Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем нефти и газа Российской академии наук
(ФГБУН ИПНГ РАН)
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина»

На правах рукописи

Кишанков Алексей Владимирович

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ГАЗОНОСНОСТЬ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА АКВАТОРИЙ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

Специальность: 1.6.11 – Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
член-корреспондент РАН
Богоявленский Василий Игоревич

Москва – 2022

Оглавление

Введение 4

Глава 1. Теоретические основы исследования 12

1.1. Формирование газонасыщенных объектов в верхней части разреза 12

1.1.1. Залежи свободного газа 12

1.1.2. Многолетнемерзлые породы 14

1.1.3. Газовые гидраты 15

1.1.4. Объекты, связанные с миграцией газа 21

1.2. Изученность газоносности верхней части разреза арктических и субарктических акваторий 24

1.3. Методы изучения газоносности верхней части разреза по данным сейсморазведки МОГТ 29

1.3.1. Выделение газонасыщенных объектов по сейсмическим разрезам 29

1.3.2. Выделение многолетнемерзлых пород с возможными газовыми гидратами по сейсмограммам общего пункта взрыва 38

1.4. Актуальность исследования потенциальной газоносности верхней части разреза для выбранных регионов 40

Глава 2. Геолого-геофизические особенности строения и нефтегазоносности районов исследований 44

2.1. Море Лаптевых 44

2.2. Восточно-Сибирское море 54

2.3. Чукотское море 59

2.4. Море Бофорта 67

2.5. Берингово море 70

Глава 3. Изучение потенциальной газоносности верхней части разреза в районах исследования 75

3.1. Море Лаптевых 75
3.1.1. Анализ временных разрезов МОГТ 75
3.1.2. Результаты и обсуждение 89
3.2. Восточно-Сибирское море 96
3.2.1. Анализ временных разрезов МОГТ 96
3.2.2. Результаты и обсуждение 100
3.3. Чукотское море 103
3.3.1. Анализ временных разрезов МОГТ 103
3.3.2. Результаты и обсуждение 108
3.4. Море Бофорта 112
3.4.1. Анализ временных разрезов МОГТ 112
3.4.2. Результаты и обсуждение 115
3.5. Берингово море 118
3.5.1. Анализ временных разрезов МОГТ 118
3.5.2. Результаты и обсуждение 122
3.6. Обобщение результатов по рассмотренным акваториям 129
Глава 4. Изучение распространения потенциальных многолетнемерзлых пород и газовых гидратов в Центрально-Лаптевском районе 134
4.1. Анализ сейсмограмм общего пункта взрыва 135
4.2. Анализ придонных температур воды 141
4.3. Комплексный анализ 144
Заключение 149
Список литературы 152

Введение

Актуальность работы

Изучение процессов дегазации Земли и газоносности верхней части разреза (глубины осадочной толщи до 500-900 м) является актуальным и перспективным направлением геологоразведочных работ, направленным на повышение эффективности и безопасности поиска и освоения месторождений полезных ископаемых, особенно углеводородов. Это обусловлено рядом причин.

Небольшие газовые залежи, находящиеся у поверхности морского дна, указывают на возможность обнаружения на больших глубинах крупных месторождений углеводородов. Под действием природных факторов газ может мигрировать в субвертикальном направлении из глубоких нефтегазоматеринских толщ или сформировавшихся залежей к поверхности литосферы или гидросферы, нередко формируя в верхней части разреза самостоятельные залежи газа. В связи с этим, анализ распространения газовых залежей в верхней части разреза может быть полезен для понимания углеводородных систем, процессов генерации, миграции и аккумуляции нефти и газа и, следовательно, может помочь при поиске традиционных месторождений углеводородов.

При благоприятном сочетании геологических, технических и экономических условий, залежи верхней части разреза представляют самостоятельный интерес для разработки. Известны примеры промышленной добычи углеводородов из залежей в верхней части разреза на шельфе Нидерландов и проекта разработки месторождения Peon на шельфе Норвегии.

Исследование газоносности верхней части разреза имеет особую значимость для повышения безопасности проведения буровых работ. Вскрытие приповерхностных газонасыщенных отложений нередко сопровождается неконтролируемым выбросом газа на поверхность, что является чрезвычайно опасным явлением, неоднократно приводившим к авариям на буровых установках.

Изучение потенциальной газонасыщенности верхней части разреза и путей субвертикальной миграции газа вносит значимый вклад в проблему исследований

изменений климата на Земле. Метан является основным компонентом природного газа, выделяющегося из верхней части разреза и эмитируемого в атмосферу. Он обладает сильным парниковым эффектом, что способствует глобальному потеплению.

Акватории арктических регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока России являются слабо изученными по всем направлениям геолого-геофизических исследований, и новые результаты исследований процессов дегазации Земли и газонасыщенности верхней части разреза имеют большое научно-практическое значение.

Цель работы

Прогноз распространения субмаринных залежей свободного газа и газовых гидратов в верхней части разреза акваторий арктических регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока России и определение специфики интенсивной дегазации Земли в центральной части моря Лаптевых.

Основные задачи:

1. Анализ архивных временных разрезов, полученных в результате сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ), по акваториям морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта и Берингова для выявления потенциальных залежей свободного газа, газовых гидратов, путей миграции газа в верхней части разреза. При этом не относящееся к российскому шельфу море Бофорта также включено в анализ, ввиду непосредственной близости к изучаемым российским акваториям, общей с Чукотским морем историей геологического развития, высокой степенью геолого-геофизической изученности, что представляет интерес для сравнения с другими вышеуказанными регионами.

2. Выявление закономерностей распределения потенциально газонасыщенных объектов в верхней части разреза по глубине и горизонтальным размерам.

3. Детальный анализ сейсмических и океанологических данных по центральной части моря Лаптевых, в которой происходит интенсивная эмиссия газа в виде сипов через морское дно.

Научная новизна работы

1. На основе анализа сейсмических полей отраженных волн, представленных в виде временных разрезов сейсморазведки МОГТ, выявлены и проанализированы закономерности распространения потенциально газонасыщенных объектов в верхней части осадочного чехла. Установлена связь полученных закономерностей с особенностями геологического развития изученных регионов.

2. Впервые на акватории моря Лаптевых выделен псевдодонный отражающий горизонт BSR (bottom simulating reflector), указывающий на потенциальные газовые гидраты.

3. Детально исследован Центрально-Лаптевский район (включающий зону интенсивных сипов газа), на котором впервые выявлены зоны существования пород терригенного комплекса верхней части разреза с различными физическими свойствами, отождествляемыми с мерзлым или талым состоянием осадочной толщи, а также изучена специфика эмиссии газа в атмосферу.

Практическая значимость работы

Выявлено большое количество потенциально газонасыщенных объектов в верхней части разреза морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта и Берингова. Информация о расположении данных объектов имеет большое значение для прогноза нефтегазоносности рассмотренных регионов. Данные о распространении потенциально газонасыщенных объектов и многолетнемерзлых пород в верхней части разреза представляют важные материалы, позволяющие снижать риски опасных газовых выбросов в процессе

бурения глубоких нефтегазопоисковых скважин при планировании и проведении поисково-разведочных работ на нефть и газ на рассмотренных акваториях.

Методы исследования

- Сбор, анализ, обобщение опубликованных и фондовых геолого-геофизических материалов по изучаемым регионам;

- интерпретация сейсмических временных разрезов МОГТ в программном обеспечении (ПО) Kingdom (IHS, США);

- анализ скоростей распространения преломленных волн по сейсмограммам общего пункта взрыва в ПО RadExPro (ООО «Деко-геофизика СК», Россия);

- создание геоинформационных баз данных по распространению неоднородностей в верхней части разреза, отождествляемых с газонасыщенностью, в ПО ArcGIS (ESRI, США);

- анализ океанологических данных в ПО Ocean Data View (AWI, Германия);

- построение картографических результатов в ПО ArcGIS.

