



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)

«Численное моделирование зоны стабильности криогенных газовых
гидратов на шельфе российской Арктики»

Исполнитель: Смирнов Юрий Юрьевич, студент группы ПО-М20-1-8

Научный руководитель: канд. геогр. наук, доцент, Чанцев Валерий Юрьевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

кандидат геогр. наук

(ученая степень, ученое звание)

Аномина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2022г.

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

Введение	3
1 Теоретические сведения	6
1.1 О газовых гидратах и зоне стабильности газовых гидратов.....	6
1.2 О криолитозоне российского шельфа	9
1.3 Физико-географическое описание района моря Лаптевых	10
2 Методика расчета СММП и ЗСГГ	14
2.1 Общие положения.....	14
2.2 Описание модели теплопроводности – «задачи Стефана»	15
2.3 Выбор и статистическое исследование палеокривых.....	26
2.4 О выбранном тепловом потоке	35
2.5 Построение равновесной кривой с помощью программы CSMHyd Hydoff	37
2.6 Методика картирования.....	40
3 Результаты моделирования	41
3.1 Эволюция СММП и ЗСГГ для сценария «Т0»	41
3.2 Эволюция СММП и ЗСГГ для сценария «Т12»	44
3.3 Профили СММП и ЗСГГ	49
3.4 Картирование СММП и ЗСГГ на шельфе моря Лаптевых.....	51
3.5 Валидация результатов расчета	53
Заключение	57
Благодарности	59
Список используемой литературы	60
Приложение А. Исходный код программы «GHSZ_VNIO»	68

Введение

Российская Федерация в начале XIX века столкнулась с рядом как новых, так вновь звучащих вызовов, требующих решения задач национальной безопасности, экономической и экологической защищенности.

Российская Арктика, приполярный шельф, находятся на пересечении всех трех вышеуказанных областей, открывая перед нами новые горизонты, новые возможности и, вместе с этим, новые риски, связанные с экстенсивным развитием добывающей промышленности.

Газовые гидраты (ГГ) представляют собой твердые кристаллические соединения низкомолекулярных газов, таких как метан и его гомологи с водой, напоминающее внешне рыхлый лед или снег. Метангидраты относятся к нетрадиционным источникам углеводородов, таким же как битуминозная нефть или нефтеносные пески. Энергетический потенциал гидратов колоссален: один кубометр метангидрата в стандартных условиях может выделить до 160 кубметров метана [1]. Поэтому за последние десятилетия к газовым гидратам интерес науки был прикован, в первую очередь, как к новому полезному ископаемому, по мере наступления прогресса доступному для добычи в коммерческих целях.

Газовые гидраты – с одной стороны возможность нашего государства для дальнейшего энергетического доминирования на мировых рынках, с другой – опасность экологических и климатических изменений различного масштаба, вследствие того, что данные соединения чрезвычайно чувствительны к термобарическим условиям среды и находятся в зонах, зачастую подверженных изменениям климата. «Ресурсный пул» для одних и «бомба замедленного действия» для других из-за слабой изученности и отсутствия консенсуса ученых по целому ряду вопросов. Очевидно только одно: взоры научного сообщества сегодня, как никогда обращены в Арктику и на ее запасы углеводородов, в частности – потенциальные скопления газовых гидратов, ассоциированных в

субаквальной многолетней мерзлотой, подвергающейся интенсивному воздействию долгопериодных климатических изменений и интенсифицируемой антропогенной нагрузке.

Образование и разложение гидратов в природных условиях зависит от целого ряда параметров. Прежде всего, это температура среды и давление, которые варьируются в зависимости от состава газа и солености (минерализации) воды, а также растворимости газов в ней. Под давлением в среде как правило подразумевается гидростатическое. Температура и давление являются основными характеристиками зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) - области, в пределах которой ранее образовавшиеся газовые гидраты остаются в стабильном состоянии. Следовательно, в пределах зоны стабильности можно ожидать наличие гидратов, а выше или ниже этой зоны газ находится в водорастворенном или газообразном состоянии [2]. Работы по исследованию зоны стабильности, ее равновесных условий с 60-ых годов XX века и по сей день проводятся в лабораториях Российской Федерации, США, Канады, Японии и других стран.

Целью данной работы является численное моделирование и картирование зоны стабильности криогенных газовых гидратов, ассоциированных с субаквальными многолетнемерзлыми породами (СММП) на отдельной акватории шельфа российской Арктики.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Определение условий формирования криогенной ЗСГГ на шельфе Российской Арктики, описание исследуемой акватории.
2. Постановка задачи математического моделирования по промерзанию осадочного слоя – «задачи Стефана» и определение ее теплофизических параметров
3. Выбор верхнего и нижнего граничных условий. Приведение верхнего граничного условия – палеорекострукции приземных температур воздуха к среднемноголетней с учетом периодов трансгрессии и регрессии моря средствами языка Python

4. Построение равновесной кривой гидратообразования средствами CSMHyd Hydoff, с применением программы-бота собственной разработки, выполненной на языке Python

5. Численное решение задачи средствами языка Julia, анализ эволюции мощностей ЗСГГ и СММП и картирование полученных результатов помощью Golden Software Surfer

Актуальность данной работы заключается в том, что газовые гидраты являются, с одной стороны, потенциальным источником топлива, а с другой – их природные запасы подвержены климатическим рискам, особенно проявляющимся на шельфе СЛО, из-за чего данное явление вызывает интерес у исследователей со всего мира. Кроме того, последний раз прогнозные картирование зоны стабильности газовых на российском шельфе СЛО и акваторий России проводилось во ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в конце XX – начале XXI века В. А. Соловьевым и Г. Д. Гинсбургом [10], с того момента минимально обоснованные карты распространения ЗСГГ публиковались только по отдельным акваториям, среди них: Баренцево и Карское моря [11], Чукотское море [12] и работы по СЛО [13, 14]. Между тем, мир не стоит на месте. Вопрос с картированием ЗСГГ СЛО и других российских акваторий требует решения, с применением последних достижений науки.

1 Теоретические сведения

1.1 О газовых гидратах и зоне стабильности газовых гидратов

Гидраты природных газов локализуют на суше и под водой (Рис. 1.1) [1]. В данном случае, речь пойдет о субаквальных газовых гидратах, которые в свою очередь подразделяются достаточно вольно у каждого автора, здесь же разделим их на гидраты высоких глубин и гидраты криогенные [3], способные существовать на мелководном шельфе. Нас будет интересовать именно последний тип гидратов – криогенетический.

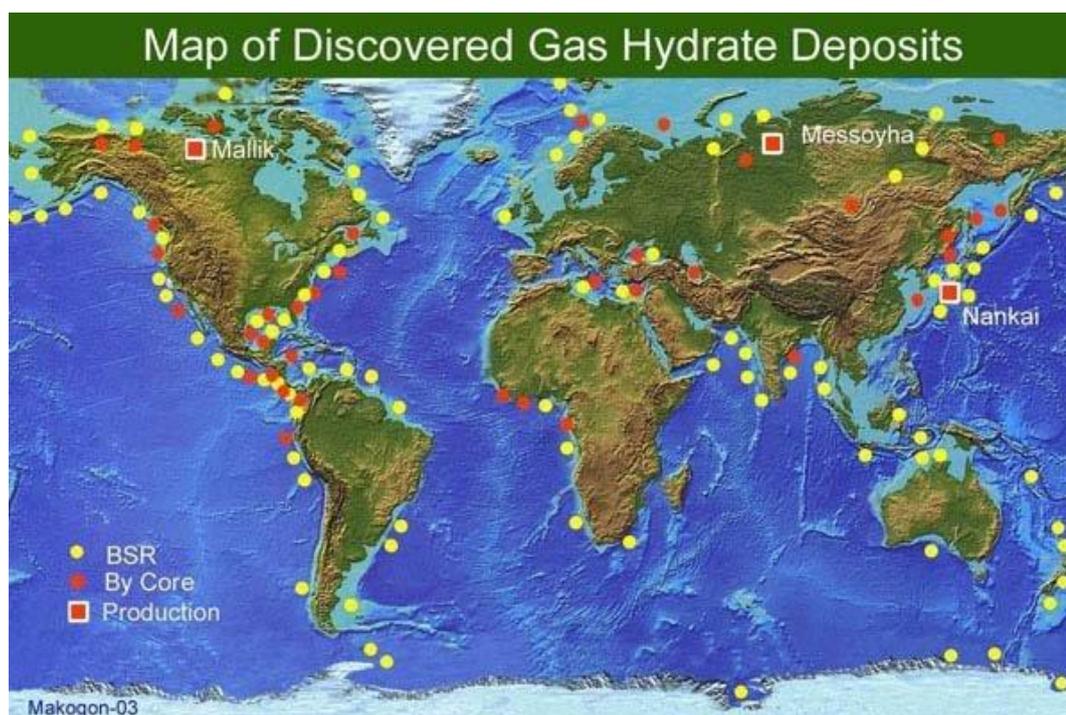


Рисунок 1.1 – карта свидетельств присутствия газовых гидратов [1], желтым –сейсмоакустические аномалии, красным – скважины, красным квадратом – ведется добыча.

Основным газом-гидратообразователем является метан и его гомологи. При этом источники метана бывают разными, подразделяется метан на

биогенный и катагенный [4]. По сути оба этих типа газа по происхождению являются биогенными, с той лишь разницей, что катагенный газ происходит с более глубоких горизонтов, из более древних слоев литосферы, поднимаясь по глубинным разломам или вертикальным каналам в ЗСГГ. Биогенный же метан формируется в верхних горизонтах осадочного слоя, как результат микробиальной генерации.

Строго говоря, задача моделирования газовых гидратов, их пространственного распределения, сводится к задаче моделирования ЗСГГ в силу неоднородности скоплений ГГ, их дискретности [5], степени заполненности пор, а также отсутствия свидетельств о наличии ГГ на шельфе российской Арктики по данным бурения. Т.е. перед нами стоит задача определения области их возможного существования, а не образования.

Как было сказано ранее, основными параметрами, определяющими существование ЗСГГ являются температура и давление – термобарические условия, равновесная кривая которых представлена на Рис. 1.2 [6]. Пересечения данных характеристик определяют положения границ ЗСГГ в стратифере. Причем под температурой и давлением среды подразумеваются непосредственно температура и давление поровых вод [2]. Тогда, с математической точки зрения, ЗСГГ является сплошной средой для которой применим весь аппарат механики сплошных сред, в том числе и уравнение теплопроводности.

При этом, в случае гидратов высоких глубин, повышенное гидростатическое давление компенсирует высокие температуры придонной воды и термоградиента, как например в желобе Нанкай, Япония. Где глубина воды составляет порядка 1000 метров, а кровля зоны стабильности расположена на горизонте около 300 метров ниже уровня дна [7]. Иногда в таких условиях, ЗСГГ может находиться непосредственно на самом морском дне, а газовые гидраты могут быть обнаружены на поверхности в очагах разгрузки флюидов [8].

В случае гидратов криогенетического типа определяющим фактором являются низкие температуры, сохраняющиеся в реликтовой мерзлоте на шельфе на глубине выше 200 метров и гипотетически создающие условия для существования ГГ [9]. При этом выход ГГ на поверхность исключен.

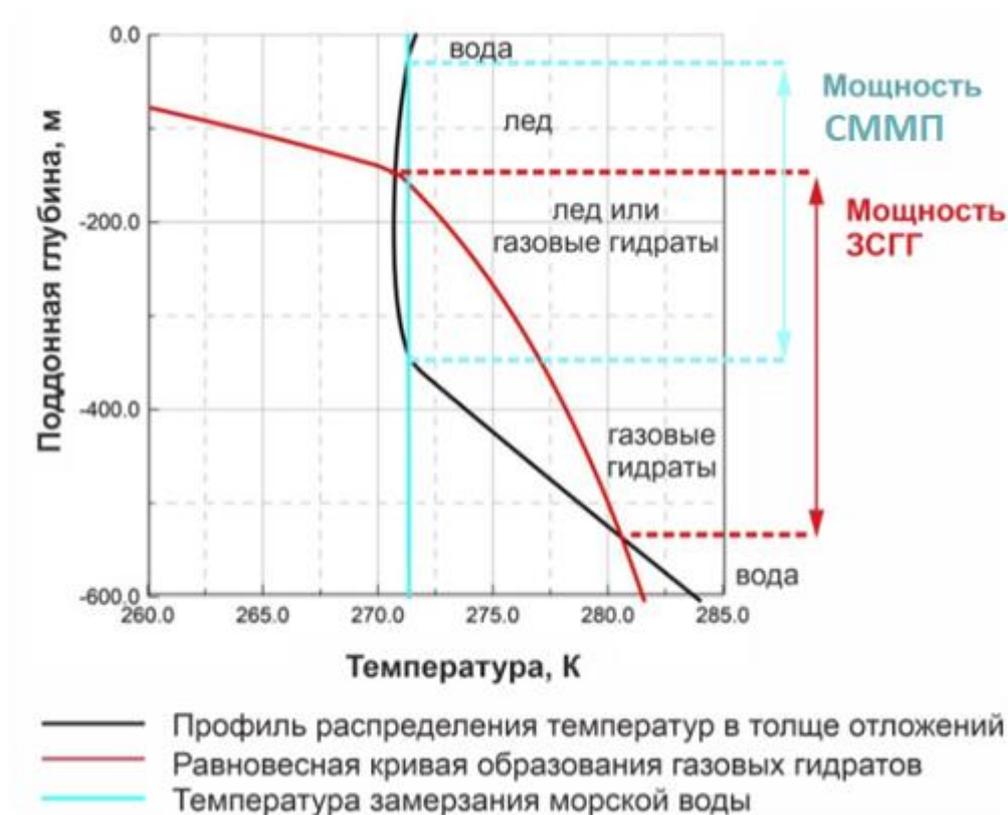


Рисунок 1.2 – пересечение кривых для определения мощности ЗСГГ[6]

Основными характеристиками ЗСГГ является ее мощность и площадь распространения [2]. Это именно те ее характеристики, составляющие конечный продукт – геологические карты пространственного распределения ЗСГГ. Однако в очередной раз следует отметить, что ЗСГГ является зоной **возможного** существования ГГ.

1.2 О криолитозоне российского шельфа

Говоря о СММП, подразумеваются реликтовые многолетнемерзлые породы, образованные многие тысячелетия назад. Как правило речь идет о последнем, Валдайском оледенении, произошедшем 23-19 тыс. лет назад [15, 16], в период, именуемый в западной литературе LGM – last glacial maximum, сформировавшем многолетнюю мерзлоту, сохранившуюся до наших дней. Само понятие «мерзлота» в отечественной науке и западной имеет несколько разную интерпретацию. Для зарубежных исследователей по сути существует лишь один вариант – «permafrost», без указания на его историческую принадлежность. В нашей же стране ученые-мерзловеды пошли куда дальше и стали подразделять мерзлоту на реликтовую, сезонную и др. Важна именно реликтовая, по той причине, что остальные типы несопоставимы по мощностям из-за краткости и недостаточной интенсивности периодов их промерзания

Российский шельф обладает обширной областью распространения криолитозоны [17] - верхняя часть земной коры с отрицательной температурой почв, отложений, горных пород, с наличием или возможностью существования подземных льдов. Возникновение реликтовой мерзлоты в прошлом происходило в «субаэральных» условиях – в период регрессии моря вследствие эвстатических колебаний его уровня, обусловленных, в том числе, активизацией восходящих тектонических движений в позднем кайнозое [18]. По некоторым оценкам, 18 тыс. лет назад уровень моря в российской Арктике был до 160 метров ниже современного [19]. Обнаженные в результате понижения уровня моря участки шельфа оказывались открытыми для субаэрального промерзания в ледниковые периоды [17, 20, 21]. Со временем, с наступлением эпохи трансгрессии в голоцене, повышении уровня моря и смене субаэральных условий на субаквальные, началась постепенная деградация реликтовых многолетнемерзлых пород, вместе с положительными изменениями в поле температур осадочного слоя в целом [17].

Задача по моделированию СММП и ЗСГГ подразумевает изучение процесса их эволюции в масштабе сотен тысяч лет.

1.3 Физико-географическое описание района моря Лаптевых

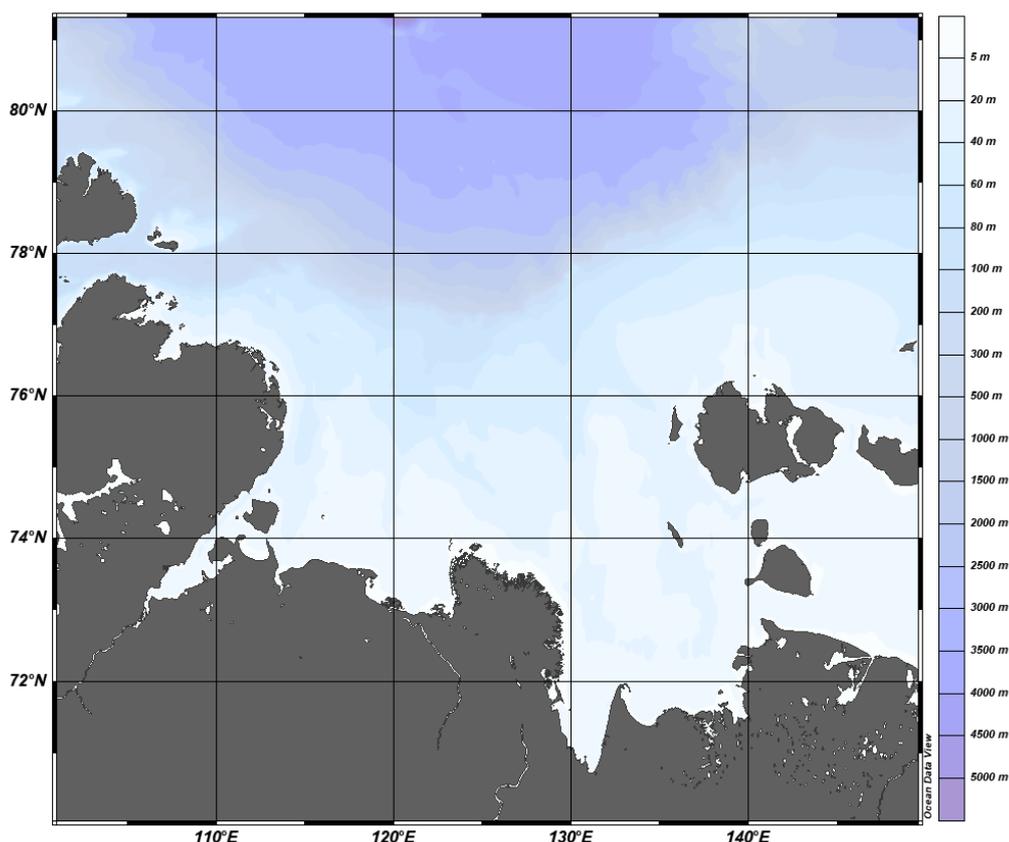


Рисунок 1.3 – акватория моря Лаптевых, картированная с применением батиметрии GEBCO 3.

В качестве района исследования был выбрана акватория моря Лаптевых (Рис. 1.3) – одного из морей СЛО, ограниченное полуостровом Таймыр с запада и Новосибирскими островами с востока. Для моря характерно широкое распространение плоского шельфа с преобладанием мелководных районов с глубинами менее 30 метров, даже в рифтовых областях, рассматриваемых центрами тектонической активности с проявлениями современного вулканизма [22]. Причина этого в том, что позднемезозойский-кайнозойский и современный

речной сток вынес большие массы осадочного материала, заполнив рифтовые долины и образовав большие конусы выноса. Последние на данный момент тектонические движения носили по большей части нисходящий характер и компенсировались накоплением отложений.

Море Лаптевых достаточно хорошо изучено с помощью сейсмических методов, результаты исследований позволяют оценивать море, как наиболее перспективный район для поиска углеводородов в северной части Восточной Сибири [23-26]. На это указывают значительная мощность осадочного чехла (до 15 километров) [27], а также наличие крупных валовых, рифтовых структур и прогибов [27-29]. На шельфе моря Лаптевых выявлен ряд крупных осадочных бассейнов со значительным углеводородным потенциалом. Кроме того, сейсмоакустические профили выявили, так называемые «permafrost tables» - свидетельства наличия кровли СММП [30].

Одно из характерных отличий моря Лаптевых от морей Западной Арктики во время последнего ледникового максимума (Last glacial maximum – LGM): море Лаптевых было свободно от ледникового щита (Рис. 1.4) [32], что упрощает задачу численного моделирования, лишая необходимости учета влияния ледника на эволюцию СММП.

К сложностям при исследовании моря можно отнести фактическое отсутствие буровых профилей, поэтому вся информация по геологической обстановке основывается на сейсмических методах и знаниях о прибрежных районах [31].

