по сравнению с PEGAS обеспечиваются крайне низкими значениями  $HF$  по [Petrinin et al., 2022]. Вероятна сильная неопределенность из-за расхождений между современными  $HF$ -моделями.

*Изложенные результаты позволяют сформулировать последнее, третье защищаемое положение:* **Специфические типы «постмерзлотных» и «постледниковых» зон стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе, выделенные на основе численного моделирования, характеризующиеся их формированием в верхнем плейстоцене и частичным сохранением в современных условиях.**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее существенные научные и практические результаты проведенного исследования временной динамики ЗСГГ на шельфе российских морей сводятся к нижеследующему:

1. В результате работы созданы оригинальные модели теплопроводности, описывающие различные условия стабильности газогидратов на российском арктическом шельфе: высокоразрешающая модель с учетом современной климатической зональности PEGAS и модель, учитывающая ледниковую динамику PEGAS+Peltier.

2. Разработана и применена для оценки условий стабильности методика фоновой автоматизации процесса Hydoff для вычисления равновесных кривых гидратообразования.

3. По результатам моделирования по базовой модели PEGAS, суммируя полученные знания и представления о характере распространения СММП на шельфе российской Арктики, сделан вывод о том, что распределение СММП является преимущественно островным или редкоостровным, по крайней мере в Западной Арктике и в Чукотском море и сплошным преимущественно в притаймырской части Карского моря, прибрежных частях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского.

4. Результаты прогнозирования ЗСГГ по базовой модели PEGAS свидетельствуют, что криогенная ЗСГГ практически повторяет СММП по площади своего распространения. Наличие ЗСГГ мощностью более 200 м в регионах с исчезнувшими СММП, таких как Чукотское и Печорское моря, где может сохраняться немёрзлая криолитозона, позволяет выделить специфический тип «постмерзлотной» ЗСГГ в состоянии сокращения. При этом в регионах с прогнозируемой ЗСГГ < 200 м маловероятно присутствие залежей газогидратов.

5. Анализ временной динамики площадей распространения СММП и ЗСГГ показывает, что их максимальное сокращение происходило в эпохи регрессии моря. Всего за один ледниковый цикл СММП и ЗСГГ могли потерять и восстановить 50% площади. СММП по скорости сокращения опережает ЗСГГ на 5 тыс. лет. Около 72 тыс. лет назад площадь ЗСГГ на шельфе составляла 50% от современной.

6. Моделирование в PEGAS+Peltier показывает, что Евразийский ледник в сартанское время, находясь в «теплом режиме» с талой водой под подошвой, не формировал СММП. Однако высокое давление и низкие температуры у его основания могли создать субгляциальную ЗСГГ, которая, благодаря тепловой инерционности морских отложений, сохранилась до настоящего времени в островном виде в центральной части Баренцева моря как постепенно сокращающаяся «последниковая» ЗСГГ.

## СПИСОК РАБОТ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Смирнов Ю.Ю.**, Матвеева Т.В., Чазов А.О. Криогенные газовые гидраты на арктических шельфах – особенности прогноза и ресурсные оценки // Георесурсы, 2025, Т. 27, № 3, с. 64-74.

2. **Смирнов Ю.Ю.**, Матвеева Т.В., Щур Н.А., Щур А.А., Бочкарев А.В. Численное моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород на евразийском шельфе Арктики с учетом зональности современного климата // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с. 38–59.

3. Matveeva T.V., Chazov A.O., **Smirnov Y.Y.** The Geological Characteristics of a Subpermafrost Gas Hydrate Reservoir on the Taimyr Shelf of the Kara Sea (Eastern Arctic) // Geotectonics, 2023, Vol. 57, N. 1, P. S153–S173.

4. Bochkarev A.V., **Smirnov Y.Y.**, Matveeva T.V. Heat Flow at the Eurasian Margin: A Case Study for Estimation of Gas Hydrate Stability // Geotectonics, 2023, Vol. 57, N. 1, P. S136–S152.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №RU2024680251 Российская Федерация. Программный комплекс для расчета параметров зоны стабильности криогенных газовых гидратов "PErmafrost GAS

hydrate Stability forecast" (PEGAS) : № 2024668547 : заявл. 08.08.2024: опубл. 27.08.2024 Бюл. № 9 : **Смирнов Ю.Ю.**, Щур Н.А., Матвеева Т.В., Щур А.А. : Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга».

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №RU2024680266 Российская Федерация. Программный комплекс для расчета параметров зоны стабильности субаквальных газовых гидратов "MArine GAS hydrate Stability forecast" (MAGAS) : № 2024668548 : заявл. 08.08.2024: опубл. 27.08.2024 Бюл. №9 : Матвеева Т.В., Щур Н.А., Щур А.А., **Смирнов Ю.Ю.** : Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга».

Основные результаты научно-исследовательской деятельности автора, включая идентификаторы наукометрических баз данных, можно найти на портале «Истина МГУ»:

<https://istina.msu.ru/workers/750278531/>



ИСТИНА МГУ