Фактический материал

В диссертации использован следующий фактический материал:

- совокупность опубликованной и фондовой геолого-геофизической информации по рассматриваемым регионам;

- сейсмические временные разрезы МОГТ АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ) по морям Лаптевых, Восточно-Сибирскому, сейсмограммы общего пункта взрыва МАГЭ по морю Лаптевых, временные разрезы МОГТ Геологической службы США (USGS) по морям Чукотскому, Бофорта, Берингову. Суммарно исследовано около 40 тыс. км сейсмопрофилей;

- океанологические данные Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) по морю Лаптевых на площади 662 тыс. км^2.

Личный вклад автора

Автор лично интерпретировал архивные сейсмические временные разрезы МОГТ по морям Лаптевых, Восточно-Сибирскому, Чукотскому, Бофорта и Берингову для выявления потенциальных залежей свободного газа, газовых гидратов, путей миграции газа в верхней части разреза, определял и анализировал закономерности распространения потенциально газонасыщенных объектов в верхней части разреза, анализировал сейсмограммы общего пункта взрыва и океанологические данные с целью прогноза распространения многолетнемерзлых пород и газовых гидратов в Центрально-Лаптевской зоне сипов газа.

Защищаемые положения

1. Для верхней части осадочной толщи морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта, Берингова установлено широкое распространение потенциально газонасыщенных объектов, в основном, с верхними границами газонасыщения на глубинах до 100-300 м от поверхности дна. При этом выявлена связь расположения верхних границ газонасыщения выделенных объектов с тектонической активностью рассмотренных регионов на поздних стадиях осадконакопления.

2. В Центрально-Лаптевской зоне интенсивных сипов газа на основе комплексного анализа данных сейсморазведки отраженными и преломленными волнами, придонных температур воды и аналитического расчета условий стабильности газовых гидратов доказано отсутствие многолетнемерзлых пород и газовых гидратов. При этом обоснован преимущественно глубинный источник газа, мигрирующего по тектоническим разломам и выходящего через морское дно.

3. На континентальном склоне моря Лаптевых впервые спрогнозировано распространение газовых гидратов на основе выделения на временных разрезах МОГТ псевдодонного отражающего горизонта BSR (bottom simulating reflector), находящегося в зоне с благоприятными термобарическими условиями для их существования. В этой части моря Лаптевых за счет установленного повышения

температуры придонных вод, произошедшего в последнее столетие в процессе потепления климата, прогнозируется активизация диссоциации газовых гидратов.

Публикации и апробация результатов работы

Результаты работы изложены в 17 опубликованных работах, в том числе в 3 статьях, входящих в базу Высшей аттестационной комиссии (ВАК), а также в 10 статьях, входящих в международные базы Scopus и Web of Science. Результаты работы также вошли в 4 ежегодных отчета по теме госзадания Института проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН) «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли».

Результаты работы также докладывались на 13 всероссийских и международных научных конференциях: XIII Международный молодежный научно-практический конгресс «Нефтегазовые горизонты» (Oil and Gas Horizons), Москва, 2021 г.; Международная научно-практическая конференция по мерзлотоведению «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике», Салехард, 2021 г.; X Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование. MARESEDU-2021», Москва 2021 г.; 23-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2021», Геленджик, 2021 г.; VII-я Молодежная конференция «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана», Санкт-Петербург, 2021 г.; IX Конференция молодых учёных «Океанологические исследования», Владивосток, 2021 г., VI Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», Москва, 2021 г.; 9-я международная геолого-геофизическая конференция Европейской ассоциации геоученых и инженеров EAGE «Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы», Санкт-Петербург, 2020 г.; IX Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование. MARESEDU-

2020», Москва, 2020 г.; Международная конференция «Арктические рубежи» (Arctic Frontiers), Тромсё, Норвегия, 2020 г.; Молодежная научная конференция-школа «Геология на окраине континента», Владивосток, 2019 г.; 1-я конференция EAGE “Морские технологии», Геленджик, 2019 г.; X Международный молодежный научно-практический конгресс «Нефтегазовые горизонты» (Oil and Gas Horizons), Москва, 2018 г.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 180 страниц, включая 75 рисунков, 1 таблицу. Библиографический список включает 267 наименований.

Благодарности

Диссертационная работа выполнена в лаборатории комплексного геолого-геофизического изучения и освоения нефтегазовых ресурсов континентального шельфа ИПНГ РАН и на кафедре геоэкологии Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю – д.т.н., член-корреспонденту РАН В.И. Богоявленскому за постоянную помощь и поддержку в работе над диссертацией. Автор также признателен за помощь научным сотрудникам ИПНГ РАН И.В. Богоявленскому, Р.А. Никонову и Т.Н. Каргиной.

Автор благодарит профессоров РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д.г.-м.н. О.В. Постникову, д.г.-м.н. С.Ф. Хафизова, д.т.н. В.Г. Аковецкого и доцента, к.п.н. Н.Е. Лобжанидзе за поддержку, ценные советы и рекомендации.

Автор особенно признателен генеральным директорам АО «МАГЭ» д.т.н. Г.С. Казанину и д.э.н., к.т.н. А.Г. Казанину за оказанное внимание, сотрудничество и предоставление исходных материалов для работы, а также

специалистам АО «МАГЭ» к.г.-м.н. С.И. Шкарубо, А.П. Демонову, В.В. Ланцеву, Г.А. Казанину, Е.А. Фоминой за оказанные консультации.

Глава 1. Теоретические основы исследования

Верхняя часть осадочного чехла характеризуется широким разнообразием объектов, связанных с накоплением и миграцией газа. Газ может накапливаться в проницаемых пластах, ограниченных флюидоупорами, растворяться в пластовой воде или при взаимодействии с ней при благоприятных термобарических условиях переходить в гидратное состояние.

У поверхности осадочного чехла за счет давления на экранирующие породы, газ может формировать бугры бучения, а при отсутствии флюидоупора или наличии проводящего разлома газ может выходить в гидро- и/или атмосферу. Также возможны мощные выбросы газа при высоком давлении на приповерхностные флюидоупоры.

Геофизические методы позволяют с различной детальностью выделять указанные объекты. Одним из важнейших методов изучения потенциальной газоносности верхней части разреза (ВЧР) является интерпретация данных сейсморазведки МОГТ, включающих временные разрезы МОГТ и первичные материалы, получаемые в виде сейсмограмм общего пункта взрыва (ОПВ) с записи отраженных и преломленных волн. Рассмотрению перечисленных выше вопросов посвящены четыре раздела данной главы.

1.1. Формирование газонасыщенных объектов в верхней части разреза

1.1.1. Залежи свободного газа

Формирование газа в ВЧР может объясняться с точки зрения разных теорий образования углеводородов (УВ) в недрах Земли. В настоящей диссертации все утверждения, заключения, выводы основываются на осадочно-миграционной теории, учитывающей многочисленные закономерности распространения месторождений УВ по всему миру и принимаемой абсолютным большинством исследователей (Вассоевич, 1974; Конторович, 1998; Tissot, Welte, 1984 и др.). Согласно осадочно-миграционной теории происхождения нефти и газа,

углеводородный газ может образовываться двумя различными способами: биогенным/бактериальным и термогенным.

Биогенный газ генерируется на стадии диагенетического преобразования осадков – на небольших глубинах при низких температурах (рисунок 1.1), под действием анаэробного разложения органического вещества (ОВ) живыми микроорганизмами (Tissot, Welte, 1984 и др.). Термогенный газ генерируется на больших глубинах при высоких давлениях и температурах, которые достигаются на поздних градациях мезокатагенеза – начале стадии апокатагенеза. Данный интервал является главной фазой газообразования, которая наступает после фазы нефтеобразования (рисунок 1.1).