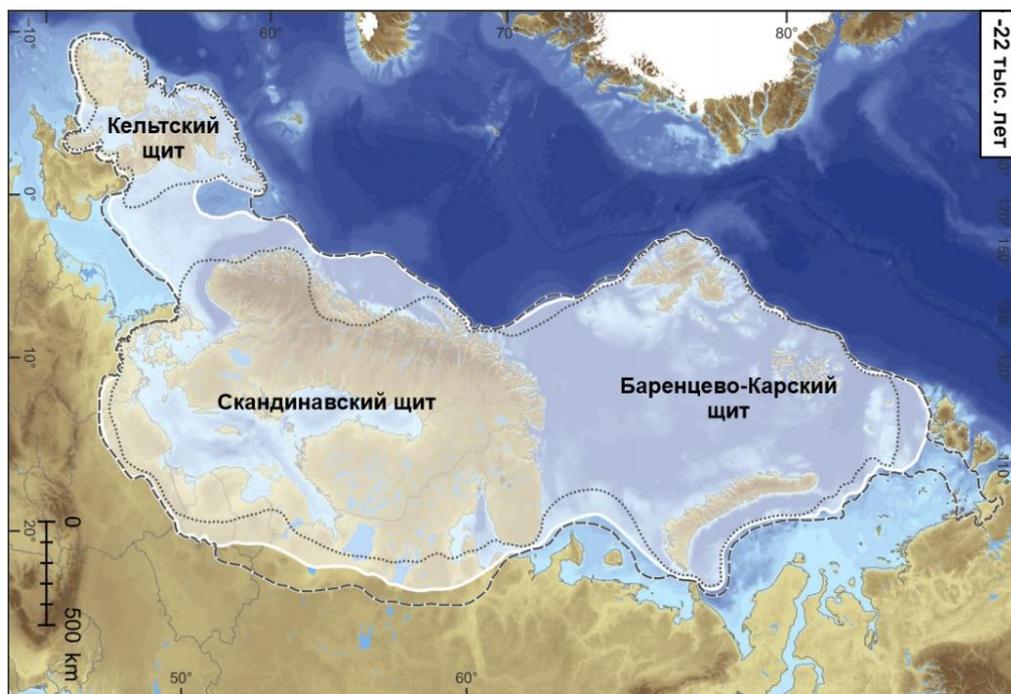


Рисунок 1.4 – максимальное распространение евразийского ледникового щита во период LGM (пунктиром), минимум – точечным пунктиром, белый полигон – наиболее возможная площадь [32].

Море Лаптевых также представляет интерес исходя из мониторинговых данных начала XXI века. Так, например, на рубеже 2008-2011 годов в северной части мелководного шельфа была обнаружена крупная зона сипов газа (Рис. 1.5), именуемая Центрально-Лаптевской (ЦЛЗСГ) [33], впоследствии ставшая одним из основных объектов экспедиционных исследований [34-36]. ЦЛЗСГ в своем роде является уникальной зоной, расположенной на небольших глубинах в 50-120 метров и приуроченной к зоне контакта Евразийской и Северо-Американской плит [37]. В меньшем масштабе ЦЛЗСГ находится в зоне стыка Лаптевоморской рифтовой системы, Хатанго-Ломоносовской зоны разломов и юго-восточным окончанием хребта Гаккеля [37]. По некоторым данным именно ЦЛЗСГ обладает высоким нефтегазоносным потенциалом и мощной осадочной толщей до 14-16 км [33].

Как полагают исследователи, на шельфе СЛО происходит интенсивная эмиссия природного газа (преимущественно метана) вследствие деградации СММП [34-36]. Эмиссия происходит не только из залежей свободного газа, но и

из газогидратных [33]. При этом из-за небольших глубин, поднимающийся метан не успевает пройти процесс аэробного окисления до углекислого газа и попадает в атмосферу в неизменном виде, усиливая парниковый эффект.

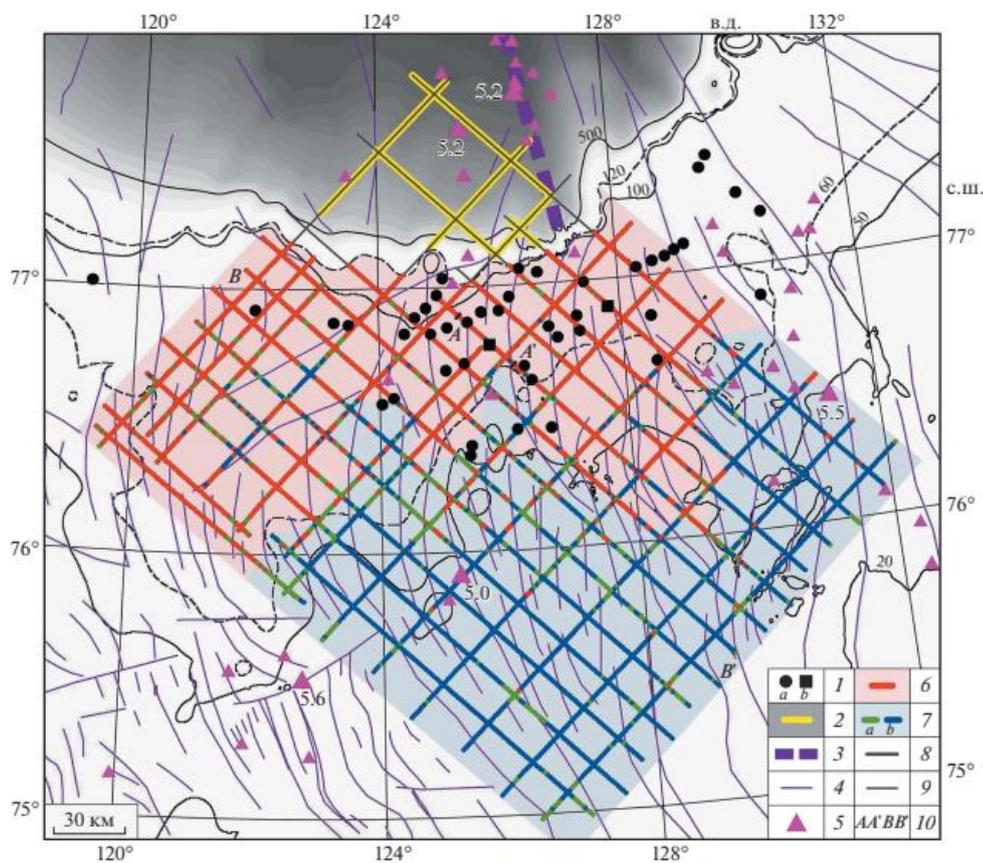


Рисунок 1.5 – 1a, 1b – сипы газа (b – участки с высокой концентрацией сипов); 2 – признаки наличия газогидратов на континентальном склоне (горизонт BSR); 3 – ось хребта Гаккеля; 4 – глубинные разломы; 5 – землетрясения (в том числе с указанной магнитудой более 5.0); 6 – отсутствие преломленных волн или их скорости менее 2.3 км/с; 7 – преломленные волны с кажущимися скоростями 2.3–2.8 км/с (a) и 2.8–4.0 км/с (b); 8 – участки сейсмопрофилей на глубинах свыше 120 м; 9 – изобаты; 10 – положение разрезов [33].

2 Методика расчета СММП и ЗСГГ

2.1 Общие положения

Методика определения границ СММП и ЗСГГ в работе похожа на используемую в выполненных ранее работах, например [44].

Согласно [44] решается одномерная нестационарная задача Стефана, где в качестве верхнего граничного условия используется условие первого рода – относительные температуры, взятые с кривой палеорекострукции (Рис. 2.1)

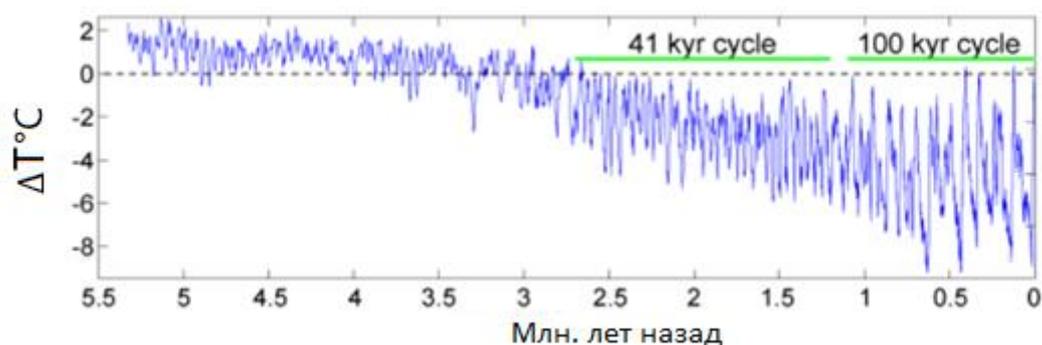


Рисунок 2.1 – палеорекострукция из работы [44]

В качестве нижнего граничного условия служит тепловой поток, принимаемый в [44], как 60 мВт/м^2 . При этом, задача по сути приводится к виду нескольких стационарных, так как вместо расчета по «непрерывной» палеокривой, расчет ведется по кривой с большей дискретностью, поделенной на несколько периодов одинаковых температур. Результатом работы служат кривые положения границ СММП и ЗСГГ (Рис. 2.2)

Для грамотной постановки задачи требуется правильно подобрать граничные условия: температуру на верхней границе, представляемой в виде кривой палеорекострукции; выбрать для исследуемой акватории значение

теплового потока на нижней границе и подобрать теплофизические параметры, характерные для морских отложений.

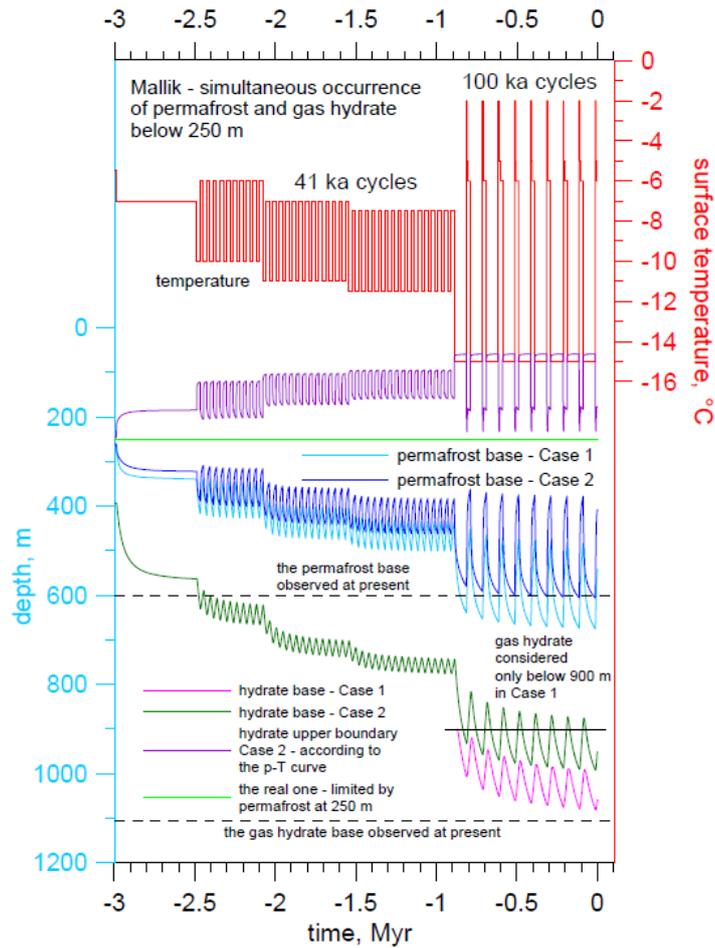


Рисунок 2.2 – результаты моделирования из [44], красным – колебания температуры, синим и голубым – положения подошвы мерзлоты, зеленым и розовым – подошва ЗСГГ.

2.2 Описание модели теплопроводности – «задачи Стефана»

Работа основана на решении известной одномерной, нестационарной задачи теплопроводности с коэффициентом температуропроводности Kt («задачи Стефана»):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = Kt \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Где Kt является переменным коэффициентом, зависящим от температуры и принимающим различные значения для 4-ех различных фаз: минерального скелета, воды, гидрата и льда.

$$Kt = \frac{\lambda}{C_p} \quad (2.2)$$

Представление коэффициента температуропроводности было взято из работ [45] именуемое т.н. «моделью теплопроводности эффективной среды», где эффективная теплопроводность n -компонентной среды определяется путем решения алгебраического уравнения n -степени.

$$\frac{1}{\lambda_e} = 3 \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{2\lambda_e + \lambda_i} \quad (2.3)$$

Где λ_e – эффективная теплопроводность, λ_i – теплопроводность i -компоненты осадка (представлены минеральным скелетом, водой, льдом или газовым гидратом), δ_i – относительный объем (доля) i -й компоненты в единичном объеме среды, который определяется следующим образом для трех различных фаз:

1. В условиях минерального скелета $\delta_i = 1 - \phi$
2. Если поровое пространство представлено гидратом (5%), льдом или водой в зависимости от условия замерзания $T = -1.8^\circ\text{C}$, то $\delta_i = \phi$, где ϕ – пористость среды, принимаемая некой константой.

Зная из [45] аналитическое решение уравнения для двухкомпонентной системы, представленное А. Я. Гольмштоком, решения уравнения (4) для системы из трех компонент можно добиться «методом половинного деления» длиной в 60 итераций для большой точности, в ходе которых решается система двух циклов из 60 итераций применительно к 3-ех компонентным средам,

содержащим λ воды/льда, газового гидрата и минерального скелета ($\lambda_w, \lambda_{ice}, \lambda_w$ и λ_{sk} соответственно).

В свою очередь, эффективная теплоемкость C_p , необходимая для нахождения Kt в (2.2), предлагается в виде уравнения:

$$\rho C_p = \rho_{sk} C_{sk} [1 - \phi] + \rho_i C_i \phi \quad (2.4)$$

Или при учете объема, занимаемого гидратом в осадке (5%), в случае благоприятных условий:

$$\rho C_p = \rho_{sk} C_{sk} [1 - \phi] + \rho_h C_h \phi 0.05 + \rho_i C_i \phi (1 - 0.05) \quad (2.5)$$

Где ρ_{sk} и C_{sk} – плотность и удельная теплоемкость минерального скелетного вещества, ρ_i и C_i – плотность и удельная теплоемкость i -компоненты (вода/лед), а ρ_h и C_h – плотность и удельная теплоемкость применительно к включенным в осадок газовым гидратам.

Одной из учтенных особенностей является то, что резкий переход между жидкой и твердой фазой может привести к скачкообразному изменению скрытой теплоты ледо- и гидратообразования в модели, поэтому в качестве решения для фазового перехода была предложена структура «ступени» или «интервала» в $\pm 0.5^\circ\text{C}/\text{K}$ с учетом удельной теплоты плавления для льда (H_i) и гидрата (H_h).

При попадании в данный промежуток $\pm 0.5^\circ\text{C}$ относительно температуры фазового перехода применяется не уравнение (2.5), а следующая система:

Если $|T - T_f| < 0.5$

$$C_p = C_p + H_i \cdot \phi \cdot \rho_w (1 - 0.05) \quad (2.6)$$

Но при этом сам газовые гидраты тоже имеют фазовую температуру перехода T_{phase} из [15][36].

Если $|T - T_f| < 0.5$

$$C_p = C_p + H_h \cdot \phi \cdot \rho_w (0.05) \quad (2.7)$$

Аналогичным образом реализуется алгоритм условий фазового перехода для λ_e

При $T < 271.35$:

Тогда мы имеем выражение, учитывающее теплопроводность системы «минеральный скелет-лед»:

$$\lambda_e = \lambda_{skice}$$

Где λ_{ski} получена из решения уравнения (2.3) для двух компонент.

При $T < T_{phase}$ и $T > T_f$:

Тогда, при решении уравнения (2.3), мы имеем систему «минеральный скелет-вода-гидрат»:

$$\lambda_e = \lambda_{skwh}$$

При $T < T_{phase}$ и $T < T_f$:

Мы имеем систему «скелет-лед-гидрат», опять же, получаемую из (2.3):

$$\lambda_e = \lambda_{skih}$$

Результатом работы должны стать поля температуры в осадке, границы СММП и ЗСГГ.

Изначально в работе предлагался к использованию метод явной разностной схемы, являющийся наиболее простым, в частности для расчета с переменным коэффициентом теплопроводности:

$$T_z^{t+\Delta t} = T_z^t - Kt \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T_{z+\Delta z}^t - 2T_z^t + T_{z-\Delta z}^t) \quad (2.8)$$

Однако же, при определении оптимального шага по времени, т.е. при определении минимального условия устойчивости для данной схемы:

$$Kt \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \leq \frac{1}{2}$$

Где Kt – имеет характерный масштаб 10^{-7} , а z – 10^0 м, шаг по времени должен быть не более половины от 10^7 секунд. Или 1,5 года. При масштабе в сотни тысяч или даже миллионы лет по времени и 10 тыс. метров по глубине подобное решение может привести к большим затратам, как вычислительных ресурсов, так и реального времени. Поэтому было решено перейти от явной разностной схемы к неявной, являющейся заведомо устойчивой при любом шаге по времени.

$$T_z^t = (-c_z^t T_{z+\Delta z}^t + \gamma_z^t) / \eta_z^t \quad (2.9)$$

Одним из основных изменений является зависимость Kt в неявной разностной схеме от температуры на том же горизонте, но в предыдущий шаг по времени. Такое решение было принято для упрощения задачи, несмотря на снижение общей точности результатов. Снижение точности предполагается незначительным, в виду масштабности расчета.

В качестве начального условия принимается установившийся в ходе решения стационарной задачи профиль температур.

При решении задачи Стефана необходимыми параметрами/переменными для моделирования мощности СММП и ЗСГГ являются теплофизические свойства отложений – теплоемкость и теплопроводность, которые зависят от пористости, плотности и минеральных компонентов (осадочного матрикса). В связи с отсутствием данных о теплофизических свойствах отложений в необходимом количестве, для расчетов была принята модель уплотнения отложений по закону Ати [Athy, 1930]:

$$\varphi(z) = \varphi_0 \cdot \exp(-\varphi_a \cdot z), \quad (2.10)$$

где φ_0 – пористость придонных осадков, φ_a – коэффициент уплотнения (Таблица 3.1). Согласно закону Ати, вся толща мерзлых отложений

рассматривается, как трёхкомпонентная среда, состоящая из минерального скелета, воды и льда.

Как уже было сказано выше, в качестве верхнего граничного условия задается условие «первого рода» - непосредственно в виде значений температуры на верхней границе, причем в периоды регрессии моря, когда суша открыта для выхолаживания, температура на верхней границе принимается равной приземной температуре воздуха, т.е. $T_{z=0}^t = T_a^t$. В случае же периода трансгрессии моря, температура на верхней границе определяется температурой придонной воды, т.е. $T_{z=0}^t = T_{\text{bottom}}^t$. Математически нижнее граничное условие описывается как:

$$\lambda_e \frac{\partial T(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_{\max}}, \quad (2.11)$$

где λ_e – эффективная теплопроводность, T – температура отложений; z – глубина (отсчитываемая от верхней границы донных отложений), z_{\max} – 10 тыс. м. поддонной глубины.

Задача Стефана решалась по неявной разностной схеме в ПО, написанном на языке программирования Julia. Необходимыми параметрами/переменными для моделирования являются теплофизические свойства отложений – теплоемкость и теплопроводность, которые зависят от пористости, плотности и состава отложений. В модели не была принята четырехкомпонентная структура отложений – минерального скелета, воды, льда и гидрата метана, теплофизические параметры которых заданы по литературным данным. Изменение пористости с глубиной задано по закону Ати: $\phi(z) = \phi_0 \cdot \exp(-\phi_a \cdot z)$, где ϕ_0 – пористость поверхностного осадка, ϕ_a – коэффициент уплотнения. Эффективные значения теплопроводности и теплоемкости для всей толщи отложений (учитывая пористость и гидратосодержание) рассчитаны согласно А. Я. Гольмштоку [45] с модификациями, позволяющими учесть скрытую теплоту образования льда и ГГ за счет локального увеличения теплоемкости.

Теплофизические свойства отложений непрерывно изменяются по глубине с одинаковым фазовым составом и скачкообразно при фазовых переходах. В результате проведенных расчетов были получены массивы температур, демонстрирующие распределение характеристики в осадочном слое по времени и пространству до поддонной глубины 10 тыс. метров. Мощность ЗСГГ определялась по пересечению изотерм внутри осадочного слоя со значениями равновесной кривой ГГ, рассчитанной по Sloan [47] для системы «гидрат – вода+метан + 3,5% NaCl». Мощность СММП определялась сопоставлением расчетного профиля температур с температурой замерзания морской воды - 1,8°C. Для задания верхнего граничного условия при расчетах была использована палеореконструкция из [47], основанная на изотопных данных $\delta^{18}\text{O}$, полученных из ледяного керна станции Восток (Антарктида) и смоделированных на масштабе 5 млн. лет с шагом по времени 100 лет с помощью системы 4-х моделей. Реконструкция включает сведения об эвстатическом колебании уровня моря (Рис. 2.3) и аномальных значениях субаэральных температур (T_a) на горизонтах 1.25 -2 м над поверхностью в Северном полушарии (Рис. 2.4).

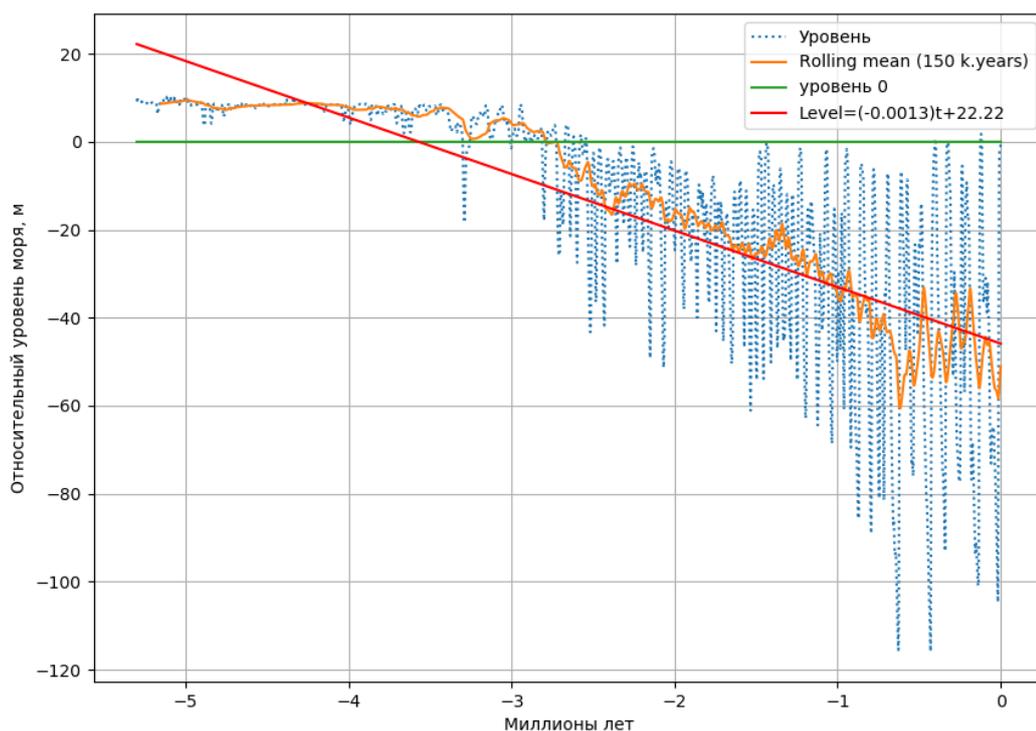


Рисунок 2.3 - кривая эвстатических колебаний из [47]

В качестве субэкральной температуры, относительно которой рассчитывался ряд палеотемператур (T_0), принята вычисленная среднемноголетняя субэкральная температура из архива CDAS-1 [48] за 20 лет (с 1999 по 2019 годы) в районе острова Котельный, которая в настоящий момент времени составляет -12°C . Расчеты так же проводились и при $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ для прогноза СММП и ЗСГГ в условиях, где современные субэкральные температуры выше температуры замерзания морской воды.

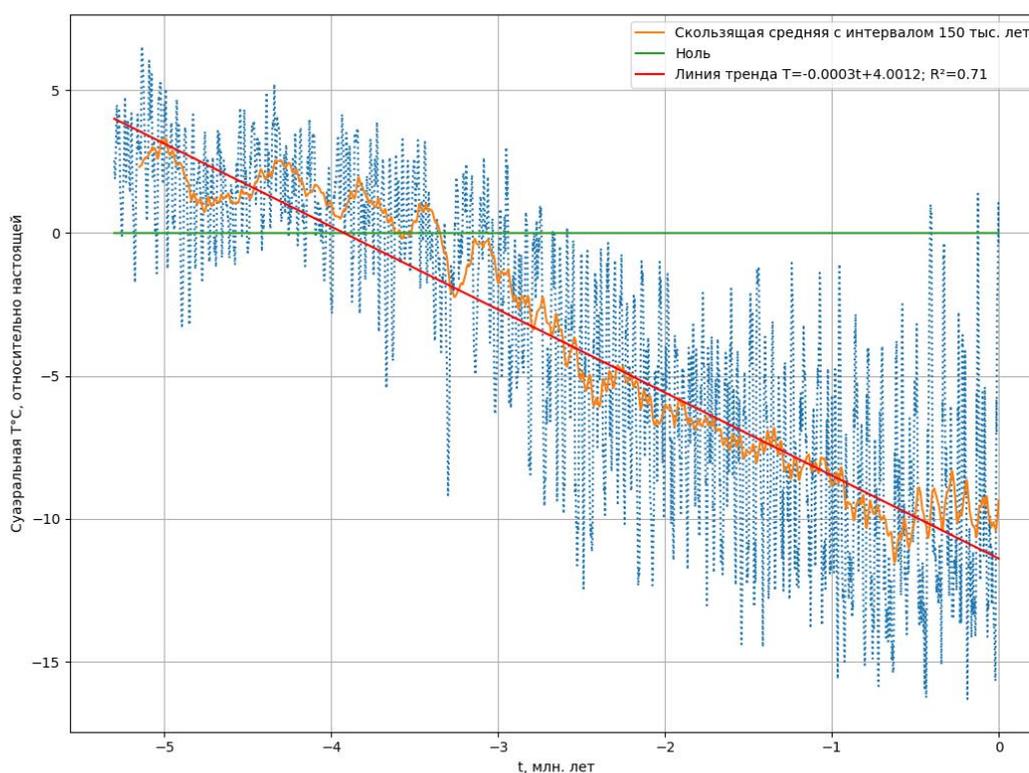


Рисунок 2.4 – кривая относительных субэкральных (приземных) температур из [47]

В исходном ряду аномальных субэкральных температур в ходе статистической обработки был выделен сильный отрицательный линейный тренд, с коэффициентом детерминации $R^2=0.71$. Сила тренда составила $-3 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/100$ лет. Скользящее осреднение (с окном в 150 тыс. лет, выбранным эмпирическим путем) в дополнение к общему ходу кривой позволяет разделить весь ряд на 3 составные части: 1) условно «положительного» среднего по температуре, недостаточного для формирования ГГ, продолжительностью от -5 до -3 млн. лет; вторая часть – продолжительностью от -3 млн. до -600 тыс. лет с сильным отрицательным трендом и преобладанием по вкладу в изменчивость ряда циклического колебания Миланковича с периодом в 41 тыс. лет; третья – от -600 тыс. лет до наших дней с трендом близким к нулю (слабовыраженным положительным), с доминированием периодичности в 150 тыс. лет. В

дальнейшем, в работе первая часть выборки была отброшена и исследование велось во временном масштабе от -3 млн. лет до наших дней. Согласно указанной эвстатической кривой были выявлены времена начала и конца регрессии, а также продолжительности промерзания для современных глубин воды 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 м. Для субаквального периода была принята температура $-1,5^{\circ}\text{C}$. Для субаэрального периода температура скачкообразно менялась на величину T_a+T_0 . В качестве нижнего граничного условия принята величина теплового потока 60 мВт/м^2 , характерная шельфа моря Лаптевых согласно [46]. Другие теплофизические параметры модели представлены в Табл. 2.1:

Таблица 2.1 – основные теплофизические параметры модели

Символ	Параметр	ЕИ	Значение	Ссылка
λ_{sk}	Теплопроводность скелета отложений	Вт/(м·К)	2.7	[45]
λ_w	Теплопроводность воды	Вт/(м·К)	0.6	[47]
λ_i	Теплопроводность льда	Вт/(м·К)	2.2	[47]
λ_{gh}	Теплопроводность метангидрата	Вт/(м·К)	0.4	[47]
C_{sk}	Теплоемкость скелета отложений	Дж/(кг·К)	1400	[45]
C_w	Теплоемкость воды	Дж/(кг·К)	4187	[45]
C_i	Теплоемкость льда	Дж/(кг·К)	2050	[45]
C_{gh}	Теплоемкость метангидрата	Дж/(кг·К)	2080	[45]
L_{wi}	Скрытая теплота льдообразования	кДж/кг	334	[59]
L_{gh}	Скрытая теплота гидратообразования	кДж/кг	430	[59]
ρ_{sk}	Плотность скелета отложений	кг/м ³	2500	[60]
ρ_w	Плотность воды	кг/м ³	1035	[45]
ρ_i	Плотность льда	кг/м ³	917	[47]
ρ_{gh}	Плотность гидрата метана	кг/м ³	913	[47]
φ	Пористость на дне	–	0.5	[60]
K	Коэффициент уплотнения отложений	–	0.00045	[45]

Расчет проводился для двух сценариев

1) Сценария T_0 , когда в качестве верхнего граничного условия использовалась исходная кривая относительных температур.

2) Сценария **T12**, в котором исходная кривая приводилась к среднегодовой с помощью добавки $\Delta T = -12^\circ\text{C}$

Для наглядности графики температур для сценариев T0 и T12 представлены на Рис. 2.5, применительно к глубине места 10 метров. Стоит также обратить внимание на наличие на графике «потолка» - субквальных условий

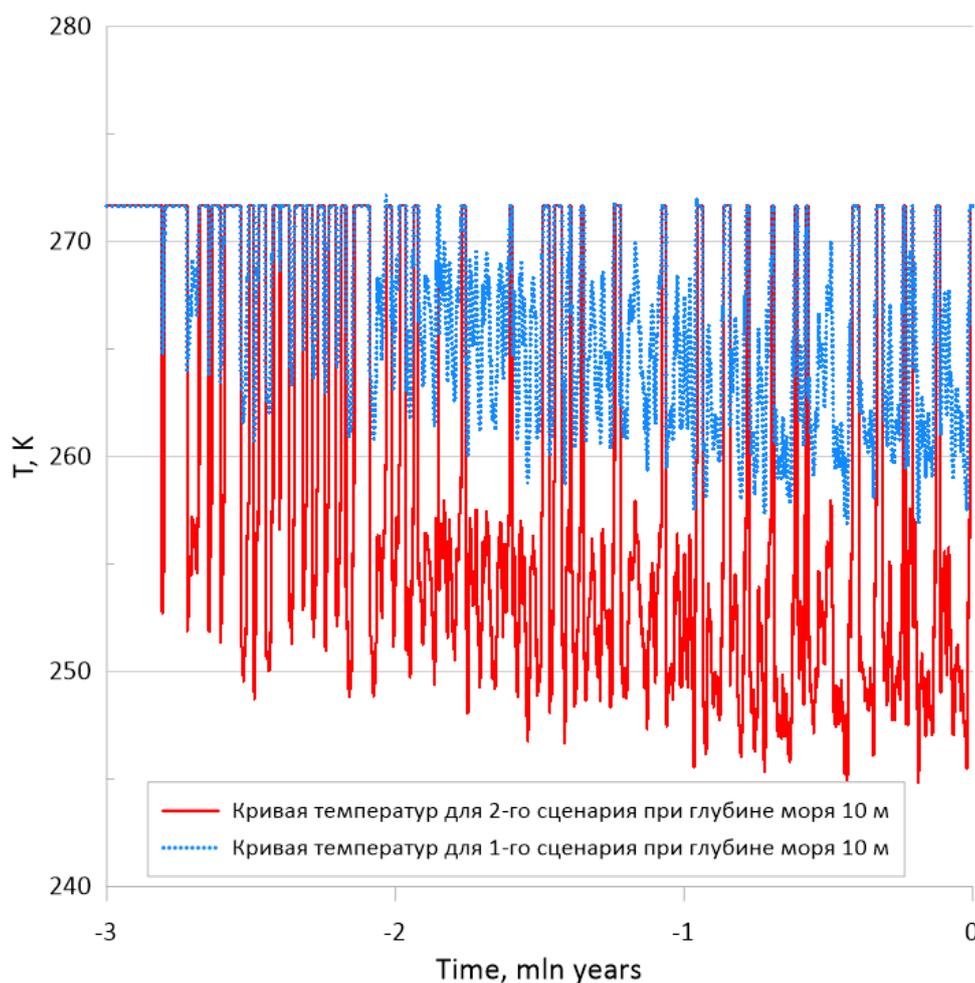


Рисунок 2.5 – кривые верхнего граничного условия для двух сценариев при глубине 10 метров

Начальные условия представляют вертикальное распределение температур, полученное в ходе решения стационарной задачи с шагом по времени порядка 10^{12} степени в течении 20 млн. лет, приблизительное решение

которой представлено на Рис. 2.6. В виде визуализации данных массива размерностью 631x10000 элементов.

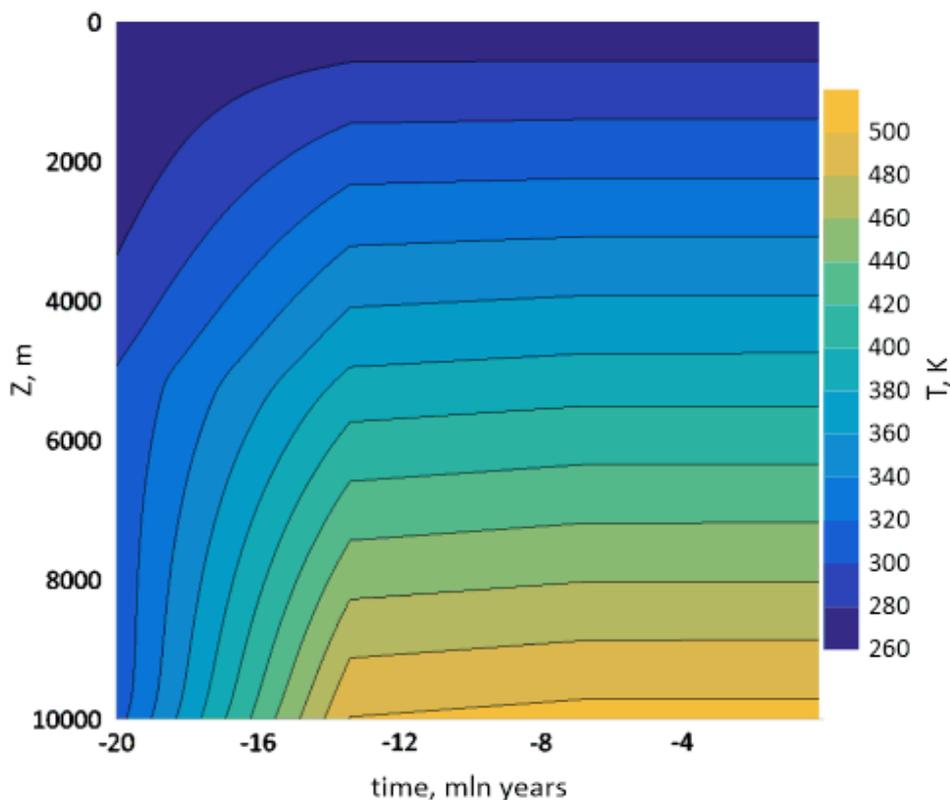


Рисунок 2.6 – распределение температур входе решения стационарной задачи

2.3 Выбор и статистическое исследование палеокривых

Критерием выбора палеокривых были следующие требования:

- 1) Интерес заключался в том, чтобы исследовать именно длинный ряд, так как большинство палеореконструкций имеют масштаб, включающий 420 тыс. лет.
- 2) Ряды относительного уровня моря и температур должны обладать одинаковой длиной и одной дискретностью.

Данным критериям полностью соответствуют ряды реконструкции de Boer et al. [47]. Во-первых, они обладают большой длиной в 54 тыс. элементов. Во-вторых, ряды температуры и уровня моря строятся по одной модели и обладают одинаковой дискретностью. Кроме того, среди аналогичных рядов (Рис. 2.7) [50], ряды [47] являются неким «средним», будучи построенными без поправки на широту.

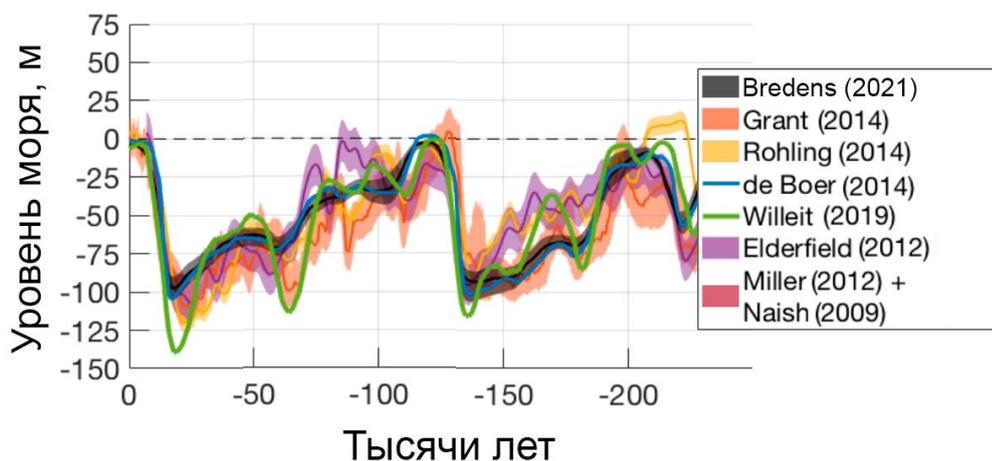


Рисунок 2.7 - Сравнение используемой кривой уровня моря (синий) с аналогичными кривыми моделей других авторов; из [50]

Как было сказано в разделе 2.1, с исходными кривыми de Boer et al. был проведен ряд статистических исследований: применение фильтра скользящего осреднения, описанного в 2.1, выявление и анализ линейного тренда, гармонический анализ. Так как исходные ряды являются чрезвычайно длинными, размерностью 54 тыс. элементов, статистический анализ проводился с помощью авторской программы, написанной на языке Python с применением открытых библиотек Numpy, Pandas, Statistics и д.р. Периодограмма для гармонического анализа была получена с помощью функции библиотеки Scipy для Python. Исходные выборки были укорочены справа, с 5.3 млн. лет до 3 млн. лет.

В рабочем масштабе от 3 млн. лет до наших дней вклад тренда в дисперсию ряда составил 68.5%, сила тренда практически не поменялась, оставляя порядок $3 \cdot 10^{-4}$.

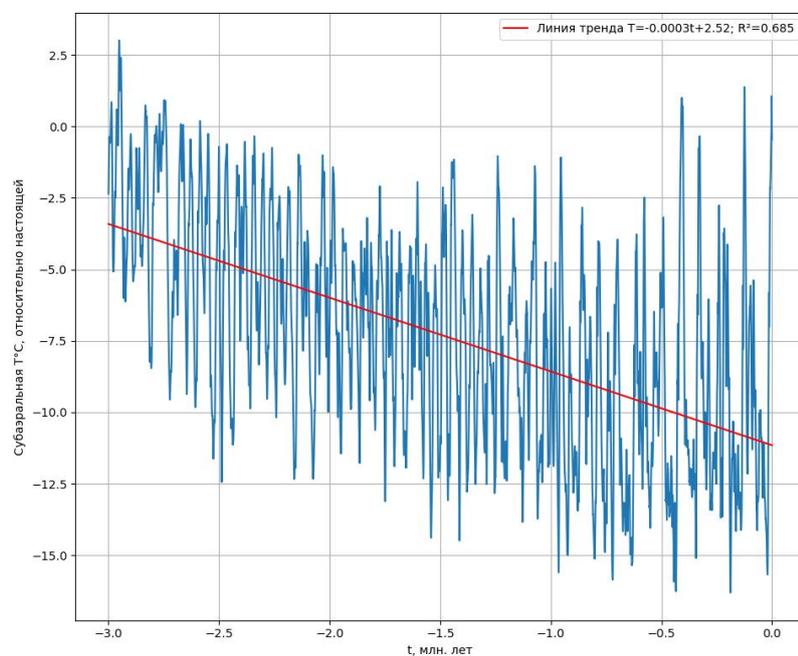


Рисунок 2.8 - рабочая выборка с линией тренда

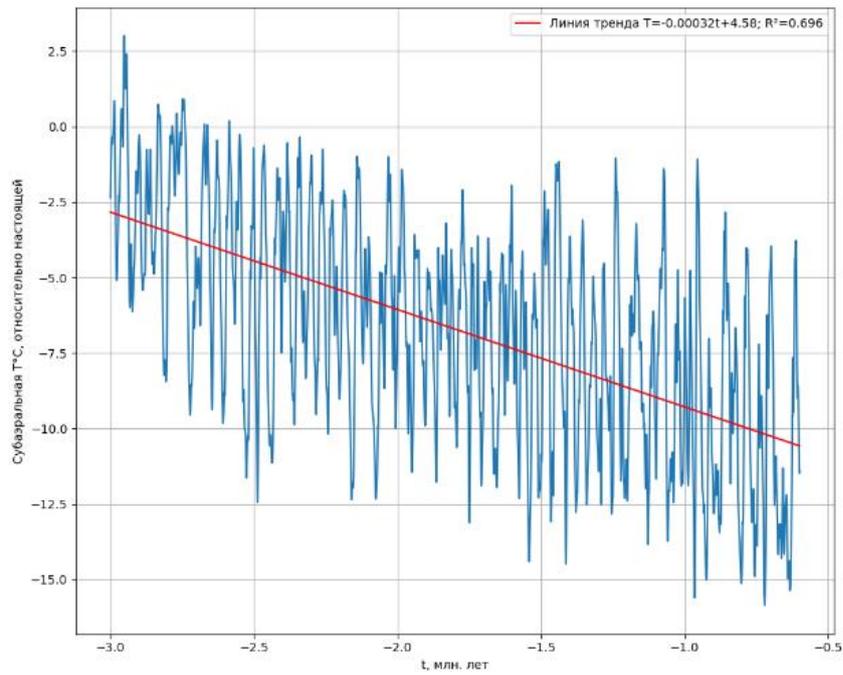


Рисунок 2.9 – промежуток от 3 до 0.6 млн. лет

На промежутке от -3 млн. лет до - 600 тыс. сила тренда оказалась чуть выше: $-3.2 \cdot 10^{-4} \frac{^{\circ}\text{C}}{100 \text{ лет}}$, R-квадрат составил 0.696

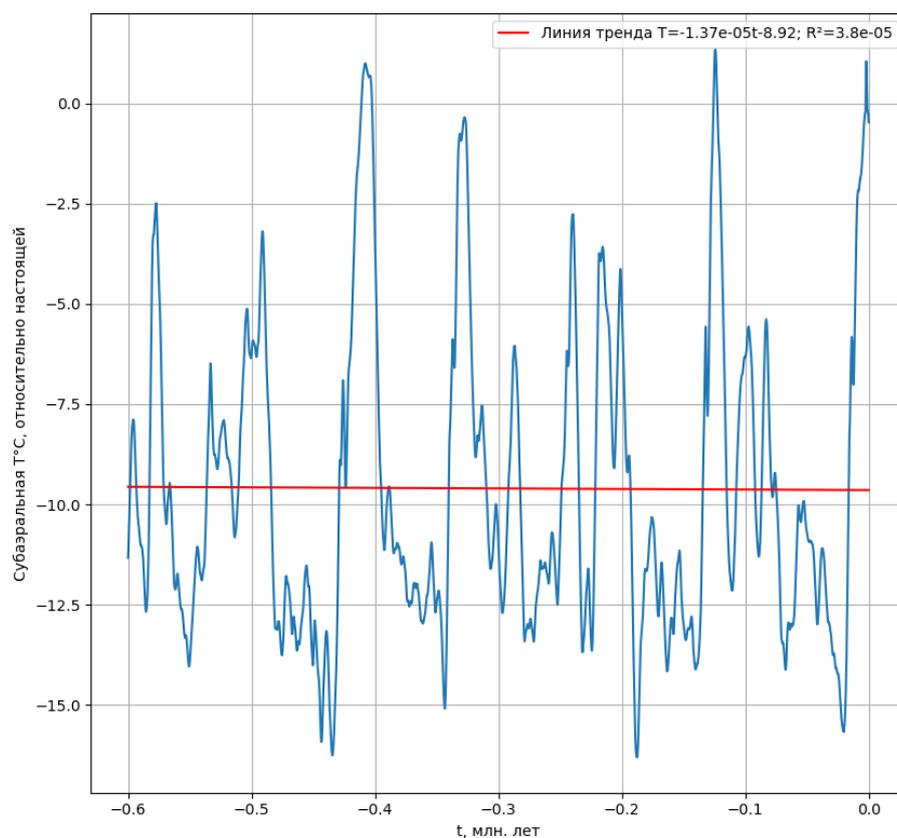


Рисунок 2.10 - крайний отрезок с линией тренда

В анализе тренда финального отрезка подтвердилось предположение о фактическом отсутствии долговременной изменчивости.