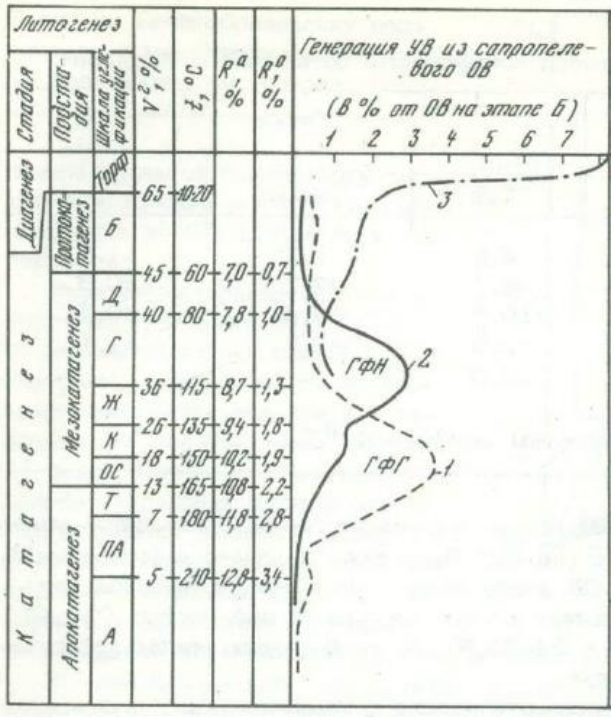


Рисунок 1.1 – Схема образования УВ в процессе катагенеза (Архипов и др., 1977). Генерация УВ: 1 – газообразных термогенных (Неручев, 1973), 2 – жидких (Вассоевич и др., 1969), 3 – газообразных биогенных (бактериальных) (Конторович, Рогозина, 1967)

Термогенный газ после генерации мигрирует к участкам геологического разреза, благоприятным для аккумуляции флюидов. Миграция может быть как

латеральной, так и вертикальной. В последнем случае газ движется по разрывным нарушениям, зонам трещиноватости и повышенной проницаемости до тех пор, пока на пути его миграции не появится ловушка – проницаемый пласт, ограниченный флюидоупором, где газ будет способен сформировать залежь. Таким образом, газ может мигрировать до ВЧР.

В ВЧР, как и на больших глубинах, ловушки УВ могут быть различных видов: структурные (пликативные и дизъюнктивные), литологические, стратиграфические. В ВЧР рассмотренных морей коллекторами являются пласты или линзы преимущественно песчаного состава. В роли покрышек могут быть глинистые слои, а также толщи, характерные для арктических регионов – многолетнемерзлые породы (ММП) и газовые гидраты (ГГ).

1.1.2. Многолетнемерзлые породы

ММП представляют собой осадочные отложения или близкие к поверхности породы кристаллического фундамента, находящиеся в условиях отрицательных температур и содержащие лед. С одной стороны, ММП могут служить флюидоупорами при миграции газа к ВЧР и морскому дну. С другой стороны, изначально немерзлые глинистые покрышки при промерзании приобретают хрупкие свойства, что может способствовать утечке газа по трещинам и разломам, образующимся за счет внутренних давлений при увеличении объема исходной породы во время ее замерзания, а также тектонических движений и сейсмических событий. ММП также могут содержать залежи газа в свободном и гидратном состояниях в не занятых льдом поровом и трещинном пространствах, а также контролировать термобарические условия в ВЧР, влияющие на фазовое состояние газа.

ММП формируются в субаэральных условиях при отрицательных температурах воздуха, они широко распространены на суше Российской Арктики, Аляски, Канады, Гренландии (Дания), Норвегии и других регионах существования криолитозоны. При воздействии температур выше температуры кристаллизации пластовых вод, что происходит при потеплении климата и/или затоплении ММП,

последние постепенно оттаивают. Данное обстоятельство важно при изучении распространения ММП на арктическом шельфе. Четвертичный период характеризуется периодическими разномасштабными оледенениями на Земле (Batchelor et al., 2019; Svendsen et al., 2004 и др.). Последнее оледенение происходило около 20 тыс. лет назад, при этом уровень моря в Арктике находился примерно на 120 м ниже, по сравнению с его современным уровнем (Collett, Dallimore, 2000). На обширных территориях суши, включая низменные прибрежные зоны, под воздействием низких температур сформировались ММП. Таяние ледника привело к трансгрессии, при этом температура у затапливаемой кровли ММП значительно возросла. Тем не менее, до сих пор многие арктические моря характеризуются придонными температурами ниже -1 °С. Такие температуры существенно замедляют оттаивание ММП, однако не останавливают данный процесс полностью (Romanovskii et al., 2005). Очевидно, что чем выше температура придонной воды (для некоторых арктических и субарктических районов характерны положительные температуры), тем быстрее мерзлота деградирует.

1.1.3. Газовые гидраты

В настоящее время запасы традиционных месторождений УВ стремительно снижаются, а спрос на энергетические ресурсы во все мире постоянно растет. В такой ситуации большое значение приобретают нетрадиционные источники УВ, наиболее известными из которых являются тяжелые нефти битуминозных песков, метан угольных пластов, ГГ. Последний вид нетрадиционных ресурсов является важным объектом исследования в настоящей диссертации.

ГГ – кристаллические соединения, образующиеся при взаимодействии газа с водой при благоприятных термобарических условиях – повышенных давлениях и пониженных температурах. В данных соединениях молекулы газа находятся в кристаллических ячейках, состоящих из молекул воды, удерживающихся водородной связью (Истомин, Якушев, 1992; Kvenvolden et al., 1993). ГГ могут формироваться и находиться в стабильном или метастабильном состояниях.

ГГ считаются высоко перспективным источником энергии. Прогнозируется, что кристаллические соединения по всему миру содержат от $2x10^{14}$ до $7,6x10^{18}$ $м^3$ газа (Макогон, 2003). К настоящему времени еще не разработаны эффективные (рентабельные) способы добычи газа из залежей гидратов. Тем не менее, многие страны, такие как Норвегия, Канада, США, Япония и другие проводят опытные работы по добыче газа из ГГ.

В России при наличии огромных запасов и ресурсов газа в традиционных месторождениях, в настоящее время вопрос разработки ГГ не относится к первостепенным проблемам нефтегазовой отрасли. Однако исследования ГГ имеют большое значение для долгосрочного планирования энергообеспечения территории страны, а также для лучшего понимания данного нетрадиционного источника энергетических ресурсов, который в будущем может стать ключевым для ряда стран, не имеющих больших запасов свободного газа и в настоящее время находящихся в энергетической зависимости от стран-экспортеров углеводородного сырья.

Часть разреза осадочного чехла, в которой могут существовать ГГ, называется зоной стабильности ГГ (ЗСГГ) (Истомин, Якушев, 1992; Kvenvolden et al., 1993). Глубинные границы ЗСГГ могут быть определены аналитически при сопоставлении температурного градиента в исследуемом регионе и равновесной кривой стабильности ГГ (рисунок 1.2). Кривая стабильности показывает давления, необходимые для существования ГГ при определенных температурах. Глубинный интервал ЗСГГ определяется по отметкам точек пересечения линии температурного градиента и кривой стабильности ГГ. На глубоководных акваториях верхняя граница ЗСГГ обычно находится выше поверхности морского дна, что указывает на возможность существования ГГ практически от дна до нижней границы стабильности.