В результате спектрального и гармонического анализа на каждом промежутке было выделено по 5 гармоник, их характеристики были выделены в сводную Таблицу 2.1. Перед проведением гармонического анализа тренд из рядов удалялся.

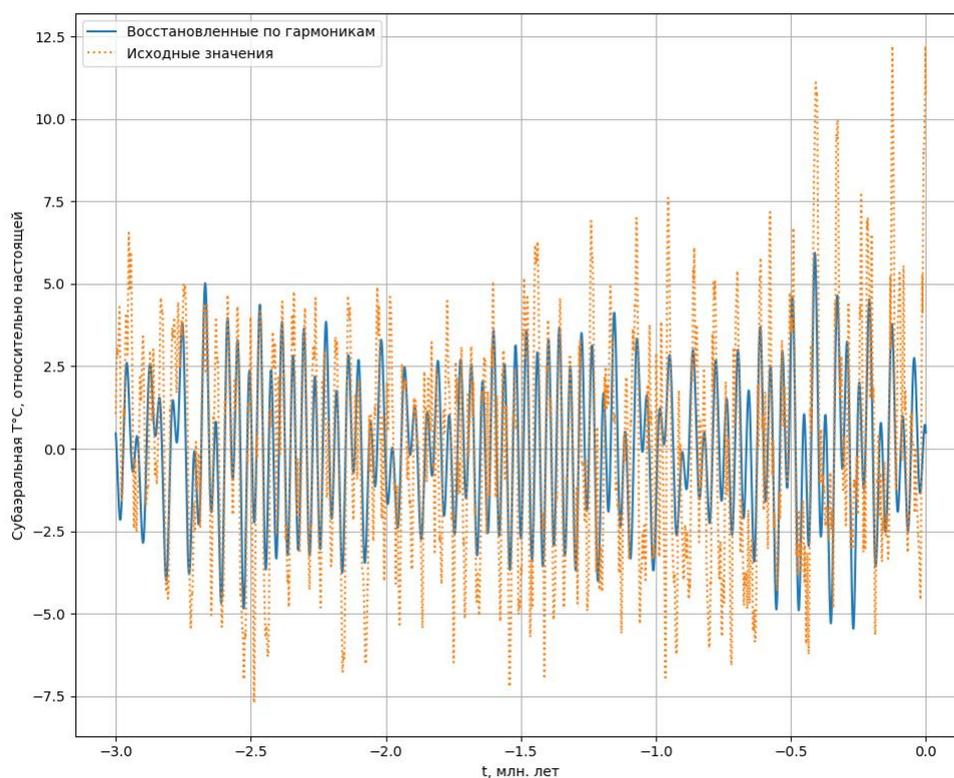


Рисунок 2.11- исходные и восстановленные по гармоникам значения выборки

В широком масштабе вклад цикличности в дисперсию исходного ряда составил всего 13%, все вместе гармоники описывают 42% ряда с удаленным трендом, что и отражено на графике.

Из всех колебаний наибольшую значимость на данном временном диапазоне имеет гармоника с периодом в 41,1 тыс. лет, соответствующая «вековому» циклу Миланковича, связанному с углом наклона Земной оси к плоскости ее орбиты, ее вклад превышает 50% суммарного вклада всех гармоник на данном масштабе (25% при общем вкладе в 42%), она же лидирует по амплитуде (2.35°C и дисперсии $^{\circ}\text{C}^2$). На втором месте идет гармоника с периодом в 93,8 тыс. лет, совпадающая с долгопериодическими колебаниями эксцентриситета Земли. Ее вклад в дисперсию крайне мал – приблизительно 1/5

от вклада «вековой» гармоника (0.056), амплитуда ее близка к 1°C. Остальные гармоники отстают от нее незначительно.

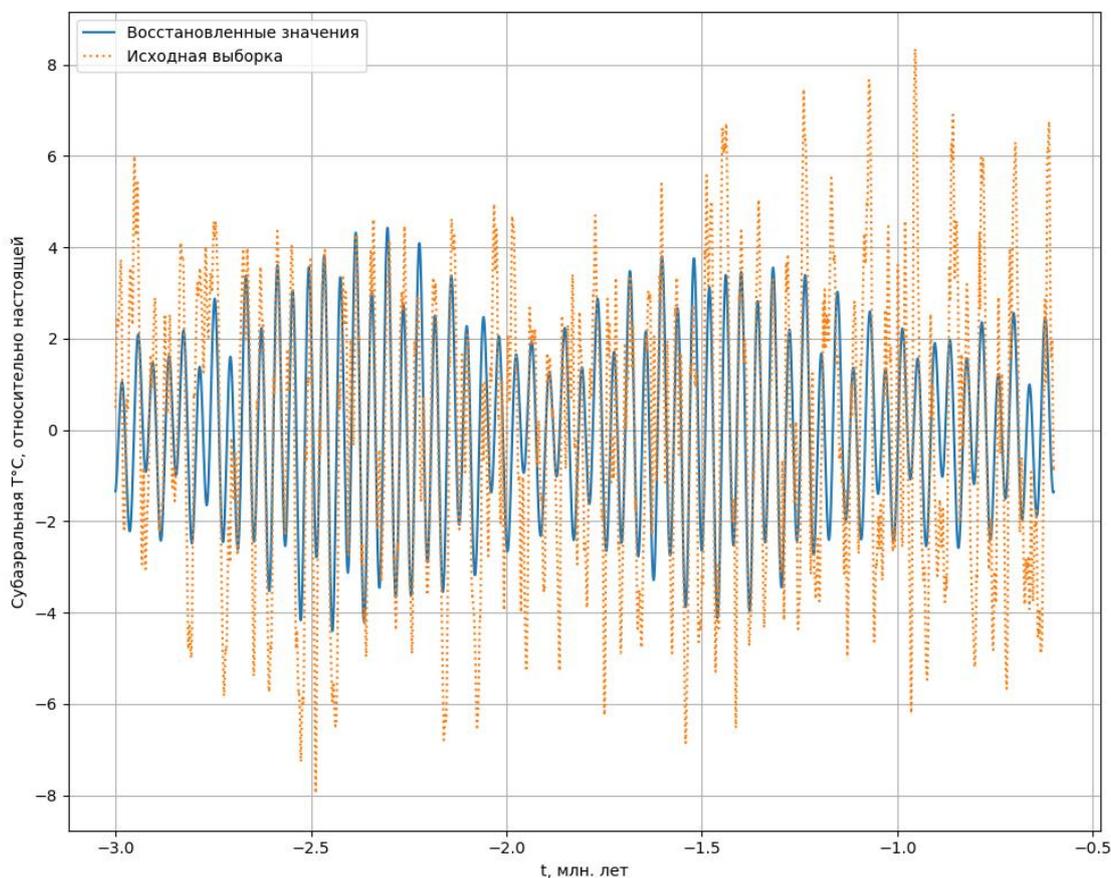


Рисунок 2.12 – исходные и восстановленные значения на промежутке от -3 млн. до -600 тыс. лет

На основной части рабочей выборки так же доминирует гармоника с периодом в 41 тыс. лет. Она является фактически единственной на отрезке от -3 млн. лет до -600 тыс. При общем вкладе гармоник в изменчивость ряда без тренда, составляющем 39%, общий вклад 4-х первых гармоник с периодом близким к 40 тыс. лет составляет 36%, и только 5-ая по значимости гармоника с периодом около 89 тыс. лет вносит дополнительные 3% в изменчивость ряда.

Вклад гармоник в исходный же ряд составляет 12% из-за наличия сильного тренда.

Произошедший в период от 1.2 млн. до 700 тыс. лет *Mid-Pleistocene transition* – «переход к среднему плейстоцену» проявляется в ходе гармоник и распределении их вклада в изменчивость исходного ряда. Гармоника «40 тысяч» отходит на второй план, основной становится 100 тыс. колебание (19.6% против 29.8% соответственно при суммарном вкладе в ряд без тренда 67%). Она же становится и первой по амплитуде (2.97 против 2.41°C). Вклады гармоник в ряд без тренда и исходный фактически не отличаются в силу отсутствия оною.

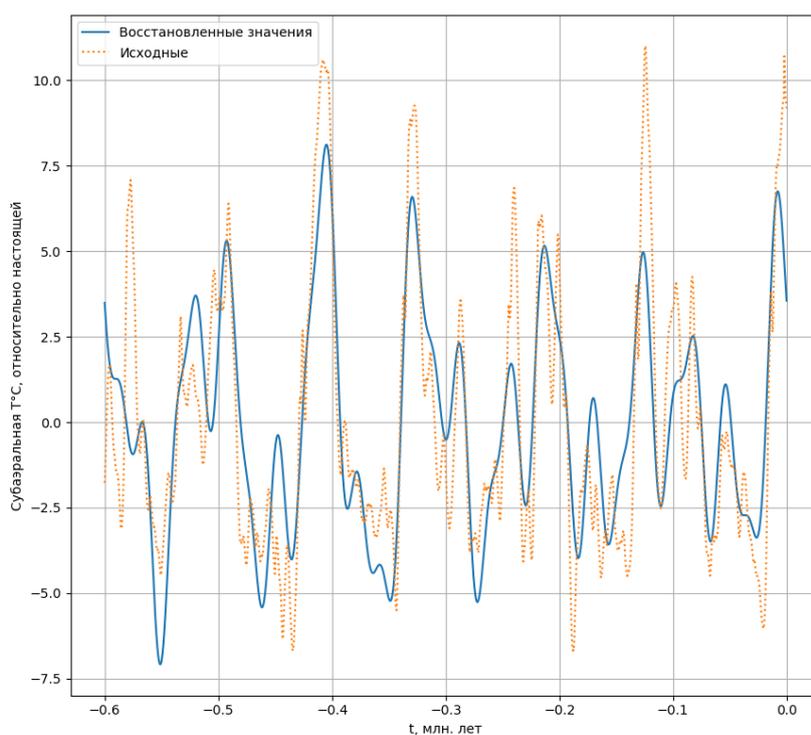


Рисунок 2.13 – финальная часть выборки от 0.6 тыс. лет до н. в.

Статистический анализ выявил 2 временных отрезка на кривой: с преобладанием колебаний в 41 и 100 тыс. лет. Характеристики гармоник представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.2 – сводная таблица статистического анализа

		Период -3 млн. лет по настоящее время										Вклад в исх. ряд	
	Частота, 1/100 лет	Частота, рад/100 лет	Период, 100 лет	Амплитуда, °С	Фаза, рад	Фаза, 100 лет	Дисперсия, °С ²	Вклад	Вклад общий	Вклад в исх. ряд			
1	0.0024	0.0153	410.9726027	2.3544	-0.1095	-0.0174	2.7716	0.2571	0.4184	0.13			
2	0.0011	0.0067	937.53125	1.0993	3.7640	0.0991	0.6042	0.0561	Ср. Значение ряда, °С	-7.28			
3	0.0025	0.0159	394.75	0.9361	3.5721	0.0685	0.4382	0.0406	Дисперсия ряда, °С ²	15.77			
4	0.0009	0.0059	1071.464286	0.8802	0.7877	0.1254	0.3874	0.0359					
5	0.0011	0.0069	909.1212121	0.7862	3.4584	0.0504	0.3091	0.0287					
		Период -3 млн. лет по -600 тыс. лет.										Вклад в исх. ряд	
	Частота, 1/100 лет	Частота, рад/100 лет	Период, 100 лет	Амплитуда, °С	Фаза, рад	Фаза, 100 лет	Дисперсия, °С ²	Вклад	Вклад общий	Вклад в исх. ряд			
1	0.0025	0.0154	406.7797	1.7200	1.7720	-0.2180	1.4791	0.1584	0.3930	0.12			
2	0.0024	0.0152	413.7931	1.4358	1.5764	-0.2491	1.0308	0.1104	Ср. Значение ряда, °С	-6.70			
3	0.0025	0.0157	400.0000	0.9308	-1.0894	-0.1734	0.4332	0.0464	Дисперсия ряда, °С ²	14.33			
4	0.0025	0.0160	393.4426	0.9188	3.6528	0.0814	0.4221	0.0452					
5	0.0011	0.0071	888.8889	0.7795	-1.2791	-0.2036	0.3038	0.0325					
		Период -600 тыс. лет по настоящее время										Вклад в исх. ряд	
	Частота, 1/100 лет	Частота, рад/100 лет	Период, 100 лет	Амплитуда, °С	Фаза, рад	Фаза, 100 лет	Дисперсия, °С ²	Вклад	Вклад общий	Вклад в исх. ряд			
1	0.0010	0.0063	1000.1667	2.9729	-0.5792	-0.0922	4.4190	0.2981	0.6689	0.67			
2	0.0025	0.0157	400.0667	2.4098	-1.3411	-0.2155	2.9036	0.1959	Ср. Значение ряда, °С	-9.60			
3	0.0012	0.0073	857.2857	1.6041	1.3346	0.2124	1.2865	0.0868	Дисперсия ряда, °С ²	14.82			
4	0.0043	0.0272	230.8077	1.2057	0.5959	0.0948	0.7269	0.0490					
5	0.0015	0.0094	666.7778	1.0753	-0.0371	-0.0059	0.5781	0.0390					

Касательно рядов уровня моря, которые также предполагается использовать в дальнейшем расчете можно сказать следующее: наблюдается картина, идентичная кривой относительной температуры (Рис. 2.8).

Объяснение данной картины может быть достаточно простым: обе выборки были получены одним исполнителем по единой модели. Пусть и с незначительными изменениями в общем ходе, они крайне близки друг другу по тренду и тенденции. Стоит выделить также доминирование долгопериодных колебаний на «финальном» отрезке после 700-600 тыс. лет по настоящее время, опять же попадающих под единую «гребенку» Срединно-Плейстоценового перехода, как и в случае кривой температур. Отрицательный тренд также чрезвычайно силен во вкладе в изменчивость ряда, R^2 составляет около 60%, что несколько меньше 71%, описанной температурной выборки, что вызвано более продолжительным «положительным» периодом, если в первом случае перегиб в сторону отрицательных значений температуры намечается уже на момент 3.2 млн. лет, то для относительного уровня моря переход через ноль происходит лишь в начале 3-го миллиона лет.

2.4 О выбранном тепловом потоке

В доступных источниках чрезвычайно мало информации о температурном поле осадочного слоя моря Лаптевых, в лучшем случае она представлена неравномерно об отдельных участках. Прогнозирование тепловых потоков и геотермального градиента осуществляется с помощью экстраполяции с большим пространственным шагом, измерений температуры на малой глубине в стратиффере, а также по косвенным данным о тепловых условиях, например, по известной корреляции между тепловыми потоками и возрастом геологических структур [17, 38].

Согласно [38] мощность теплового потока для арктического шельфа в целом колеблется в диапазоне от 40 до 60 мВт/м², с увеличением в море

Лаптевых до 60 мВт/м^2 . Значение определено по возрасту тектоногенеза. Это контрастирует с [39, 40], где мощность мерзлоты для моря Лаптевых была рассчитана с тепловым потоком, меняющимся в пределах от 40 до 100 мВт/м^2 . В виду недостатка данных эти значения в работе были выбраны по аналогии с тектоническими структурами на шельфе, а также из скважин на побережье и островах. В [41] СММП моделировалась по тепловому потоку 50 мВт/м^2 в пределах тектонических блоков и 100 мВт/м^2 для рифтов. В [42] рифтовой системе, основным ее структурным элементом, были присвоены значения 45, 50 и 60 мВт/м^2 .

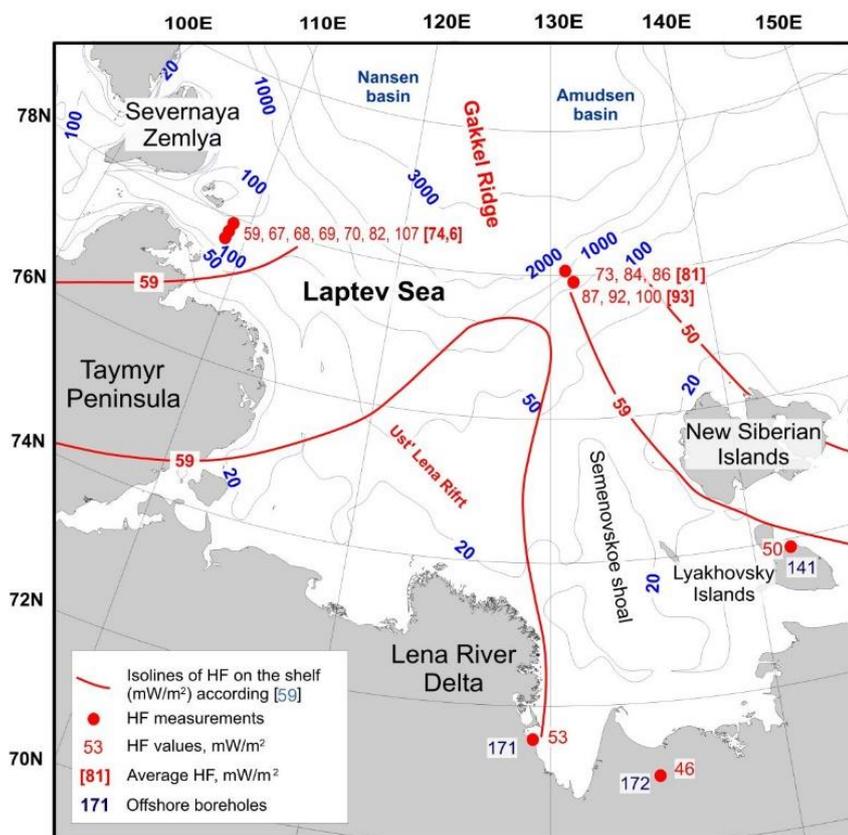


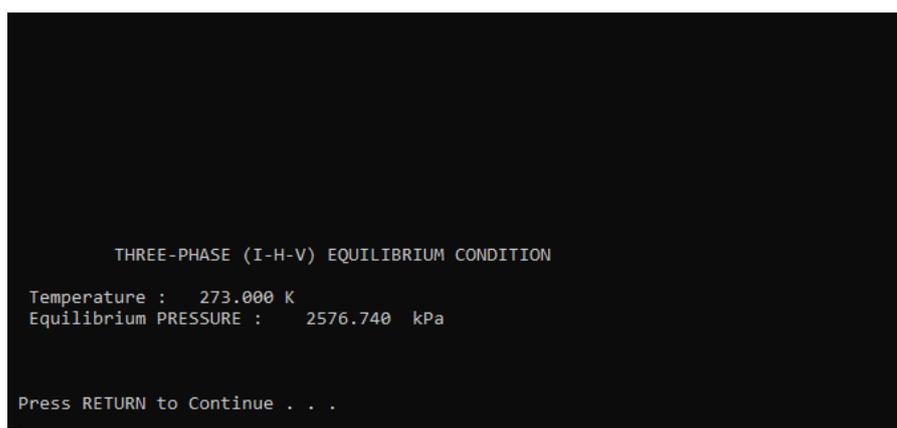
Рисунок 2.14 – красным – известные значения тепловых потоков в море Лаптевых (в скобках даны средние значения), синим – изобаты, фиолетовым – номер скважины [31]

Как итог, в результате анализа проведенных ранее работ по исследованию вечной мерзлоты и тепловых потоков, а также доступных измеренных значений

тепловых потоков моря Лаптевых, было принято решения использовать значение 60 мВт/м^2 . Это значение было использовано для задания нижнего граничного условия при решении задачи теплопроводности, принимая, что 60 мВт/м^2 являются типичными для арктического шельфа [38, 43].

2.5 Построение равновесной кривой с помощью программы CSMHyd Hydoff

Равновесные гидратные кривые рассчитывались с помощью программы CSMHyd Hydoff находящейся в открытом доступе. Программа является одномерной, написанной во второй половине 90-х годов для MS-DOS на языке Fortran. Интерфейс данной программы представлен на Рис. 2.15. Программа представляет из себя исполняемый файл – консольное приложение с разрешением «.exe». Основной ее функцией программы является вычисление равновесного давления для многокомпонентной системы (с термодинамическими ингибиторами или без них) при трех- или четырехфазных условиях с заданной температуры среды с точностью до тысячных.



```
THREE-PHASE (I-H-V) EQUILIBRIUM CONDITION
Temperature : 273.000 K
Equilibrium PRESSURE : 2576.740 kPa
Press RETURN to Continue . . .
```

Рисунок 2.15 – интерфейс Hydoff с проведенным расчетом равновесного давления для температуры 273К и 0 ‰ солености

Основным недостатком программы, как уже было сказано, является ее одномерность. Что существенно затрудняло построение равновесной кривой

длинной в 600 значений для температур в диапазоне от 240 до 300К с шагом 0.1К. В связи с чем возникло несколько вариантов развития событий: написание собственной программы, либо создание т.н. «робота» для автоматизации вычислений.

Последний вариант был принят, как наиболее оптимальный, в виду простоты и скорости исполнения. Действительно, с помощью одномерной «консольной» программы можно достаточно быстро обработать ряд любой длины, если автоматизировать ввод данных с помощью так называемого «робота» - программы, автоматизирующей действия, выполняемые пользователем через какой-либо интерфейс.

Для написания «бота» был выбран язык программирования Python [53], так как этот язык является языком общего назначения с простым, удобным синтаксисом, и практически неограниченными возможностями, за исключением низкой скорости вычислений в виду интерпретируемости. В данной работе скорость вычислений не играет существенной роли, так как основные расчеты производятся в сторонней программе, написанной на компилируемом Fortran, запускаемой из скрипта Python в фоновом режиме.

Результат расчета роботом (200 циклов с шагом 0.1К), ограниченный областью высоких температур, представлен в виде двух равновесных кривых для системы «гидрат – вода+метан + Sal% NaCl» на Рис. 2.16. Расчет «роботом» активно применялся в дальнейших работах по моделированию ЗСГГ, в том числе криогенных газовых гидратов [54]. Исходный код программы, названной автором «GHSZ_VNPIO» по аббревиатуре института, где работа была выполнена, представлен в Приложении А.

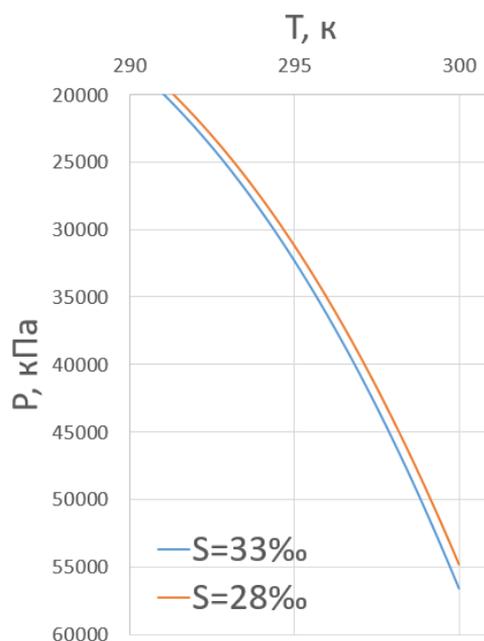


Рисунок 2.16 – пример расчета равновесных кривых роботом, демонстрирующие расхождение в области высоких температур в зависимости от солености.

Отдельно стоит отметить, что Python, благодаря модулю `subprocesses` с классом `subprocesses.Popen(...)` позволяет создавать фоновые подпроцессы, т.е. процессы без их непосредственной оконной визуализации. Библиотека PyQt позволяет создать оконное приложение для самого «робота», сделать его понятным даже неопытному пользователю, способному запутаться в «голом» программном коде, создать для него удобный интерфейс ввода исходных данных. По сути все, что остается сделать исследователю – запустить скрипт в директории расположения `Hydoff.exe` и по окончании расчета получить выходные данные – Excel-файл формата «.xlsx» с полностью завершенным оформлением таблицы средствами библиотеки `Numpy`, где для каждой координаты узла сетки поставлена в соответствие мощность прогнозируемой ЗСГГ, так как скрипт, помимо содержащейся в нем части «робота», также содержит вычисление границ ЗСГГ и их мощности, как разницы между этими границами. Фактически, полученный на входе массив гидрологических

характеристик по итогам расчета преобразуется в массив мощностей, полностью готовый для дальнейшего картирования средствами ГИС.

2.6 Методика картирования

Для картирования ЗСГГ была выбрана сеть точек с разрешением 1/12 градуса [50] (Рис. 2.17). Каждой точке присвоены: 1) глубина моря, согласно модели батиметрии GEBCO 2020 [49]; 2) значение теплового потока 3) значение температуры согласно сценарию. Значения мощности ЗСГГ для каждой точки сети получены путем линейной интерполяции расчетных значений, выполненных для глубин воды 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 м. Такой подход позволил выполнить пространственное картирование ЗСГГ криогенного генезиса на основе данных численного моделирования. Картирование было выполнено средствами Surfer 15 методом Kriging.

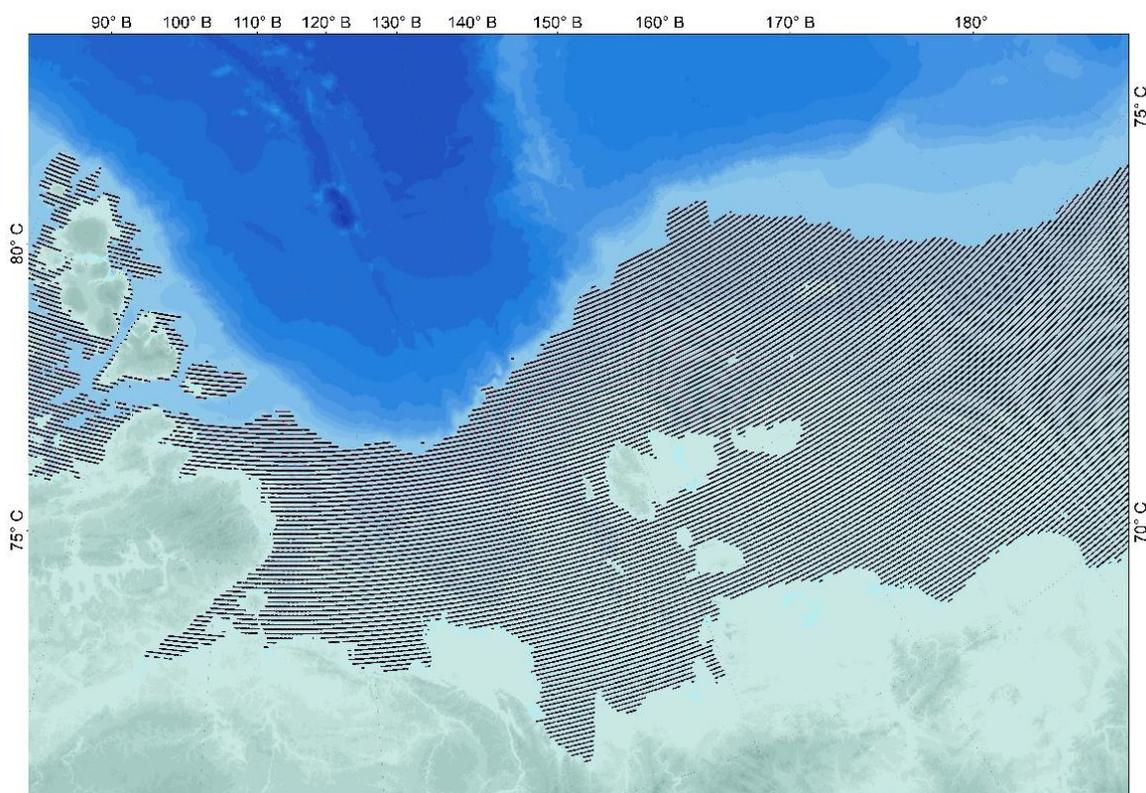


Рисунок 2.17 – пример сетки картирования для восточно-арктически морей

3 Результаты моделирования

3.1 Эволюция СММП и ЗСГГ для сценария «Т0»

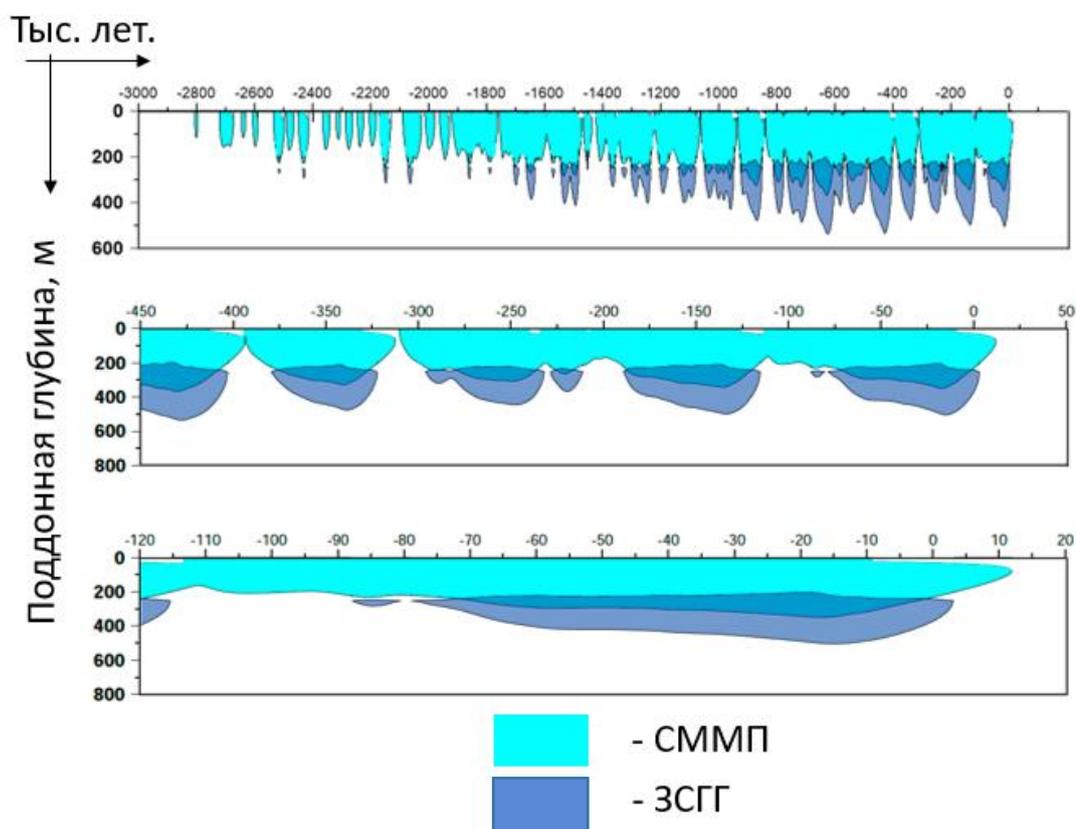


Рисунок 3.1 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины 10 м в сценарии Т0

График эволюции мерзлоты и зоны стабильности (Рис. 3.1) наглядно демонстрирует развитие этих термобарических зон на временном масштабе 3 млн. лет. Стоит отметить, что при таких условиях максимальная мощность СММП составляет около 400 метров, при этом кровля мерзлоты находится у поверхности фактически последние 120 тыс. лет до 10 тыс. лет назад, т.е. мерзлота начинает деградировать сверху с началом голоцена и просуществует 11 тыс. лет. ЗСГГ исчезнет через пару тысячелетий.

ЗСГГ залегает между горизонтами 300-500 метров, на графике эволюции ЗСГГ представлена островками – возникает периодически, цикл существования

ЗСГГ при данных условиях лежит в пределах 100 лет и является ярко выраженным.

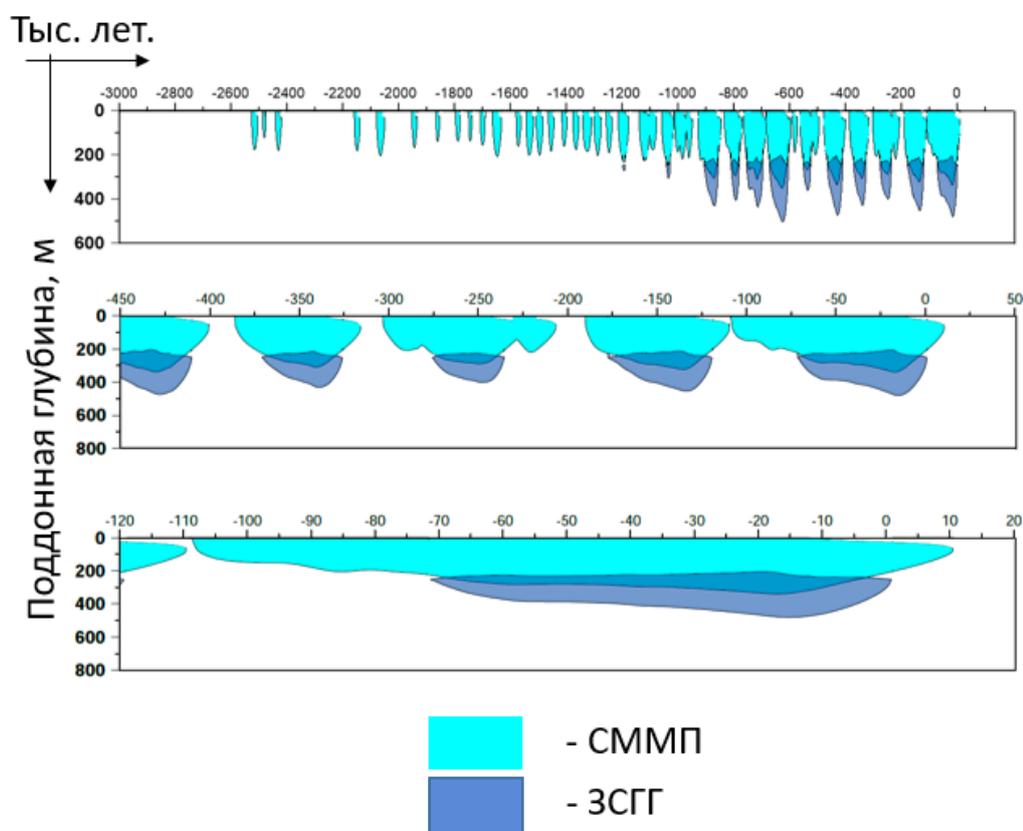


Рисунок 3.2 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины 30 м в сценарии Т0

При увеличении глубины места (Рис. 3.2), прерывистость мерзлоты на графике увеличивается. Мерзлота также, как и в предыдущем случае для ЗСГГ, возникает периодически и существует примерно 100 тыс. лет, после чего «схлопывается» и после некоторого временного окна формируется заново. По мощности ЗСГГ и СММП изменений не наблюдается. Продолжительность жизни ЗСГГ уменьшается до 70 тыс. лет. Мерзлота при современных субаквальных условиях просуществует еще 10 тыс. лет. ЗСГГ должна окончательно исчезнуть в ближайшее столетие.

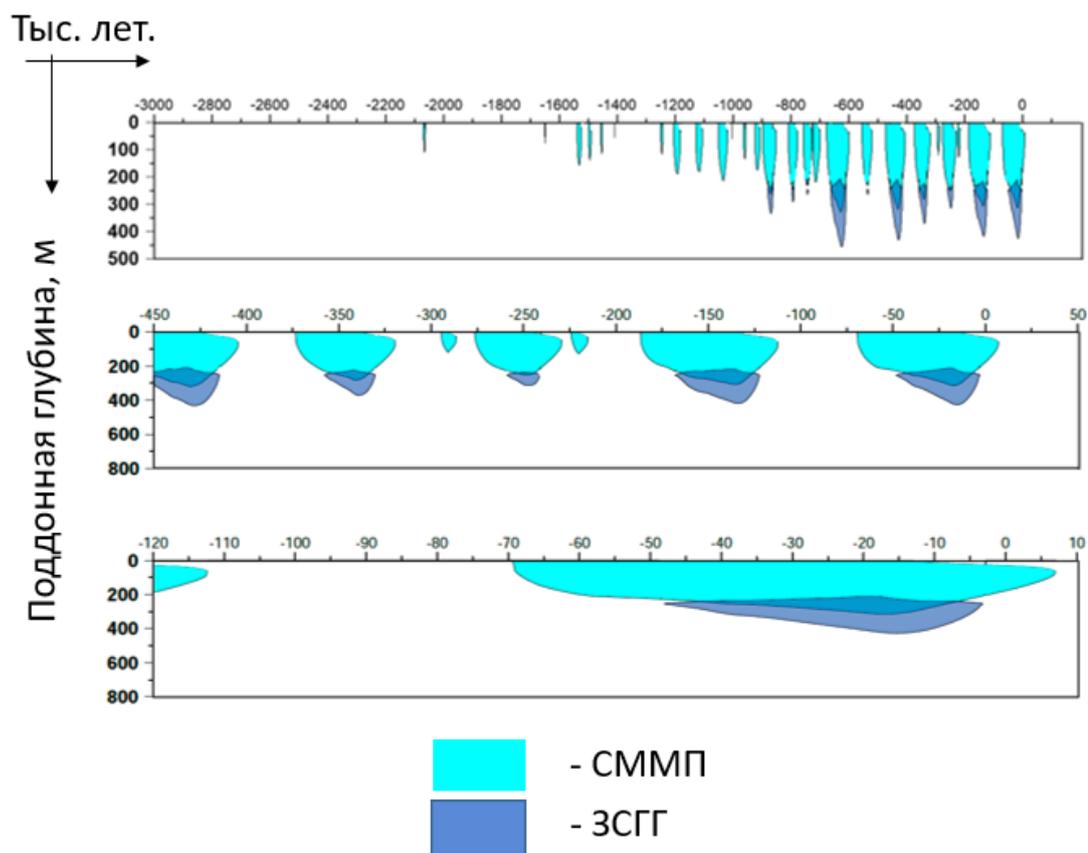


Рисунок 3.3 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины 50 м в сценарии T0

Для 50 (Рис. 3.3) метров время существования мерзлоты уменьшается до 75 тыс лет. Отдельно стоит отметить, что при сценарии T0 и глубине моря 50 метров ЗСГГ начинает формироваться только после перехода к среднему плейстоцену, т.е. после 800 тыс. лет до н. э. Период жизни данной ЗСГГ составляет около 40 тыс. лет. Деградирует мерзлота начинает также с началом голоцена и просуществует еще около 5 тыс. лет. ЗСГГ исчезает в среднем голоцене и к настоящему моменту времени не сохраняется.

3.2 Эволюция СММП и ЗСГГ для сценария «Т12»

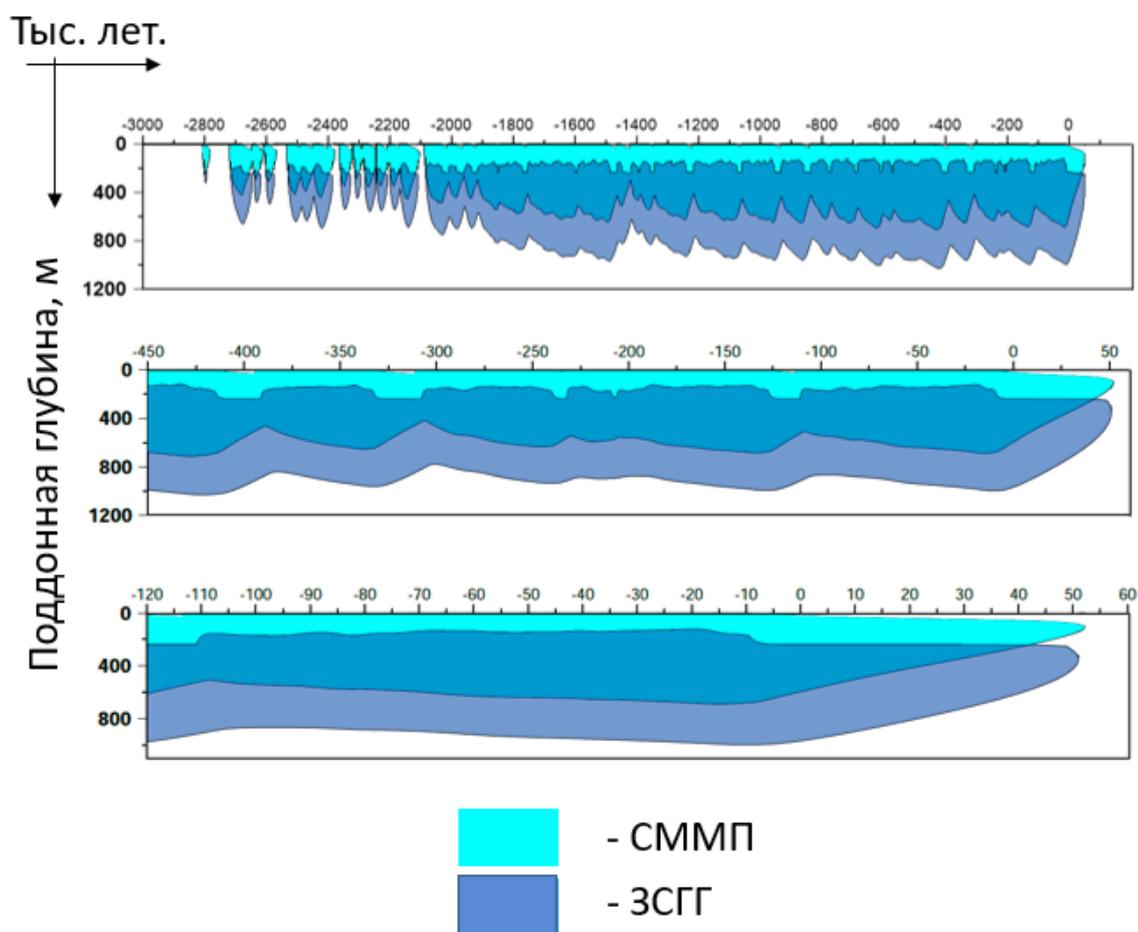


Рисунок 3.4 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины 10 м в сценарии Т12

При понижении среднееголетней температуры на 12°C , мерзлота и ЗСГГ на шельфе моря Лаптевых при глубине 10 метров (Рис. 3.4) существуют непрерывно на отрезке последних 2 млн. лет. При этом СММП достигают наибольшей мощности в 600 метров, ЗСГГ – так же 600 метров с нижней границей на горизонте 800 метров, а кровли – 200 метров. При этом в ходе кровли ЗСГГ отмечается видимое 100-тысячное колебание. Дегradировать СММП начинает лишь вплотную к настоящему моменту времени и по прогнозу просуществуют еще 50 тыс. лет.