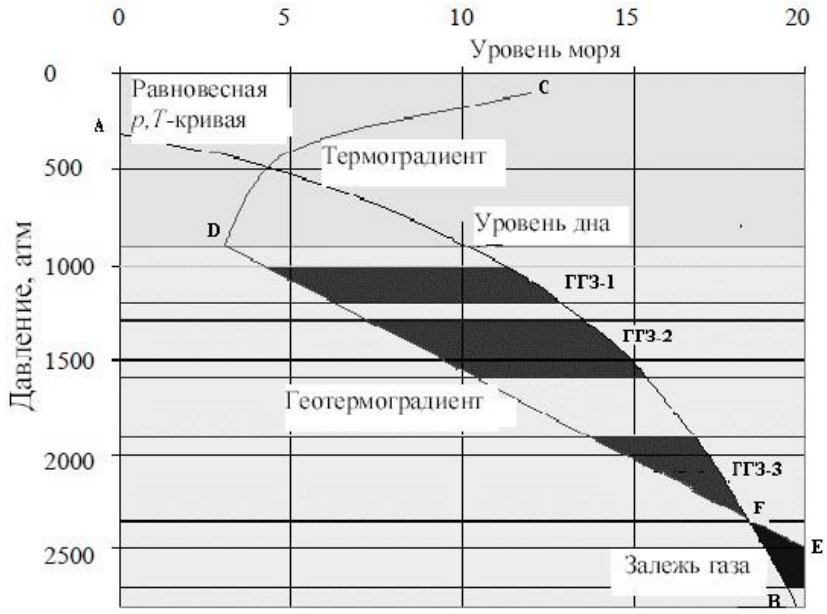


Рисунок 1.2 – Графическое изображение зоны стабильности ГГ (Макогон, 2003)

Кроме термобарических условий мощность залежей ГГ зависит от ряда других факторов, таких как интенсивность генерации и миграции УВ из недр Земли, скорость накопления ОВ, состав гидратообразующего газа, уровень газонасыщенности и минерализации пластовых вод, литологический состав приповерхностных отложений, фильтрационно-ёмкостные свойства, структура порового пространства. ЗСГГ уменьшается при повышении минерализации воды, но увеличивается при наличии тяжелых неметановых газов (Макогон, 2003).

Формирование ГГ происходит при сочетании благоприятных природных условий, отмеченных выше, которые могут существовать в различных обстановках суши и акваторий. На суше это могут быть регионы с развитием ММП или покровных оледенений, обуславливающих длительное, интенсивное охлаждение горных пород ВЧР. Распространение ГГ на суше тесно связано с распространением криолитозоны (Истомин, Якушев, 1992).

На акваториях присутствие ГГ обуславливается, главным образом, давлением водной толщи на морское дно. ЗСГГ приурочена к районам с глубиной морского дна от 200 м – для приполярных регионов и от 500-700 – для экваториальных условий (Макогон, 2003). ОВ на акваториях накапливается

преимущественно в периферических зонах океана, включающих шельф, континентальный склон. Существенно меньшее количество ОВ накапливается на абиссальных равнинах в глубоководных частях океанов. Следовательно, наиболее благоприятными обстановками существования ГГ являются области глубокого шельфа и континентального склона.

Кроме того, на северных акваториях могут существовать реликтовые ГГ (Истомин и др., 2006). Данное явление обусловлено опусканием уровня моря в ходе последнего оледенения, описанного выше. В связи с тем, что в прибрежных районах были благоприятные условия для образования ММП (субаэральное положение, низкие температуры), под толщей ММП также могли сформироваться ГГ, так как были условия для существования ЗСГГ. Позже при таянии ледников и поднятии уровня моря термобарические условия в ВЧР изменились, часть разреза непосредственно под ММП вышла из ЗСГГ.

Однако, как было отмечено выше, низкие температуры воды у морского дна (часто отрицательные) не позволяют ММП быстро деградировать. ГГ, находящиеся под или внутри ММП, вследствие отсутствия условий стабильности, должны диссоциироваться, однако выделяющаяся из ГГ вода при отрицательной температуре от сохраняющихся ММП превращается в лед, что препятствует дальнейшей диссоциации. Таким образом, ГГ под ММП могут сохраниться в законсервированном (реликтовом) состоянии. Эффект сохранения ГГ под толщами ММП при отсутствии термобарических условий стабильности ГГ называется самоконсервацией (Истомин и др., 2006; Chuvilin et al., 2018; Dallimore, Collett, 1995; Yakushev et al., 2018). В связи с тем, что ММП могут прогнозироваться в северных морях до глубин морского дна 120 м, реликтовые ГГ могут также прогнозироваться до этих глубин. Однако в действительности, как отмечено выше, далеко не на всех площадях с глубинами дна до 120 м ММП и, соответственно, ГГ могли сохраниться к настоящему времени. Таким образом, на акваториях ГГ могут находиться в областях с глубинами морского дна с высоким давлением водной толщи, а также в шельфовых зонах при наличии субаквальных ММП.

На суше ГГ были обнаружены в северных регионах России, Канады и США на Аляске, что отражено на рисунке 1.3, составленном на основе базы данных геоинформационной системы «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО»), созданной около 15 лет назад и постоянно развиваемой в ИПНГ РАН (Богоявленский, 2014a; Bogoyavlensky et al., 2018b и др.). База данных по ГГ в ГИС «АМО» составлена сотрудниками лаборатории «Шельф» ИПНГ РАН на основе многочисленных опубликованных и фондовых источников информации, а также в результате авторских исследований сотрудников ИПНГ РАН, включая автора диссертации.

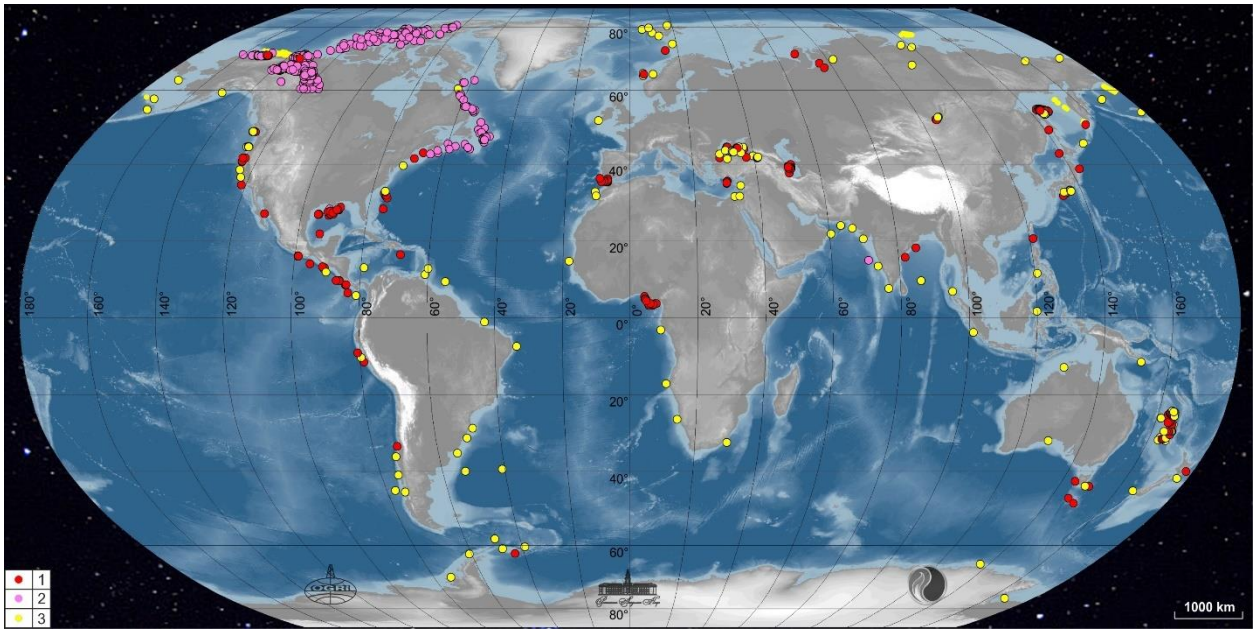


Рисунок 1.3 – Схематическая карта распространения ГГ в Мировом океане и на суше Арктики на основе данных ГИС «АМО» ИПНГ РАН (Богоявленский, 2014a; Bogoyavlensky et al., 2018b и др.). 1 – подтверждены прямыми исследованиями, 2 – прогнозируются по каротажным данным, 3 – прогнозируются по другим косвенным методам, включая сейсмические

В России наличие ГГ подтверждено на месторождениях Бованенковском и Уренгойском (Национальный …, 2017; Якушев и др., 2003). Предполагается по косвенным признакам наличие ГГ на месторождениях Мессояхском и Заполярном.

Также прогнозируется наличие ГГ на побережье Средней Сибири в устье р. Оленек, в Западной Якутии на южном краю Анабарской антеклизы, на Колымо-Индигирской низменности и на севере п-ова Чукотка.