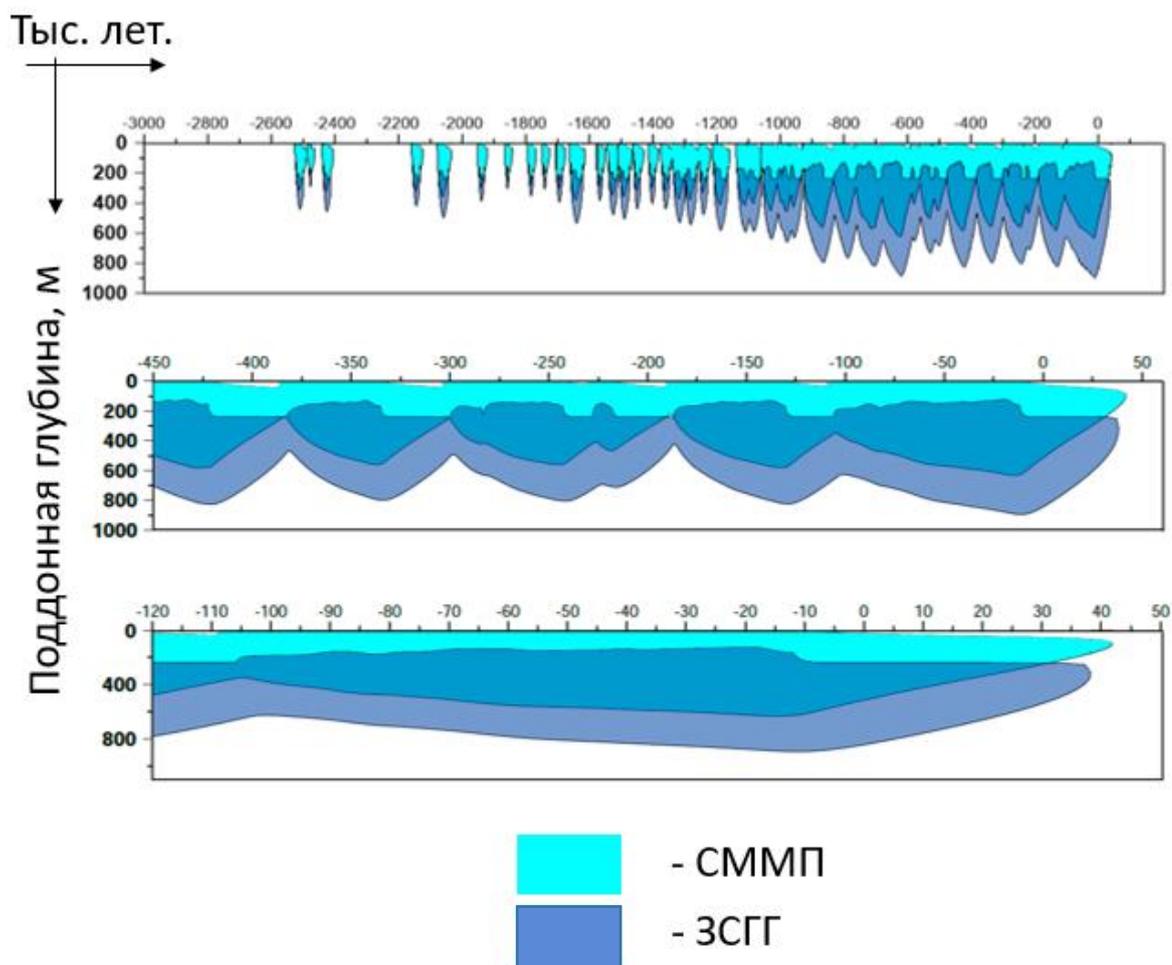


Рисунок 3.5 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины 30 м в сценарии T12

На Рис. 3.5 становится заметным аномалия в виде «ступеньки», происходящая в результате выравнивания температур в осадочном слое. Наиболее заметной она становится на 30 метрах, наблюдается во всех расчетах. Деградация мерзлоты начинается в настоящее время и продлится еще 40 тыс. лет. ЗСГГ фактически повторяет собой ход СММП, но исчезает по прогнозу немногим ранее – около 37 тыс. лет.

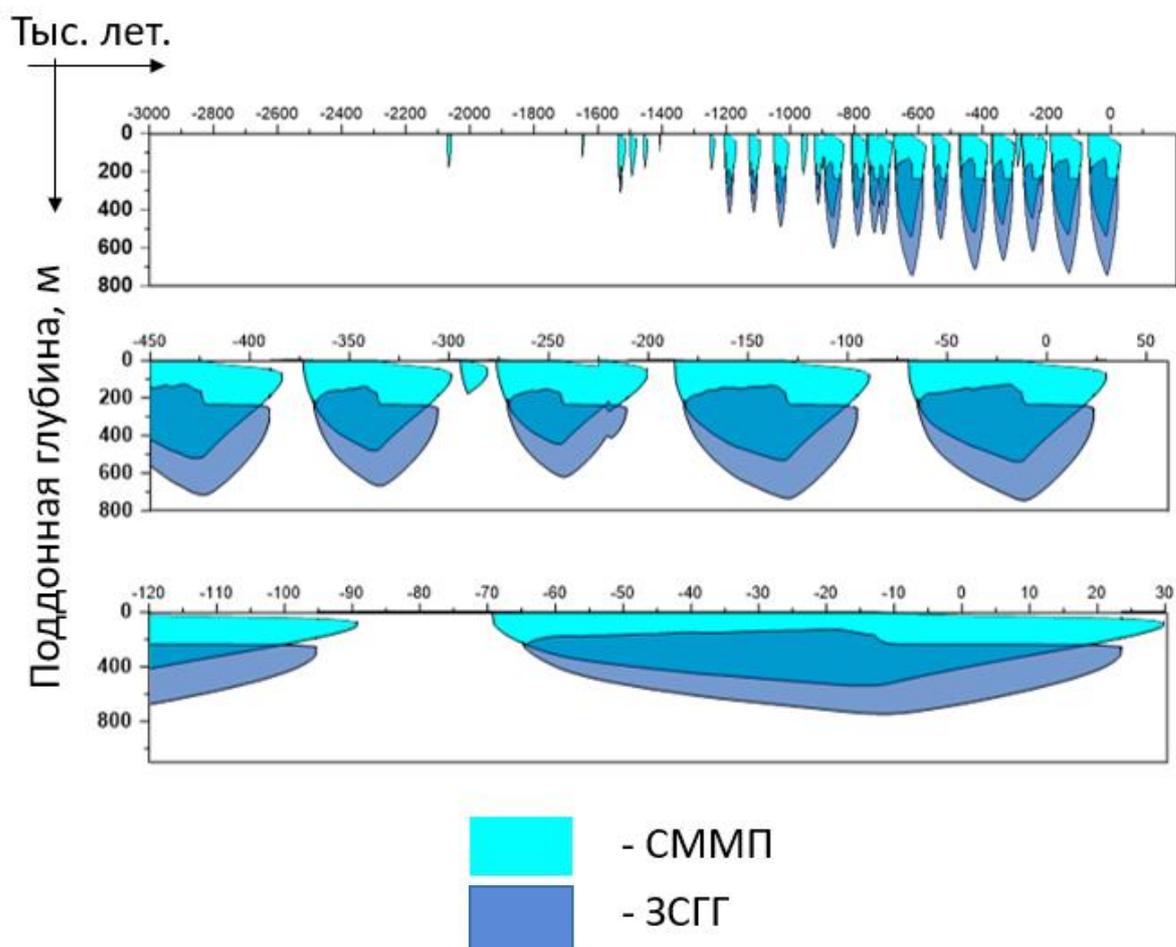


Рисунок 3.6 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины моря 50 м в сценарии T12

На 50 метрах (Рис. 3.6) вновь проявляется островная картина существования ЗСГГ и СММП. Период существования СММП составляет 100 тыс. лет, ЗСГГ – чуть менее 90 тыс. лет.

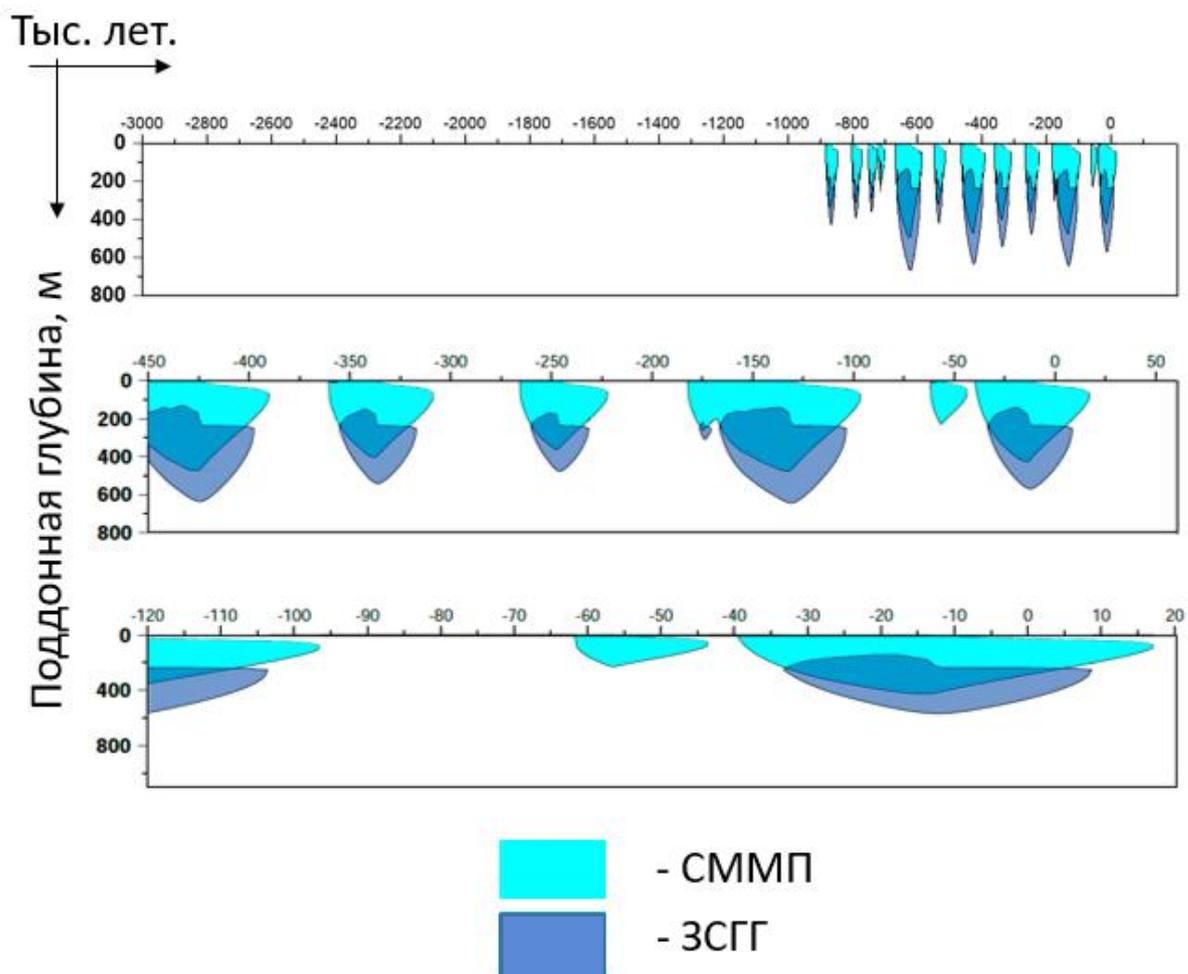


Рисунок 3.7 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины моря 70 м в сценарии T12

В отличие от сценария T0, в сценарии T12 мерзлота и СММП сохраняются также и на глубине ниже 50 метров (Рис. 3.7). Здесь мощности зон сокращаются до 400 метров, подошва ЗСГГ лежит на горизонте 500 метров. Существовать СММП при таком сценарии будет около 15 тыс. лет, ЗСГГ – 8 тыс.

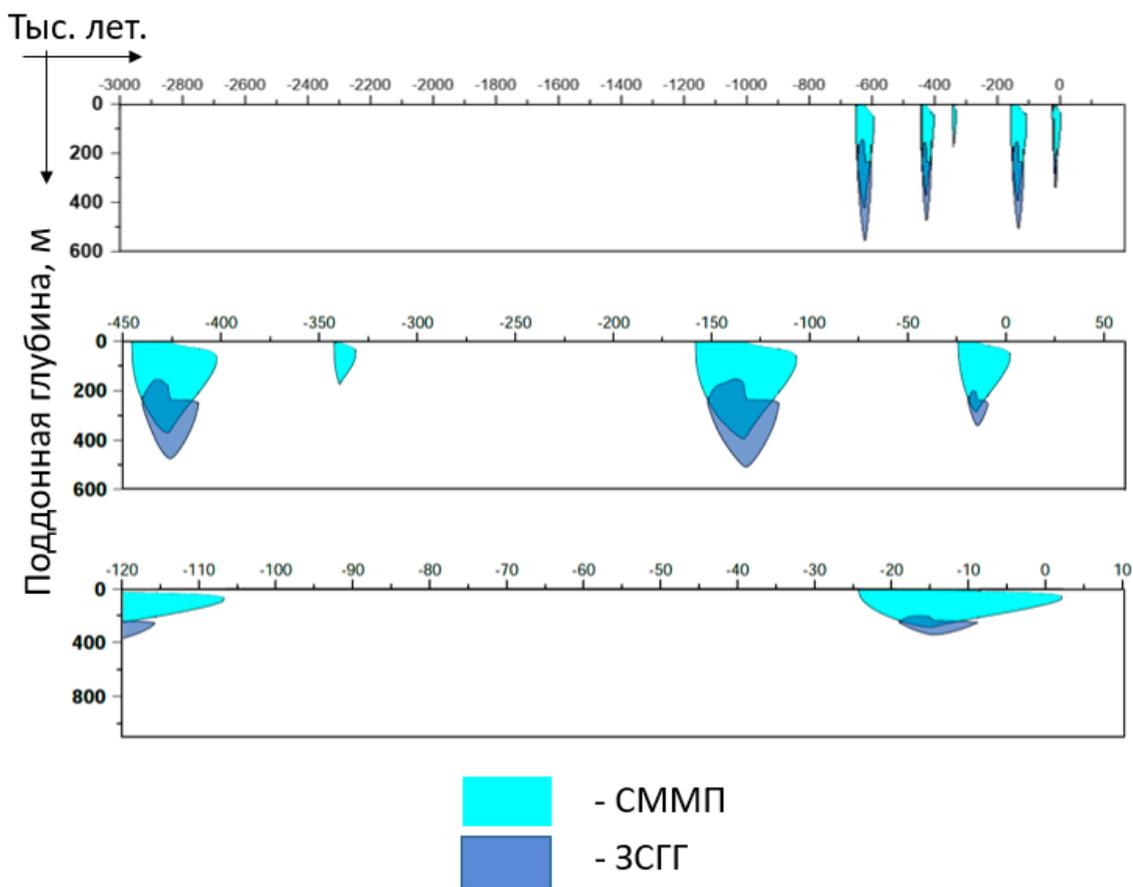


Рисунок 3.8 – эволюция ЗСГГ и СММП для глубины моря 90 метров в сценарии T12

Также приведем пример ЗСГГ и СММП для 90 метров (Рис. 3.8). Отметим, что мерзлота в настоящий момент сохраняется и на 90 метрах глубины, но ЗСГГ деградирует полностью еще к началу голоцена, имея мощность около 100 метров при последнем оледенении.

3.3 Профили СММП и ЗСГГ

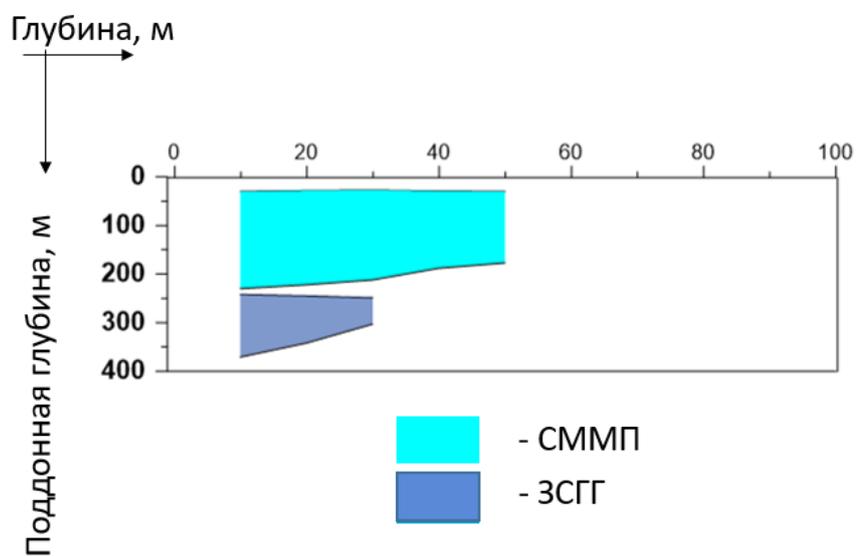


Рисунок 3.9 – профиль распространения ЗСГГ и СММП на разрезе в 0-100 метров глубины в настоящее время для сценария T0

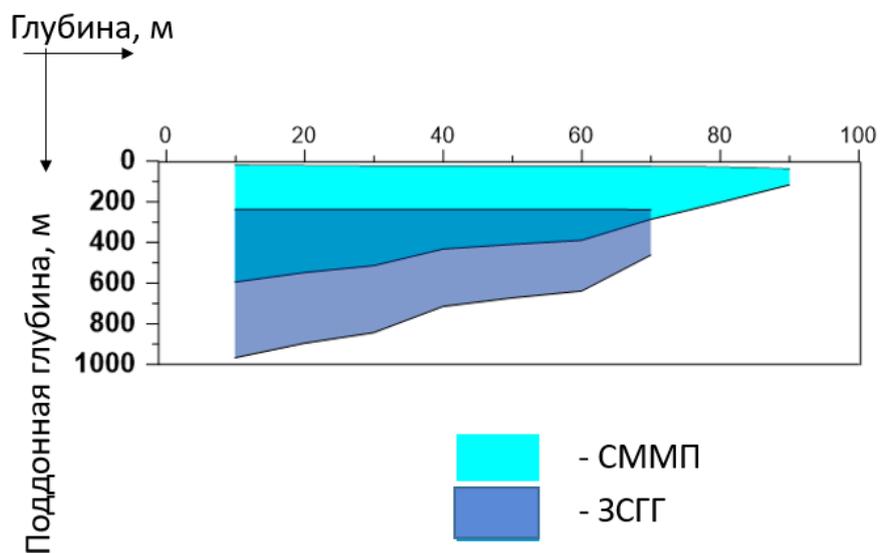


Рисунок 3.10 - профиль распространения ЗСГГ и СММП на разрезе в 0-100 метров глубины в настоящее время для сценария T12

Сравнивая профили ЗСГГ и СММП двух сценариев (Рис. 3.9, 3.10) очевидным становится колоссальная разница в пространственном распределении по глубинам. Мерзлота при исходном ряде относительных температур исчезает на 50 метрах, ЗСГГ существует до 30 метров глубины. Тогда как при температурах, близких к среднеголетним, СММП сохраняются на 90 метрах глубины, ЗСГГ – 70 метров. Логичным также является тот факт, что мощности зон уменьшаются с удалением от берега, вследствие более продолжительных субаквальных периодов.