Стоит отметить, что в России отсутствуют плановые целенаправленные исследования существования и распространения ГГ. Имеющиеся данные получены, в основном, попутно при выполнении таких работ, как поиск традиционных нефтяных и газовых залежей, инженерно-геологические, гидрогеологические изыскания и другие. В США и Канаде, напротив, проводятся специальные газогидратные исследования (Hyndman, Dallimore, 2001; U.S. …, 2018). В Северной Америке ГГ выявлены в пластах на месторождениях Прудо-Бэй, Купарук-Ривер (Северный склон Аляски, США), в добывающих скважинах Ивик, Маллик (дельта реки Маккензи, Канада), а также прогнозируются по каротажным данным и другим косвенным признакам на Канадском арктическом архипелаге (Collett, 1993; Smith, Judge, 1995).

По распространению ГГ на акваториях имеется значительно больше информации (Mienert et al., 2022). ГГ имеются в различных районах Мирового океана, их возможное существование определялось как геофизическими методами, так и прямыми исследованиями при бурении скважин, а также непосредственно на дне (рисунок 1.3). Глобальной программой бурения в Мировом океане является DSDP (Deep See Drilling Program). В рамках данной программы в начале 1970-х годов при бурении с судна Glomar Challenger на хребте Блейк Аутер в Атлантическом океане были впервые подняты образцы гидратосодержащих пород (Истомин, Якушев, 1992). ГГ в образцах керна были позже обнаружены на многих акваториях. В России субаквальные ГГ были выявлены в морях Черном и Охотском, Чукотском, а также на озере Байкал. На многих акваториях Мирового океана ГГ прогнозируются по косвенным признакам – на основе каротажных диаграмм, геофизической съемки и других исследований. Прогнозирование наличия ГГ по сейсмическим данным рассмотрено далее в диссертации.

Газ, входящий в состав ГГ, может накопиться в ЗСГГ до её образования или дополнительно после её формирования. В первом случае изначально происходит образование обычных залежей свободного газа, который может иметь как биогенный, так и термогенный генезис. Впоследствии, при изменении термобарических условий в ходе оледенения или формирования ММП, накопленные ранее залежи могут оказаться в ЗСГГ и перейти в кристаллическое состояние. Во втором случае происходит подток свободного газа к ЗСГГ, где он переходит в гидратное состояние (Истомин, Якушев, 1992). В данном случае свободный газ может мигрировать из соседних или более глубоких залежей, он также может быть как биогенным, так и термогенным.

1.1.4. Объекты, связанные с миграцией газа

При миграции газа, в случае отсутствия подходящих условий для аккумуляции, он может дойти до самой поверхности осадочного чехла и просочиться в водную толщу или также достигнуть атмосферы (Judd, Hovland, 2007; Gurevich et al., 1993a, b и др.). Место эмиссии (выхода) газа через поверхность земли или дно акватории называется сипом (англ. seep – просачиваться). Газ, выделяющийся из сипов, может мигрировать как из материнской толщи (в том числе в ВЧР), так и из уже сформированной залежи, если в ней вследствие тектонических подвижек потерял целостность флюидоупор. Образование сипов возможно и для жидких УВ. Однако, газ, вследствие своей меньшей молекулярной массы, по сравнению с нефтью, обладает большей миграционной (проницающей) способностью.

Сипы по характеру выделения газа разделяются на макросипы, соответствующие местам фокусированной разгрузки газа, и микросипы, где относительно менее интенсивная эмиссия газа рассредоточена по некоторой площади (Etiope, 2015). Поскольку вертикальная миграция газа осуществляется, в основном, по разломам и зонами трещиноватости, газовые сипы являются важным индикатором наличия разрывных нарушений в осадочном чехле. Однако также сипы могут быть приурочены к выходам на поверхность резервуаров УВ (Link,

1952), что, в частности, характерно для северной части Баренцева моря, испытавшей в кайнозое масштабную эрозию (Geological …, 2017).

Эмиссия газа может происходить в виде мощных выбросов с формированием кратеров на поверхности осадочного чехла (Богоявленский, 2014а, б, 2020, 2021). В случае, если в ВЧР образовалась залежь свободного газа, где продолжается генерация микробиального газа in situ или происходит подток газа с больших глубин (в том числе катагенетического газа), в залежи постепенно увеличивается давление, которое может перерасти в аномально высокое пластовое давление (АВПД) (Бородкин и др., 2017, 2019 и др.). Газ, оказывая давление на вмещающие породы, в том числе на покрышку, со временем может вызвать ее поднятие (пучение), с образованием в рельефе бугра (Богоявленский, 2014а, б, 2020, 2021). В дальнейшем, когда сила давления газа превышает предел прочности приповерхностных отложений, на месте бугра происходит мощный выброс/взрыв газа и образуется кратер с бруствером из выброшенной породы. В случае если выброс газа происходит на дне акватории, образующиеся кратеры именуются покмарками (Judd, Hovland, 2007). Также накопление критического количества свободного газа для прорыва перекрывающих отложений может быть связано с диссоциацией ГГ, что, в частности, предполагается для зоны гигантских кратеров, обнаруженных в Баренцевом море (Solheim, Elverhøi, 1993; Andreassen et al., 2017).

Явление выбросов газа хорошо известно для территории полуострова Ямал (Богоявленский, 2014б, 2015, 2020, 2021; Богоявленский и др., 2019, Bogoyavlensky et al., 2020, 2021а и др.). В этом регионе с распространением ММП газ скапливается под мерзлыми породами или массивами подземного льда, вызывает их пучение и впоследствии вырывается на поверхность с образованием кратеров, которые в ряде случаев заполняются водой, образуя озера. Кратеры в большинстве случаев окружены обломками выброшенных мерзлых пород – бруствером. Бугры и кратеры широко распространены на всем п-ове Ямал (Богоявленский и др., 2019, Bogoyavlensky et al., 2020, 2021а и др.).

Следует отметить, что описанные выше бугры по происхождению отличаются от многолетних бугров морозного пучения, в российской литературе называемых булгунняхами, в зарубежной – пинго (Васильчук, 2012, Mackay, 1973, 1998 и др.). Булгунняхи образуются при промерзании котловин спущенных озер (хасыреев) с таликами – оттаявшими участками ММП. Это происходит при осушении термокарстовых озер и промерзании талых вод под ними. Лед, имеющий меньшую плотность, по сравнению с водой, вызывает поднятие приповерхностных пород с образованием бугров пучения. Широко распространены и изучены пинго на п-ове Туктояктук на арктическом побережье Канады (Mackay, 1973, 1998).

Покмарки распространены на дне многих акваторий Мирового океана, впервые выделены на шельфе Шотландии (King, MacLean, 1970). Покмарки могут быть активными или «спящими» (Judd, Hovland, 2007). Из активных покмарок происходит эмиссия газа в гидросферу, в «спящих» покмарках эмиссии не происходит. Однако при накоплении критического количества газа в приповерхностных резервуарах, через такие покмарки могут произойти выбросы. На российском арктическом шельфе присутствие покмарок отмечено в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых и Чукотском (Колюбакин и др., 2016; Логвина и др., 2011; Миронюк, Семенова, 2017; Миронюк, Росляков, 2019).

Важным видом сипов, на которых возможны мощные газовые выбросы, являются грязевые вулканы. Согласно ГОСТу Р 57123-2016, «грязевым вулканом называется геологическое образование, постоянно или периодически извергающее грязевые массы и газы» (ГОСТ …, 2016). Грязевые вулканы связаны с явлением глиняного диапиризма, при котором глинистые породы, перекрытые более плотными толщами, при различных тектонических подвижках медленно перемещаются вверх по разрезу по образующимся каналам разрывных нарушений. Если глинистые толщи насыщены водой, газом, в них возникает АВПД, за счет которого газо-грязевые массы с большой силой могут вырваться на поверхность по имеющимся разломам. Грязевые вулканы существуют на суше и акваториях. Широко известны грязевые вулканы на территориях Азербайджана, Крыма, в

Каспийском море (Гулиев и др., 2005, 2020, Гулиев, Керимов, 2018; Керимов и др., 2014, 2018 и др.). В качестве примера известного морского грязевого вулкана с наличием ГГ, можно привести вулкан Хаакон Мосби в Норвежском море (Vogt et al., 1997).