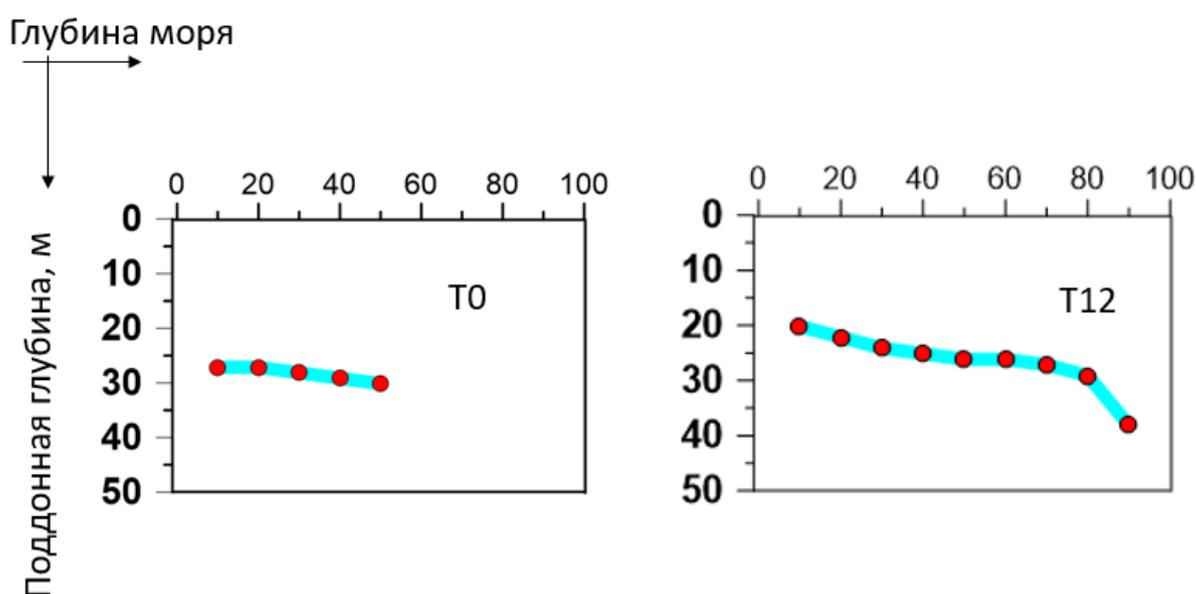


Рисунок 3.11 – Положение кровли СММП на разрезе для двух сценариев

Отдельно рассмотрим положение кровли многолетнемерзлых пород (Рис. 3.11). В обоих случаях СМПП с удалением от берега также деградирует сверху под воздействием неблагоприятного температурного режима. При этом изначально кровля мерзлоты в сценарии T0 лежит на нижних горизонтах, относительно кровли сценария T12. Кровля сценария T0 прерывается на 50 метрах, кровля сценария T12 доходит до 90 метров. При этом на 80 метрах наблюдается резкий скачок-«просадка» мощности.

3.4 Картирование СММП и ЗСГГ на шельфе моря Лаптевых

В качестве изучаемого района Северного Ледовитого океана было выбрано море Лаптевых, как уже было сказано выше. Результаты моделирования были картированы.

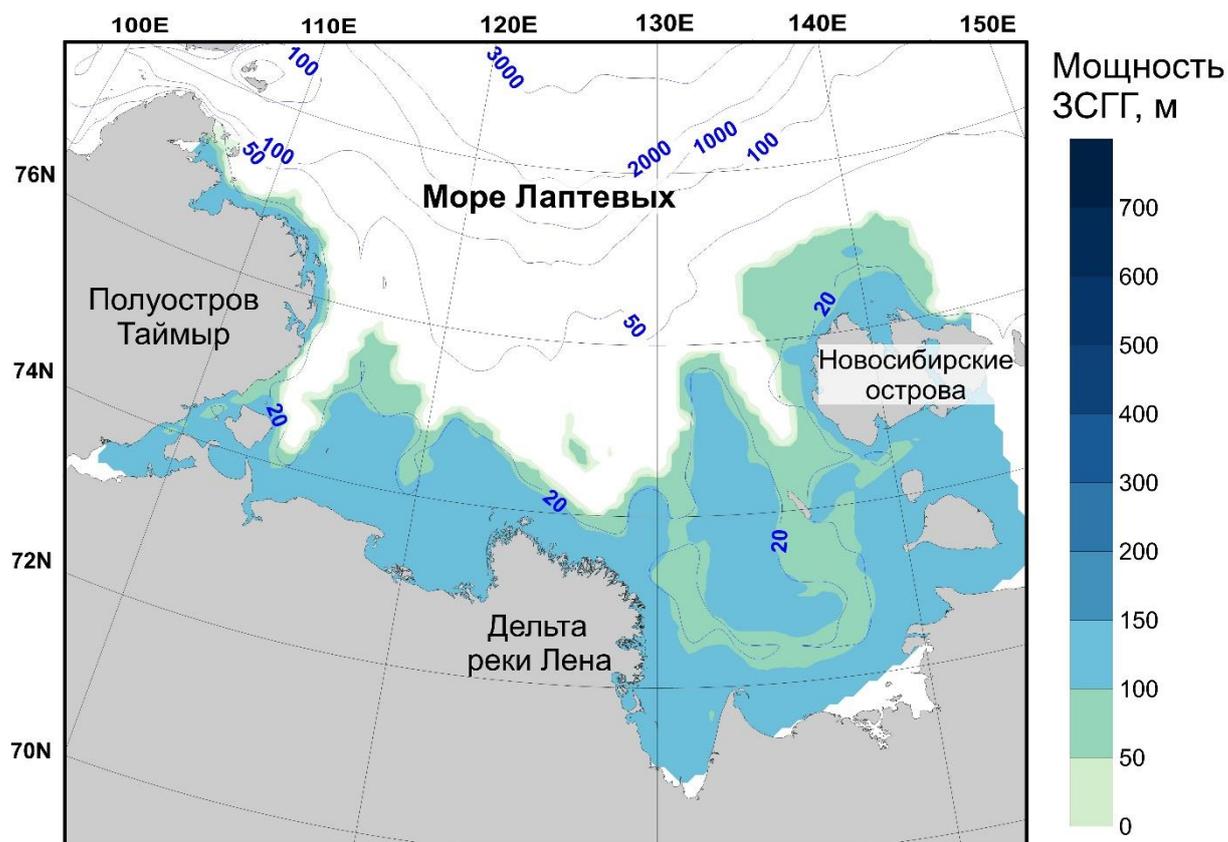


Рисунок 3.12 – результаты картирования ЗСГГ для сценария T0

Результаты моделирования для сценария T0 представлены на Рис. 3.12. Согласно расчету, максимальные мощности ЗСГГ не превышают 200 метров и ограничены изобатой 50 метров. Наибольшие мощности наблюдаются в прибрежной зоне, включая Хатангский залив, а также в районе Новосибирских островов и Василевской банки. Распространение ЗСГГ жестко привязано к батиметрии моря.

Сравнивая результаты моделирования по сценарию T0, без поправки на региональный климат с результатами аналогичных измерений, можно заключить, что значения сильно разнятся [55]. Поэтому данный вариант расчета признается некачественным по точности описания СММП и ЗСГГ.

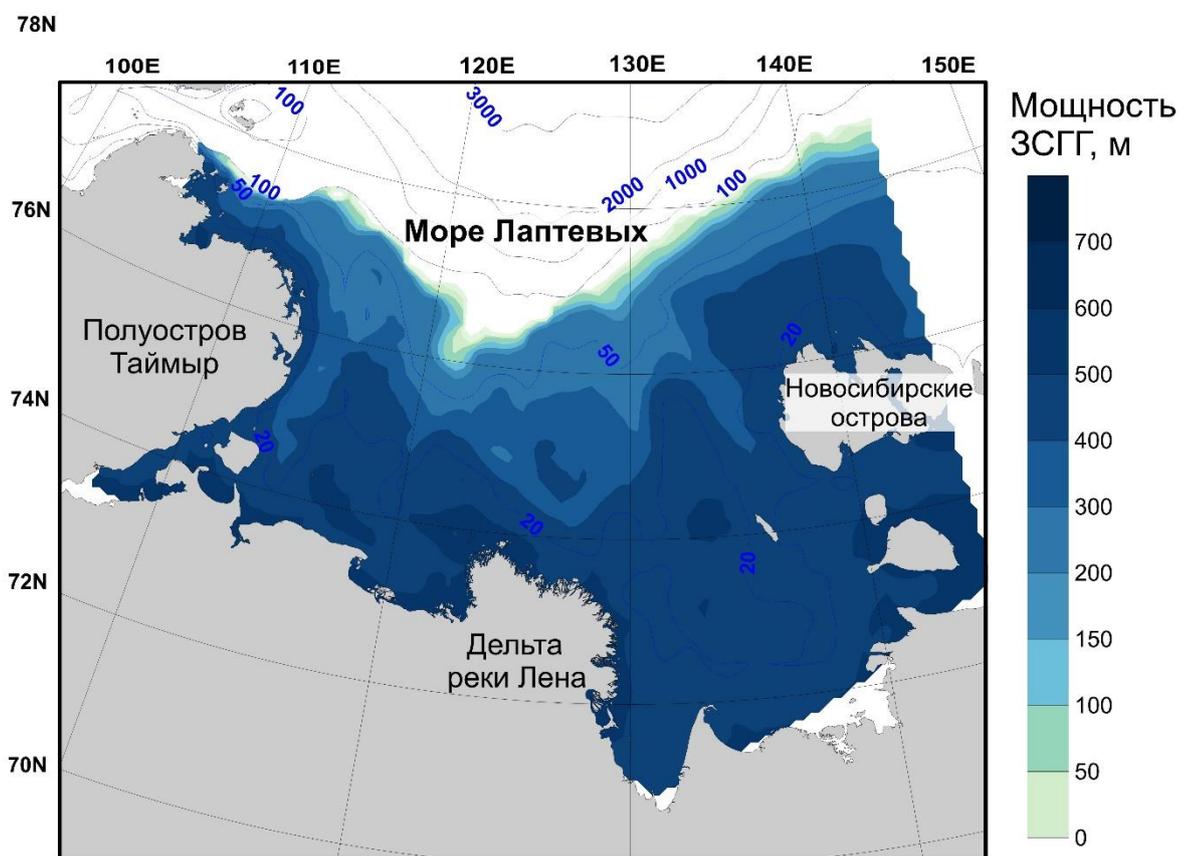


Рисунок 3.13 – результаты картирования ЗСГГ для сценария T12

Результаты моделирования для среднемноголетней температуры (Рис. 3.13) показывают гораздо большее пространственное распространение ЗСГГ на исследуемой акватории, по сравнению со сценарием T0, ввиду его мелководности и благоприятных климатических условий, а также невысоких значений теплового потока (или его недостаточной изученности). Наибольшие мощности ЗСГГ – до 1000 метров локализованы в прибрежной зоне дельты реки Лена, Хатангском заливе, вдоль северо-восточного побережья полуострова Таймыр, акватории близ острова Большой Ляховский, к востоку от острова Котельный и в районе острова столбовой на Василевской банке.

3.5 Валидация результатов расчета

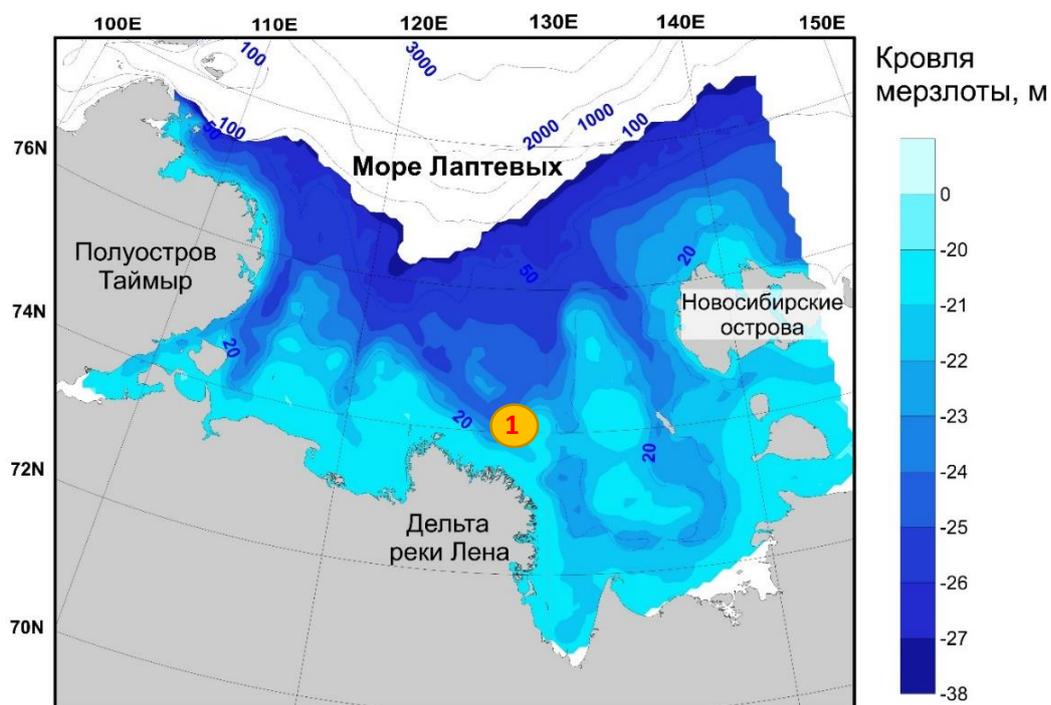


Рисунок 3.14 – результаты картирования СММП на шельфе моря Лаптевых для сценария T12

Как показал анализ карты мерзлоты и сопоставление натуральных данных данным моделирования (Рис. 3.14), решение задачи Стефана оказалось достаточно точным, результаты моделирования с поправкой на региональную температуру в целом имеют хорошую корреляцию в прибрежной материковой зоне и в акватории Новосибирских островов с натурными данными Института мерзлотоведения РАН [52], а также с материалами экспедиции Transdrift X [55].

Проверка качества расчета проводилась по натурным данным бурения СММП, показывающим положение кровли мерзлоты, исходя из отсутствия данных о положении подошвы мерзлоты или кровли/подошвы зоны стабильности газовых гидратов.

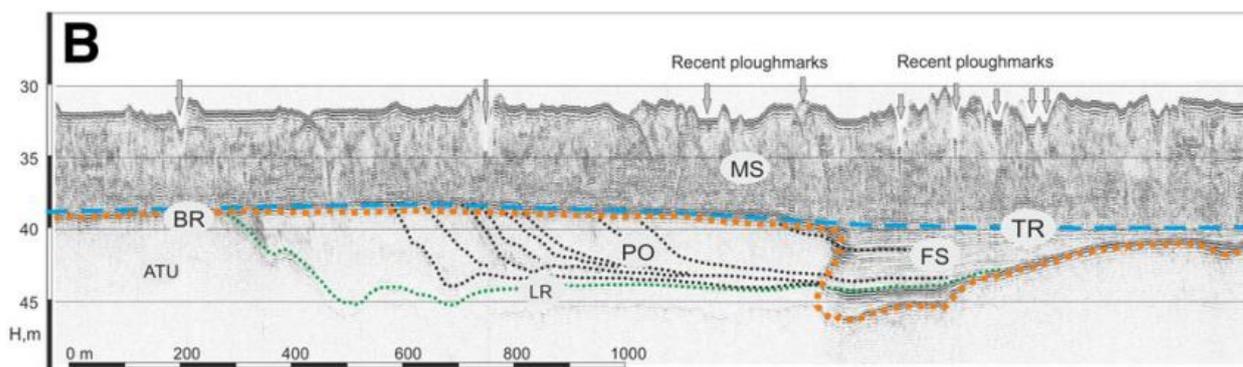


Рисунок 3.15 – результаты сейсморазведки в зоне под цифрой 1 на Рис 29 [55], оранжевым – глубина СММПИ

По данным экспедиции Tansdrift X, в ходе которой проводились сейсмоакустические исследования, к северу от дельны р. Лена, в районе обозначенном на Рис. 3.14 цифрой 1, кровля мерзлоты наблюдается на глубине 15 метров и до 20 метров ниже дна, при глубине воды 15-39 метров [55]. Что хорошо коррелирует с данными моделирования, учитывая масштаб расчета.

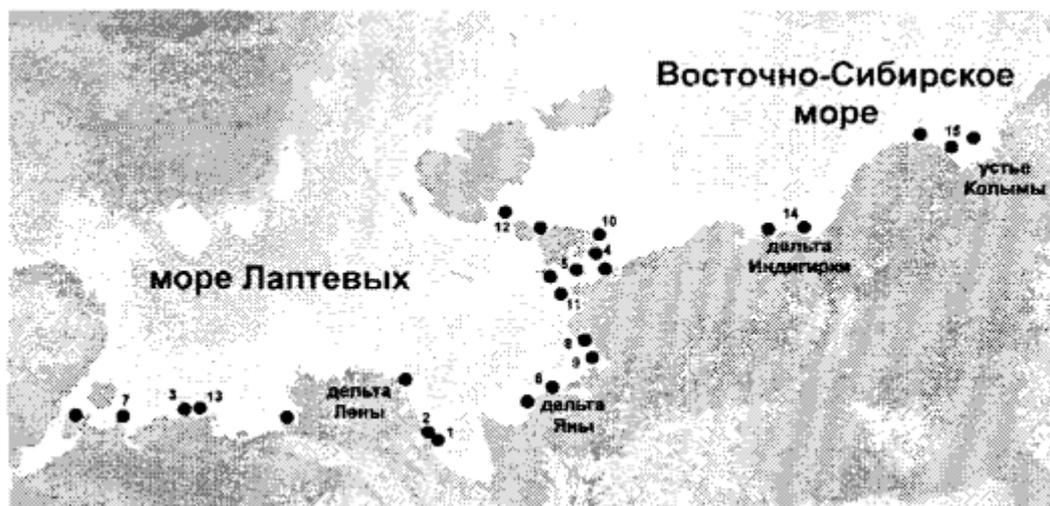


Рисунок 3.16 – схема расположения буровых профилей из [52]

По материалам Института мерзлотоведения, содержащим данные буровых профилей в прибрежной зоне (Рис. 3.16, 3.17), становится понятно, что результаты моделирования совпадают только в отдельных местах на небольших

пространственных отрезках. Так, например, в прибрежной зоне у входа в Хатангский залив в восточном проливе (станция 7 на Рис. 3.16) понижение кровли мерзлоты происходит гораздо быстрее смены изобат и при глубине около 10 метров кровля СММП находится на глубине около 25 метров ниже дна, что близко к модельным данным. Ближе к расчету находятся скважины №10 и №13, показывающие положение мерзлоты на 15-20 метров ниже дна.

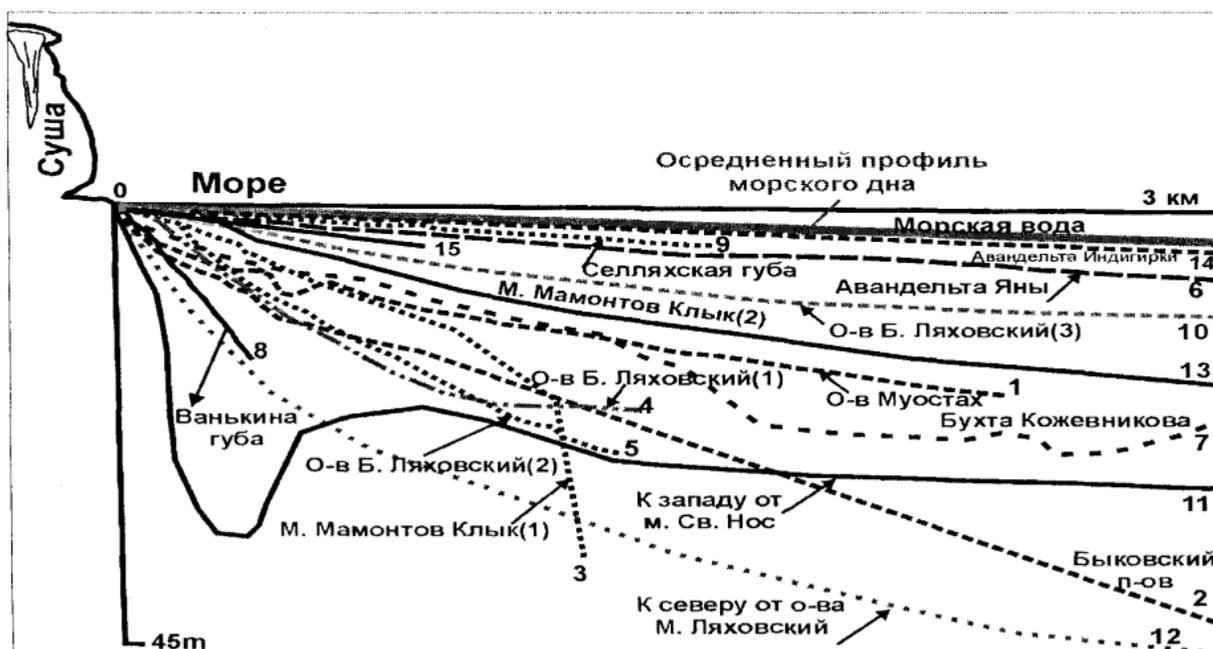


Рисунок 3.17 – положение кровли СММП по ключевым буровым профилям из [52]

Также было проведено сравнение с имеющимися работами по моделированию ЗСГГ. [55] отличается схожестью не только общих принципов расчета, но и выбранной поправки (-12°C) и значением теплового потока (60 мВт/м^2). Так, например, сравнивая Рис. 3.6, с Рис. 3.18, можно заключить, что в период расчета с 400 тыс. лет, до настоящего времени, при глубине моря 50 метров, наблюдается 4 полных эпохи оледенения, с зоной стабильности газовых гидратов, находящейся в пределах 150-800 метров имеет высокую схожесть с картиной, наблюдаемой в [55], за исключением конечной мощности ЗСГГ, в расчете [55] она составляет более километра.