В море Бофорта находятся характерные поднятия, которые именуются пингоподобными объектами (pingo-like features – PLF). Предполагается, что они формировались при потеплении климата после последнего оледенения. При трансгрессии и увеличении температуры придонных осадков происходит постепенное таяние ММП и разложение ГГ, находящихся в них и под ними. При этом оттаявшие породы ВЧР насыщаются свободным газом, становятся пластичными и при наличии в разрезе ослабленных зон, доходящих до морского дна, выпучиваются в их пределах за счет высокого давления газа, образуя бугры (Paull et al., 2007). Данный процесс схож с грязевым вулканизмом.

1.2. Изученность газоносности верхней части разреза арктических и субарктических акваторий

Исследованиям газоносности ВЧР акваторий Мирового океана посвящено большое количество работ, как в России, так и за рубежом. Акватории, для которых проводились исследования, включают Северное море (Schroot, 2003), атлантический шельф Испании (Ferrin et al., 2003), Баренцево море (Захаренко и др., 2014; Соколов и др., 2017; Andreassen et al., 1990, 2007; Vadakkepuliyambatta et al., 2013), Печорское море (Соколов и др., 2021) Чёрное море (Naudts et al., 2006), Охотское море (Богоявленский и др., 2016, Bogoyavlensky et al., 2018a), Японское море (Lee, Chough, 2002), шельф Южной Кореи (Kim et al., 2004), Южно-Китайское море (Huang et al., 2009), Атлантический океан (Мазарович, 2012; Мазарович и др., 2020; Соколов, Мазарович, 2009; Соколов и др., 2018) и другие.

Особенно важной является работа A. Judd и M. Hovland, в которой обобщаются исследования по различным акваториям (Judd, Hovland, 2007). В

данной работе подробно описаны известные разновидности газопроявлений в Мировом океане, методы их изучения, а также их влияние на окружающую среду.

Поскольку объектами исследования настоящей диссертации являются моря, расположенные в арктической и субарктической зонах, следует отдельно отметить ряд исследовательских коллективов, работающих по этим регионам. В России вопрос газоносности ВЧР северных морей изучается рядом научных организаций.

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), в частности, его подразделение – сектор нетрадиционных углеводородов – проводит исследования по ряду акваторий: Баренцево, Норвежское, Чукотское, Охотское моря (Матвеева и др., 2017; Matveeva et al., 2020 и др.). Опыт работ также включает исследования в Кадисском заливе (Северо-восточная Атлантика).

Тихоокеанский океанологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН), в частности, его подразделение – лаборатория газогеохимии – проводит экспедиционные исследования по морям Восточно-Китайскому, Южно-Китайскому, Японскому, Охотскому и Берингову (Обжиров, 2006; Обжиров и др., 2012; Шакиров и др., 2019 и др.). Результаты деятельности института включают открытия полей метана и других газов в придонном слое водной толщи, выявление закономерностей распространения ГГ, прогнозы нефтегазоносности акваторий по газогеохимическим критериям. Более 10 лет учеными ТОИ ДВО РАН проводятся изучения эмиссии метана в атмосферу со дна морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, являющейся фактором усиления парникового эффекта (Сергиенко и др., 2012; Shakhova et al., 2015, 2017, 2019 и др.).

Московский государственный университет, в частности Геологический факультет, а также связанные с университетом научные компании «Центр морских исследований МГУ» и «Центр анализа сейсмических данных МГУ» проводят комплексные инженерно-геологические исследования, включающие изучение опасных геологических процессов в ВЧР, таких как газопроявления, нарушения

стабильности морского дна, преимущественно, в арктических и субарктических морях (Миронюк, 2015; Миронюк, Семенова, 2017; Токарев и др., 2021 и др.). Кроме того, в МГУ активно изучаются особенности геологического строения и газоносности ВЧР озера Байкал (Ахманов и др., 2018).

Институт проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН), в частности, его подразделение – лаборатория комплексного геолого-геофизического изучения и освоения нефтегазовых ресурсов континентального шельфа – длительное время занимается изучением дегазации Земли во всех её проявлениях (Богоявленский, 2014а, б, 2015; Богоявленский, Богоявленский, 2018; Богоявленский и др., 2021а, б, в и др.). В результате сбора, анализа, систематизации многочисленных данных о распространении ГГ, грязевых вулканов, мест эмиссии нефти и газа, была создана и постоянно обновляется база данных ГИС «АМО» (Богоявленский, 2014а; Bogoyavlensky et al., 2018b и др.). Большое внимание уделяется вопросам дегазации на суше Арктики – на полуострове Ямал, где газовые взрывы, происходящие систематически, представляют опасность для местного населения, в основном, коренных народов, а также для объектов нефтегазовой промышленности (Богоявленский и др., 2019; Bogoyavlensky et al., 2020, 2021a и др.). Также изучается газонасыщенность ВЧР акваторий. Автор настоящей диссертации, являясь сотрудником ИПНГ РАН, внес свой непосредственный вклад в исследование газоносности арктических и субарктических морей по геофизическим данным, которое легло в основу настоящей диссертации.

Изучением ГГ в России активно занимается Сколковский институт науки и технологий, подразделение – Центр добычи углеводородов Сколтех (Skoltech Center for Hydrocarbon Recovery). Область исследований Центра включает изучение свойств горных пород и ММП, содержащих ГГ, технологий добычи газа из ГГ, геологических рисков, связанных с ГГ и ММП (Chuvilin et al., 2018, 2019 и др.).

Среди российских компаний, изучающих вопросы газоносности ВЧР следует отметить АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ) и

ОАО «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции» (АМИГЭ). Основной деятельностью МАГЭ является изучение геологического строения и перспектив нефтегазоносности акваторий Арктики и Мирового океана. Также одним из направлений работы являются инженерные изыскания – изучение ВЧР для определения возможности установки объектов нефтегазодобычи на морском дне (Казанин и др., 2017а). Для АМИГЭ инженерные изыскания для строительства морских нефтегазопоисковых скважин и нефтегазодобывающих платформ являются основной сферой деятельности (Рокос, 2008).

За рубежом имеется множество научных организаций и компаний, исследующих газопроявления в ВЧР. В качестве примера одной из ведущих организаций в данной сфере стоит привести Центр арктических газовых гидратов, окружающей среды и климата (Center for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate – CAGE), основанный в 2013 г. в Университете Тромсё – Арктическом университете Норвегии. Ученые данного центра проводят комплексные исследования процессов накопления газа в ВЧР, образования и диссоциации ГГ, эмиссии метана через морское дно, её влияния на окружающую среду (Andreassen et al., 2017; Portnov et al., 2013, 2014; Serov et al., 2015, 2017; Vadakkepuliyambatta et al., 2017 и др.). Регионами экспедиционных и аналитических исследований являются моря Баренцево, Норвежское, Гренландское. Одним из ключевых объектов исследования является подводный хребет Вестнеса, находящийся у западного побережья о-ва Западный Шпицберген, где подтверждено наличие ГГ и наблюдаются выделения метана из морского дна (Bunz et al., 2012; Knies et al., 2018 и др.).

Среди зарубежных производственных организаций стоит отметить нидерландскую компанию Fugro, выполняющую инженерно-геологические работы на суше и акваториях под строительство объектов инфраструктуры, в частности, для нефтегазовой промышленности (Fugro, 2022). Одним из видов выполняемых работ является поиск сипов УВ (Hydrocarbon seep hunting), необходимый как для

изучения геологических опасностей ВЧР, так и для лучшего понимания углеводородных систем осадочного чехла.