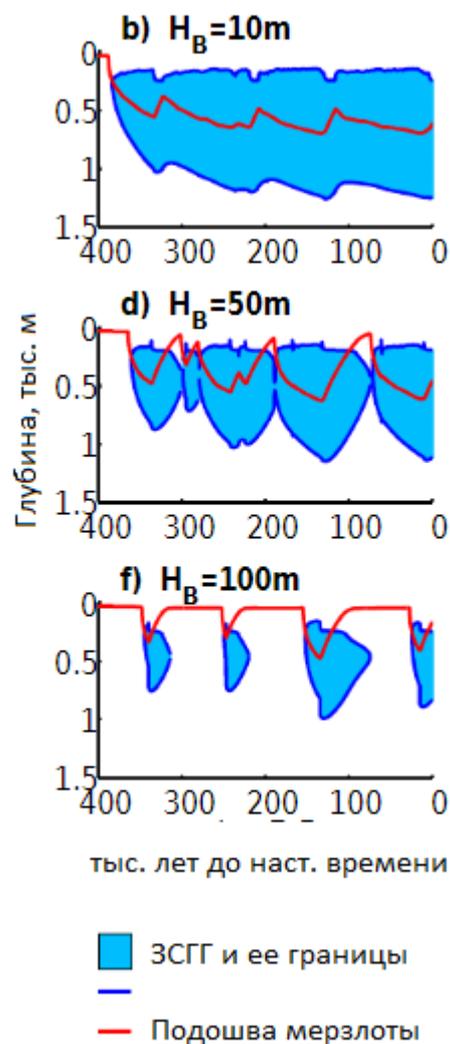


Рисунок 3.18 – результаты моделирования из работы [55], синим – ЗСГГ, красным – подошва СММП

При этом на изобате 10 метров ЗСГГ и СММП представляют из себя сплошную по времени существования, непрерывную зону с мощностью мерзлоты около 600 метров и ЗСГГ около километра, что полностью совпадает с результатами этой работы.

Заключение

Автором в работе установлено, что физико-географические характеристики моря Лаптевых, его мелководный плоский шельф, сравнительно небольшие значения теплового потока и низкие приземные температуры воздуха в эпоху регрессии моря делают его крайне перспективным в плане развития СММП, ЗСГГ и их сохранения в настоящее время.

В рамках работы была численно реализована и решена средствами языка Julia задача теплопроводности – задача Стефана. Выполнено приведение кривой палеорекострукции приземной температуры воздуха к среднемноголетней температуре воздуха, определены субаквальные и субаэральные периоды средствами языка Python, путем сопоставления кривых относительных температур и эвстатических колебаний уровня реконструкции [47].

Для достижения цели по определению границ ЗСГГ автором создана программа-робот на языке Python, позволяющая проводить быстрое построение равновесных кривых для различных условий среды. В дальнейшем данная программа использовалась во всех опубликованных работах по данной тематике, легла в основу картирования ЗСГГ во всех акваториях Российской Федерации, проводимой ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в рамках государственного задания по количественной оценке запасов газовых гидратов.

В работе выполнен ретроспективный прогноз масштаба и характера распространения зоны стабильности ГГ ассоциированных с реликтовой субмариной мерзлотой на шельфе моря Лаптевых. Приведены результаты эволюции с увеличением глубины моря и прогнозного картирования СММП и ЗСГГ, полученные по данным одномерного математического моделирования. Проведено статистическое исследование кривых верхнего граничного условия.

По результатам моделирования обширная ЗСГГ большей мощности распространена в районах со значительными отрицательными среднегодовыми

температурами (около -12°C) с прогнозом существования в несколько десятков тыс. лет. В то время как для районов со среднегодовой температурой около 0°C ЗСГГ в наши дни имеет максимальную мощность до 150 м с прогнозом на ближайшее исчезновение. По результатам валидации расчета в дальнейшем принято решение использовать региональную поправку на среднесуточную температуру во всех расчетах ЗСГГ и СММП. В результате расчета очевидной стала привязка мощности СММП и ЗСГГ к глубине моря. Влияющими характеристиками также являются величина теплового потока, солёность и региональные температуры на верхней границе. Одним из результатов работы стали проанализированные кривые-палеорекострукции длинных рядов модели [47]. Анализ показал, что основное влияние на деградацию ЗСГГ и СММП оказывает постепенное увеличение амплитуды колебаний температуры воздуха, наблюдаемое после перехода к среднему плейстоцену.

Результаты работы были опубликованы в виде тезисов Труды IX Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)" [54], дальнейшее развитие работа получила в тезисах к конференциям: VII-я Молодежная конференция «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана» [56]; Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)" [57], в сборнике тезисов X Международной научной конференции "Молодые - Научкам о Земле" [58].

Благодарности

Автор данной работы выражает благодарность коллективу Сектора нетрадиционных ресурсов углеводородов Отдела мониторинга недропользования геологоразведочных работ на нефть и газ ФГБУ «ВНИИОкеангеология». Лично – ученому секретарю, зав. сектором Матвеевой Татьяне Валерьевне, научным сотрудникам Щуру Анастасии Андреевне и Щуру Николаю Алексеевичу в помощи при постановке задачи, подборе необходимых геофизических параметров, обсуждении работы, создании условий и предоставлении всей необходимой информации.

Во-вторых, автор выражает благодарность своему научному руководителю, доценту кафедры ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ РГГМУ Чанцеву Валерию Юрьевичу за возможность реализации исследования, помощь в оформлении работы и представлении автора данной работы во ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в октябре 2020 года.

Особая благодарность выражается канд. физ.-мат. наук Гольмштоку Александру Яковлевичу за введение в предмет исследования, знакомство с явлением гидратообразования и наставления, положившие начало работе, а также доценту кафедры ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ РГГМУ Гордеевой Светлане Михайловне за организацию встречи с А. Я. Гольмштоком в феврале 2019 года.

Список используемой литературы

1. Makogon, Y. & Holditch, Stephen & Perry, K.F. & Holste, James. (2004). Gas Hydrate Deposits: Formation and Development. 10.4043/16677-MS.
2. Матвеева, Т. В. Картирование зоны стабильности газовых гидратов в акваториях морей России / Т. В. Матвеева, А. А. Семенова, А. В. Бочкарев // Труды IX Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)": Сборник, Москва, 26–30 октября 2020 года. – Москва: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. – С. 48-50. – EDN CNFUUL.
3. Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Соловьев В.А. Геология субмаринных газовых гидратов // Советская геология. 1990. № 11. С. 12-19.
4. «Газовые гидраты. Технологии воздействия на нетрадиционные углеводороды» // А. Е. Воробьев, В. П. Малюков // Российский университете дружбы народов, Москва, 2009 – с. 22-30
5. «Субмаринные газовые гидраты» // Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. // ВНИИОкеангеология, СПб, 1994 – 199 с.
6. Щур, Н. А. Методические аспекты моделирования реликтовой субаквальной мерзлоты и зоны стабильности газовых гидратов на шельфе арктических морей / Н. А. Щур, А. А. Семенова, Т. В. Матвеева // Труды IX Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)": Сборник, Москва, 26–30 октября 2020 года. – Москва: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. – С. 63-65. – EDN MOMMVM.
7. Yamamoto, Koji, Terao, Yoshihiro, Fujii, Tesuya, Ikawa, Terumichi, Seki, Makoto, Matsuzawa, Maki, and Takayuki Kanno. "Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough." Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 2014. doi: <https://doi.org/10.4043/25243-MS>

8. Фильтрогенные газовые гидраты в Черном море (21-й рейс НИС "Евпатория") / Г. Д. Гинсбург, А. Н. Кремлев, М. Н. Григорьев [и др.] // Геология и геофизика. – 1990. – Т. 31. – № 3. – С. 10-20. – EDN UZFFDB.
9. Данилов И.Д., Коновалов А.А., Власенко А.Ю. Моделирование воздействий трансгрессивно-регрессивных циклов развития Арктического шельфа на формирование залежей газовых гидратов и льдов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2001. № 5. С. 47-54
10. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д. Условия гидратоносности и потенциально газогидратоносные акватории. Западно-Арктические моря. Геология и полезные ископаемые шельфов России (атлас) / Ред. М.Н. Алексеев. М., ГЕОС, 2004.
11. Klitzke, P., Luzi-Helbing, M., Schicks, J., Casace, M., Jacquy, A. B., Sippel, J., Scheck- Wenderoth, M., Faleide, J. I. Gas Hydrate Stability Zone of the Barents Sea and Kara Sea Region // Energy Procedia, 2016, 97, pp. 302—309.
12. Т.В. Матвеева, А.А. Семёнова, Н.А. Щур, Логвина Е.А., Назарова О.В. Перспективы газогидратоносности Чукотского моря // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 387-396. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.387
13. Vadakkepuliymbatta, S., Skeie, R. B., Myhre, G., Dalsøren, S. B., Silyakova, A., Schmidbauer, N., Lund Myhre, C., and Mienert, J. Climatic impact of Arctic Ocean methane hydrate dissociation in the 21st-century // Earth Syst. Dynam. Discuss., <https://doi.org/10.5194/esd-2017-110>, 2017.
14. Богоявленский В.И., Янчевская А.С., Богоявленский И.В., Кишанков А.В. Газовые гидраты на акваториях Циркумарктического региона // Арктика: экология и экономика. 2018. № 3 (31). С. 42—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-42-55. 2018
15. Winsborrow M.C.M., Andreassen K., Corner G.D., Laberg J.S. Deglaciation of a marine-based ice sheet: Late Weichselian palaeo-ice dynamics and retreat in the southern Barents Sea reconstructed from onshore and offshore glacial geomorphology // Quaternary Science Reviews. 2010. Vol. 29. P. 424-442; <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.10.001>.

16. Bradwell T., Stoker M.S., Golledge N.R., Wilson C.K., Merritt J.W., Long D., Everest J.D., Hestvik O.B., Stevenson A.G., Hubbard A.L., Finlayson A.G., Mathers H.E. The northern sector of the last British Ice Sheet: maximum extent and demise // *Earth-Sci. Rev.* 2008. Vol. 88. P. 207-226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.01.008>.
17. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Телепнев Е.В., Михалюк Ю.Н. Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л.: ПГО "Севморгеология", 1987. 150 с.
18. Семенова, А. А. Оценка влияния факторов на эволюцию реликтовой субмаринной мерзлоты и зоны стабильности газовых гидратов на шельфе моря Лаптевых / А. А. Семенова, Т. В. Матвеева, Н. А. Щур // Труды IX Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)" : Сборник, Москва, 26–30 октября 2020 года. – Москва: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. – С. 66-69. – EDN TROOMQ.
19. «Closing the sea level budget at the Last Glacial Maximum» // P. U. Clark, L. Tarasov, *PNAS*, vol. 111, no. 45, 2014.
20. K. Fleming, P. Johnston, D. Zwartz, Y. Yokoyama, K. Lamneck, J. Chappell. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163, 327-342.
21. N.N. Romanovskii, H.-W. Hubberten, A.V. Gavrilov, A.A. Eliseeva, G.S. Tipenko. *Geo-mar. Lett.*, 2005, 25, 167-182
22. Rekant P.V., Gusev E.A. Seismic geological structure model for the sedimentary cover of the Laptev sea part of the Lomonosov Ridge and adjacent parts of the Amundsen plain and Podvodnikov Basin. *Geology and Geophysics*. 2012; T. 53. No. 11. pp. 1497-1512
23. Kirillova-Pokrovskaya T.A. Development of the actual geological model of the Laptev Sea and adjacent deepwater zones for the updated estimate of its hydrocarbon potential. *Razvedka and okhrana neдр*. 2017; Vol. 10. pp. 30-38
24. Drachev S.S., Malyshev N.A., Nikishin A.M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic shelves. *Society of Petroleum Engineers - Arctic Technology Conference 2011*; Vol.1. pp. 234-249.

25. Zakharov, V. & Kim, B. & Rogov, Mikhail. (2013). Probable distribution of Upper Jurassic and Lower Cretaceous deposits on the Laptev Sea shelf and their petroleum resource potential. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 21. 496-514. 10.1134/S0869593813050067.
26. Polyakova, Inna & Borukaev, Georgy & Sidorenko, Svetlana. (2017). Oil-gas potential of the East-Siberian sea // Потенциальная нефтегазоносность Восточно-Сибирского моря. *Geologia nefiti i gaza*. 3-10.
27. Карта мощности осадочного чехла Северного Ледовитого океана / В. А. Поселов, С. М. Жолондз, А. И. Трухалев [и др.] // Геолого-геофизические характеристики литосферы арктического региона / ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга». – Санкт-Петербург : ФГУП "ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга", 2012. – С. 8-14. – EDN VCVIMP.
28. Drachev, S.S., Johnson, G.L., Laxon, S., McAdoo, D. & Kassens, H. Main structural elements of the Eastern Russian Arctic Continental Margin derived from satellite gravity and multichannel seismic reflection data. In: *Land–Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History*, eds Kassens, H. et al., Springer, Berlin, 1999; pp. 667–682.
29. Areke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea Rift, *Mar. Geol.*, 2001; 181083–1127.
30. Rekant P., Bauch A., Schwenk T., Portnov A., Gusev E., Spiess V., Cherkashov G., Kassens H. Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea. *Arktos*. 2015; Vol. 1. pp. 1-15.
31. Factors affecting the formation and evolution of permafrost and stability zone of gas hydrates: Case study of the laptev sea / T. V. Matveeva, V. D. Kaminsky, A. A. Semenova, N. A. Shchur // *Geosciences (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 10. – No 12. – P. 1-21. – DOI 10.3390/geosciences10120504.
32. Hughes, A. L. C., Gyllencreutz, R., Lohne, Ø. S., Mangerud, J., Svendsen, J. I.: The last Eurasian ice sheets – achronological database and time-slice

reconstruction, DATED-1. *Boreas*. 2015. 45(1). DOI 10.1111/bor.12142. ISSN 0300-9483

33. Богоявленский, В. И. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых / В. И. Богоявленский, А. В. Кишанков, А. Г. Казанин // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 500. – № 1. – С. 70-76. – DOI 10.31857/S2686739721090048

34. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost-hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. 2019. V. 9. № 6. 251. 23 p.

35. Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al. Methane Seeps on the Outer Shelf of the Laptev Sea: Characteristic Features, Structural Control, and Benthic Fauna // *Geo-Marine Letters*. 2020. V. 40. P. 541–557.

36. Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V. Features of Potential Free Gas Accumulations Distribution in the Upper Part of Sedimentary Cover of the Arctic and Subarctic Seas. 9th Conference “Saint Petersburg 2020 – Converting Knowledge into Resources”. EAGE. 2020. P. 1–6.

37. Пискарев А.Л., Поселов В.А., Аветисов Г.П. и др. Арктический бассейн (геология и морфология). СПб.: ВНИИОкеангеология, 2016. 291 с.

38. Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E., Spielhagen R.F., Kassens H., Grootes P.M., Thiede J., Heinemeier J., Petryashov V.V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. *Global Planet Change*. 2001; 31:125–39. doi:10.1016/S0921-8181(01)00116-3

39. Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В., Гаврилов А.В., Елисеева А.А., Типенко Г.С., Холодов А.Л., Романовский В.Е. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене - голоцене на шельфе восточной части Евразийской Арктики // *Криосфера Земли*. 2003. Т. VII. № 4. С. 51-64

40. Romanovskii, N.N. & Hubberten, H.-W. (2006). Permafrost and gas hydrate stability zone on the laptev sea shelf (main results of ten-year Russian-German investigation). 10. 61-68.

41. Romanovskii N.N., Hubberten, H.W. Results of Permafrost Modelling of the Lowlands and Shelf of the Laptev Sea Region. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001; Vol. 12, pp. 191–202.

42. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Romanovskii N.N., Kholodov A.L., Shakhova N.E., Semiletov I.P. Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region. *Journal of Geophysical Research*. 2012; V. 117, F03028, doi:10.1029/2012JF002358.

43. Khutorskoi, M. & Podgornykh, L. & Suprunenko, O. & Kim, B. & Chernykh, Andrey. (2011). Thermotomographic Model and Oil-and-Gas Forecasting for the Sedimentary Cover of the Laptev Sea Shelf. *Doklady Earth Sciences*. 440. 10.1134/S1028334X1110014X.

44. Majorowicz, J., Safanda, J., and Osadetz, K.: Inferred gas hydrate and permafrost stability history models linked to climate change in the Beaufort-Mackenzie Basin, Arctic Canada, *Clim. Past*, 8, 667–682, <https://doi.org/10.5194/cp-8-667-2012>, 2012.

45. Гольмшток А.Я. К вопросу о роли разломообразования в формировании придонных залежей ГГ // *Вопросы геофизики (Ученые записки СПбГУ)*. 2008б. Вып. 41. С. 80–111.

46. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Михалюк Ю.Н., Телепнев Е.В., Борисов В.В., Иванов В.Л., Станищева О.Н., Яшин Д.С. Проблемы газовых гидратов в недрах Мирового океана и газогидратоносность Арктических акваторий (отчет по т.791), Приложение: Схема геотермической изученности Северного Ледовитого океана. Фонды ВНИИОкеангеология, СПб, 1984, 323 с.

47. Sloan E.D. Gas hydrates: review of physical/chemical properties // *Energy & Fuels*. 1998. Vol. 12. No 2. P. 191–196.734. B. de Boer, Lucas J. Lourens, and Roderik S.W. van de Wal. Global 5 Million Year Sea Level, Temperature, and d18Osw Reconstructions – URL:<https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/study/19564> (15.09.2020)

48. MONTHLY Diagnostic from NOAA NCEP-NCAR CDAS-1: Climate Data Assimilation System I; NCEP-NCAR Reanalysis Project – URL:

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS/.MONTHLY/.Diagnostic/> (Дата обращения 15.09.2020)

49. Модель GEBSCO
http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_Bathymetry Data (Дата обращения 18.01.2021)

50. Berends, Constantijn & De Boer, Bas & Wal, R.S.W.. (2021). Reconstructing the evolution of ice sheets, sea level, and atmospheric CO₂ during the past 3.6 million years. *Climate of the Past*. 17. 361-377. 10.5194/cp-17-361-2021

51. Щур А.А., Матвеева Т.В., Бочкарев А.В. Использование ГИС-технологий при картировании потенциально газогидратоносных акваторий // *Геология нефти и газа*. – 2021. – № 3. – С. 85–94. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-3-85-94.

52. Григорьев Михаил Николаевич Морфология и динамика преобразования подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2006. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/morfologiya-i-dinamika-preobrazovaniya-podvodnoy-merzloty-v-pribrezhno-shelfovoy-zone-morey-laptevyyh-i-vostochno-sibirskogo> (дата обращения: 14.04.2022).

53. Плас Дж. Вандер. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. — СПб.: Питер, 2018. — 576 с.: ил. — (Серия «Бестселлеры O'Reilly»).

54. Смирнов Ю.Ю., Семёнова А.А., Щур Н.А., Матвеева Т.В. Прогноз распространения ассоциированных с реликтовой мерзлотой газовых гидратов на шельфе моря Лаптевых // *Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» Том I (III): [сборник]*. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. С. 70-74

55. Malakhova, V. & Eliseev, A.. (2016). How sensitive are modeled contemporary subsea permafrost thaw and thickness of the methane clathrates stability

zone in Eurasian Arctic to assumptions on Pleistocene glacial cycles?. *Climate of the Past Discussions*. 1-12. 10.5194/cp-2016-66.

56. Смирнов, Ю. Ю. Моделирование зоны стабильности газовых гидратов в зоне подводной мерзлоты: опыт использования Python и Julia / Ю. Ю. Смирнов // VII молодежная конференция «новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и мирового океана», Санкт-Петербург, 09–11 июня 2021 года / ВНИИОкеангеология. Под редакцией Г. А. Черкашёва, Н. П. Константиновой, А. А. Сухановой. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», 2021. – С. 87-89.

57. Смирнов Ю.Ю., Щур А.А., Матвеева Т.В., Щур Н.А. Моделирование зоны стабильности криогенных газовых гидратов на арктическом шельфе России: проблемы и решения// Труды X Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)» Том III (III): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. С. 91-95.

58. Особенности численного моделирования субмаринных многолетнемерзлых пород и зоны стабильности криогенных газовых гидратов на шельфе морей российской Арктики / Смирнов Ю. Ю., Щур А. А., Щур Н. А., Матвеева Т. В., Бочкарев А. В. // Молодые - Научкам о Земле: Материалы X Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах, Москва, 31 марта – 1 апреля 2022 года / Редколлегия: В.А. Косьянов, В.Ю. Керимов, В.В. Куликов. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2022. – С. 137-141.

59. Waite W.F., Santamarina J.C., Corts D.D. et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments. *Review of Geophysics*. 2009; Vol. 47. P. RG4003.

60. Kassens H. (ed). Laptev Sea System: Expedition in 1995 // *Berichte zur Polarforschung*. 1997. Vol 248. pp. 210.

Приложение А. Исходный код программы «GHSZ_VNPIO»

Текст, содержащий исходный код программы «GHSZ_VNPIO», был удален из открытого доступа по требованию работодателя.