Также важно указать отдельных выдающихся личностей, в различное время внесших значительный вклад в изучение вопросов существования и распространения в природе ГГ – Ю.Ф. Макогона, В.А. Соловьева, Г.Д. Гинсбурга, А.А. Трофимука, В.А. Истомина, В.С. Якушева, М.С. Крайчика, K. Kvenvolden и др. Результаты фундаментальных исследований этих ученых обобщены в многочисленных публикациях, учебных пособиях (Гинсбург, Соловьев, 1994; Истомин, Якушев, 1992; Крайчик и др., 1990; Макогон, 2003; Соловьев, 2003; Трофимук и др., 1973, 1979, 1980; Якушев, 2009; Kraychik et al., 1991; Kvenvolden et al., 1993 и др.), на базе которых становится возможным проводить новые исследования и развивать накопленные знания.

К настоящему времени исследования газовых залежей ВЧР в некоторых регионах привели к возможности использовать их для коммерческой добычи УВ. Например, разработка ряда месторождений ВЧР ведется на шельфе Нидерландов (Boogaard, Hoetz, 2015). В 2007-2011 гг. в его северной части началась газодобыча на первых трех месторождениях в ВЧР и подготовлены к разработке еще пять. В период 2007-2014 гг. на них добыто более 8 млрд $м^3$ газа. В Норвежском море открыто месторождение газа Пеон, приуроченное к песчаникам плейстоцена на глубине 164 м от дна (Mikalsen, 2014), для которого подготовлен проект разработки. Кроме того, к промышленным залежам ВЧР могут быть отнесены залежи полуострова Ямал сеноманского возраста на глубинах 500-900 м, в которых сосредоточены гигантские запасы газа, которые в настоящее время находятся в разработке (например, Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение) и являются одними из важнейших эксплуатационных объектов для российской нефтегазовой промышленности (Скоробогатов и др., 2003).

Также важно отметить, что прямые исследования газоносности ВЧР сопряжены с рисками аварий. Примером опасной ситуации, возникшей при бурении, является газовый выброс, произошедший при вскрытии газовой залежи

под толщей ММП в восточной части Печорского моря, к юго-западу от пролива Карские ворота. Бурение проводилось в ходе инженерных изысканий с судна «Бавенит» АМИГЭ в 1995 году. Помимо опасности непосредственно газового выброса с самовоспламенением и взрывом, при насыщении воды газом снижается ее плотность, и в указанном случае у судна «Бавенит» произошла частичная потеря плавучести (Мельников и др., 1998; Рокос, 2008).

По причине выбросов газа из залежей в ВЧР серьезные аварии произошли на многочисленных морских буровых установках (БУ) и нефтегазодобывающих платформах: буровое судно «Petromar-5» (Южно-Китайское море, 1981 г.); мобильная БУ «Kulluk» (море Бофорта, 1989 г.); полупогружные БУ (ППБУ) «West Vanguard» (Норвежское море, 1985 г.) и «Actinia» (Южно-Китайское море, 1993 г.); самоподъемные БУ (СПБУ) «60 лет Азербайджана» (Каспийское море, 1983 г.), «Al Baz» и KS «Endeavour» (шельф Нигерии, 1989 и 2012 гг.); платформы «Steelhead» (шельф Аляски, 1987 г.), «Elgin» (Северное море, 2012 г.) и др. (Богоявленский, 2014а, 2015, 2020; Богоявленский и др., 2016; Богоявленский, Богоявленский, 2018).

Все отмеченное выше свидетельствует о том, что информацию о газонасыщенности ВЧР необходимо тщательно собирать и анализировать при планировании инженерных изысканий, геологоразведочных работ и разработки месторождений УВ.

1.3. Методы изучения газоносности верхней части разреза по данным сейсморазведки МОГТ

1.3.1. Выделение газонасыщенных объектов по сейсмическим разрезам

Итоговыми результатами сейсморазведки МОГТ являются временные и глубинные динамические разрезы в виде совокупности суммарных сейсмотрасс, построенных по графам обработки МОГТ, в том числе, включая процедуру миграции (Козлов и др., 1973). Газонасыщенные объекты в ВЧР хорошо

выделяются как аномальные объекты по данным высокоразрешающей сейсморазведки (ВРС) (Колюбакин и др., 2016), но также могут быть выявлены по стандартным материалам МОГТ, если отраженные волны в ВЧР при обработке не срезаны мьютингом.

На временных и/или глубинных динамических разрезах потенциальные залежи свободного газа (аномальные объекты – неоднородности) могут быть выделены по ряду признаков (Богоявленский и др., 2016; 2018а; 2021а; Andreassen et al., 2007; Judd, Hovland, 2007; Vadakkepuliyampatta et al., 2013 и др.):

1. Локальное повышение амплитуды отражений («яркое пятно»). При насыщении пор пласта-коллектора газом снижается его акустическая жесткость. Это приводит к тому, что на границе между флюидоупором и коллектором происходит локальное отражение с высокой амплитудой.

2. Инверсия фаз отражений (смена полярности). Если акустическая жесткость у пласта-коллектора выше, чем у перекрывающего флюидоупора, полярность сигнала волны на границе между ними прямая. Однако если коллектор содержит газ, его акустическая жесткость может стать ниже, чем у флюидоупора, и тогда полярность сигнала на границе между ними становится обратной.

3. Вертикальное смещение (прогибание) осей синфазности под аномалией. Отложения, содержащие газ, характеризуются пониженными скоростями распространения упругих колебаний. Расстояние между двумя горизонтами при пересечении газоносного пласта преодолевается волнами за более длительное время, чем при пересечении пласта той же мощности, насыщенного не газом, а водой, вследствие чего под прогнозируемыми залежами свободного газа может наблюдаться прогиб отражающих горизонтов.

4. Аномальное поглощение высоких частот упругих колебаний. При распространении упругих волн в газоносных пластах меняется амплитудно-частотный спектр в сторону снижения частот, вследствие уменьшения акустической жесткости пород.

5. Ослабление амплитуд под аномалией («зона тени», маскирующий эффект). Под пластом-коллектором, содержащим газ, может происходить потеря корреляции отражающих горизонтов, вследствие ослабления амплитуд отражений, что связано с поглощением сигнала волн при их распространении в газонасыщенных породах.

6. Наличие горизонтальных осей синфазности («плоское пятно»). Если под газовой залежью в пласте-коллекторе присутствует жидкий флюид, на разрезе может быть проявляться отражение между ними, за счет контраста их акустических жесткостей. Такой контакт является субгоризонтальным (или немного прогнутым вниз). Однако в случае маломощных пластовых резервуаров, эта граница на разрезах практически не прослеживается.

Газонасыщенность объектов в ВЧР, выделяемых по указанным признакам, подтверждается данными геофизических исследований скважин, что, в частности, отмечено в работах (Дзюбло и др., 2021а, б).

На рисунке 1.4 показаны фрагменты временных разрезов по западной части Баренцева моря с аномалиями, указывающими на потенциальные залежи свободного газа. Данные аномалии характеризуются повышенными амплитудами – яркими пятнами (bright spots), инвертированием сигнала относительно морского дна, прогибанием осей синфазности под аномалиями (pull-down), пониженными частотами, пониженными амплитудами отражений под предполагаемыми залежами – маскирующим эффектом (masking).

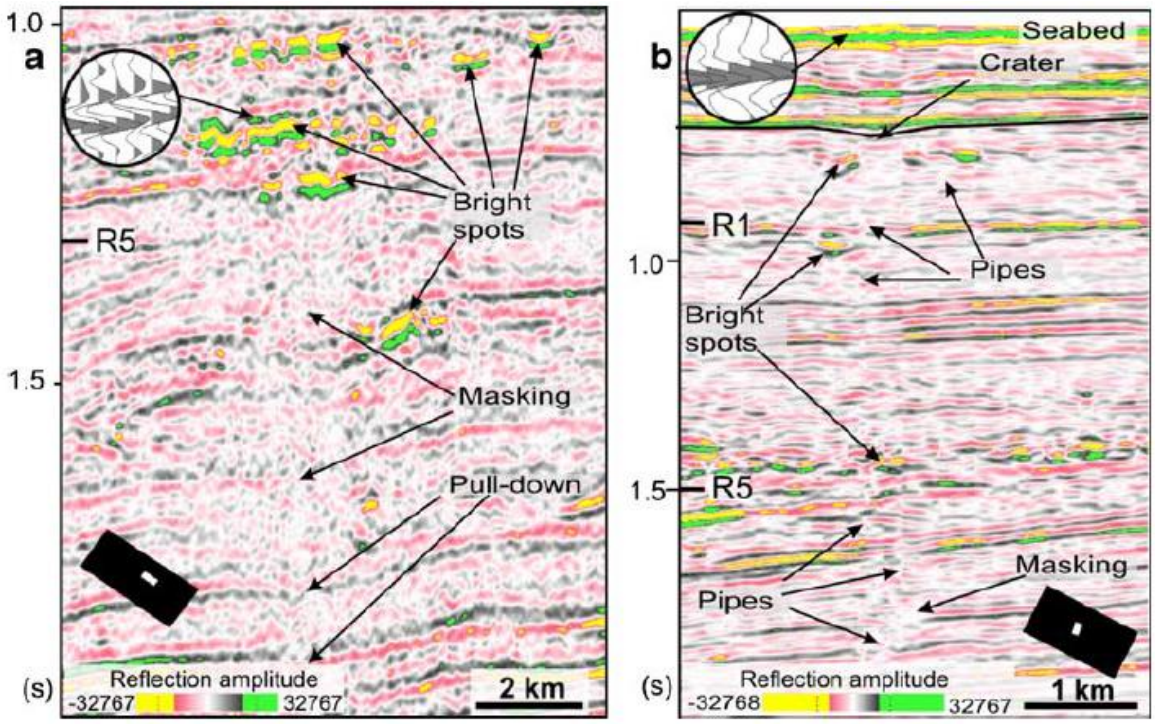


Рисунок 1.4 – Фрагменты временных разрезов с аномальными объектами (Andreassen et al., 2007)

На многих разрезах также выделяются зоны миграции газа, обычно связанные с разрывными нарушениями. В областях развития разломов могут образоваться зоны дробления и трещиноватости. Такие зоны имеют повышенную проницаемость для флюидов. Они проявляются на временных разрезах зонами ухудшения прослеживания отражающих горизонтов, хаотической формой отражений. Проницаемые субвертикальные участки разреза, по которым происходит миграция газа, называются газовыми трубами (gas chimneys). На рисунке 1.5 показано выделение газовой трубы, приуроченной к разлому, а также других признаков, указывающих на присутствие газа – прогибание осей синфазности и яркие пятна.

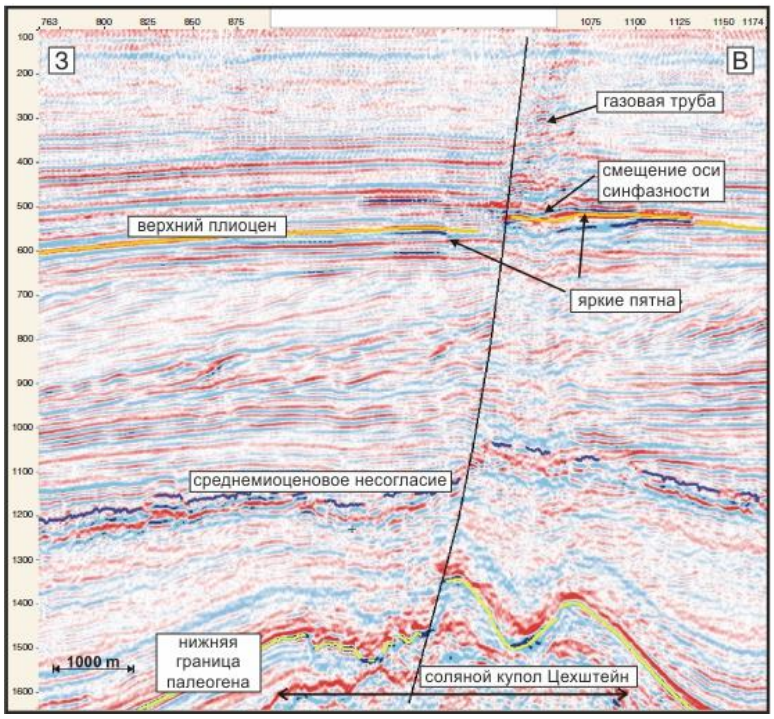


Рисунок 1.5 – Газовая труба, выделенная на временном разрезе по британскому сектору акватории Северного моря (Schroot, 2003, с дополнениями автора)

Важным признаком присутствия в ВЧР залежей ГГ является отражающий горизонт BSR (bottom simulating reflector – англ. рефлектор, повторяющий дно, или псевдодонный отражающий горизонт) (Kvenvolden et al., 1993; Shipley et al., 1979). Горизонт BSR указывает на подошву ЗСГГ, его существование связано с тем, что непосредственно под ГГ, на глубинах, где данные соединения не являются стабильными, газ накапливается в свободном состоянии (Истомин, Якушев, 1992; Kvenvolden et al., 1993). На границе между ГГ и газонасыщенными отложениями происходит резкое снижение акустической жесткости (рисунок 1.6).

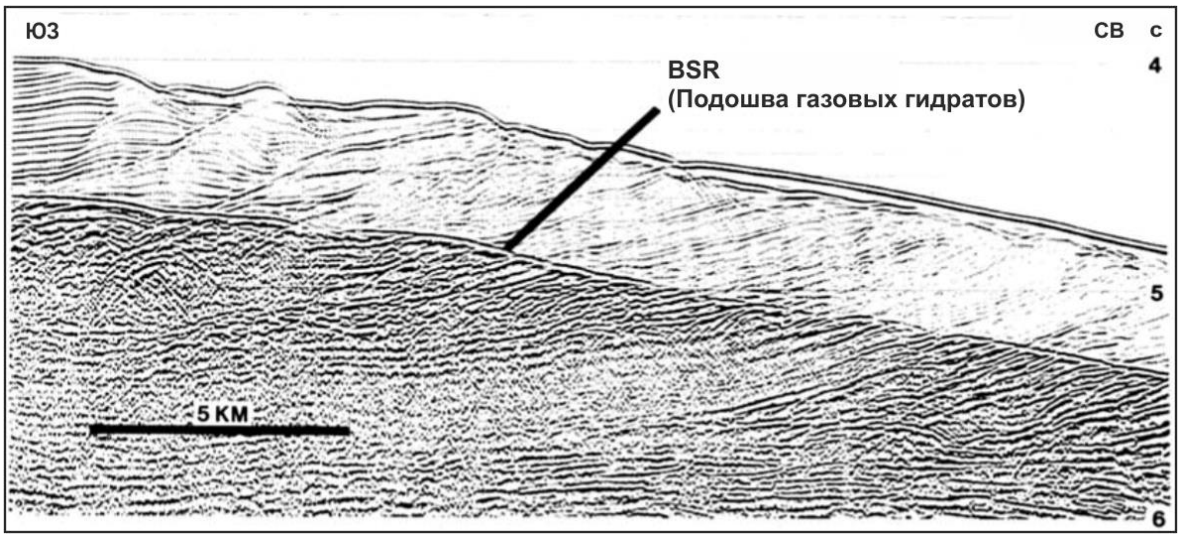


Рисунок 1.6 – Отражающий горизонт BSR на временном разрезе (Shipley et al., 1979, с дополнениями автора)

Горизонт BSR определяется по следующим признакам:

1. Субпараллельность поверхности морского дна. Данный признак обусловлен тем, что при едином геотермическом градиенте для изучаемого региона температуры увеличиваются от поверхности осадочного чехла относительно равномерно. Однако при уменьшении глубины морского дна нижняя граница ЗСГГ, и, соответственно, горизонт BSR приближаются к поверхности дна, и слой ГГ выклинивается.

2. Сечение наклонной слоистости вмещающих пород. ГГ могут формироваться независимо от особенностей напластования пород, в интервале разреза, где данные соединения являются стабильными.

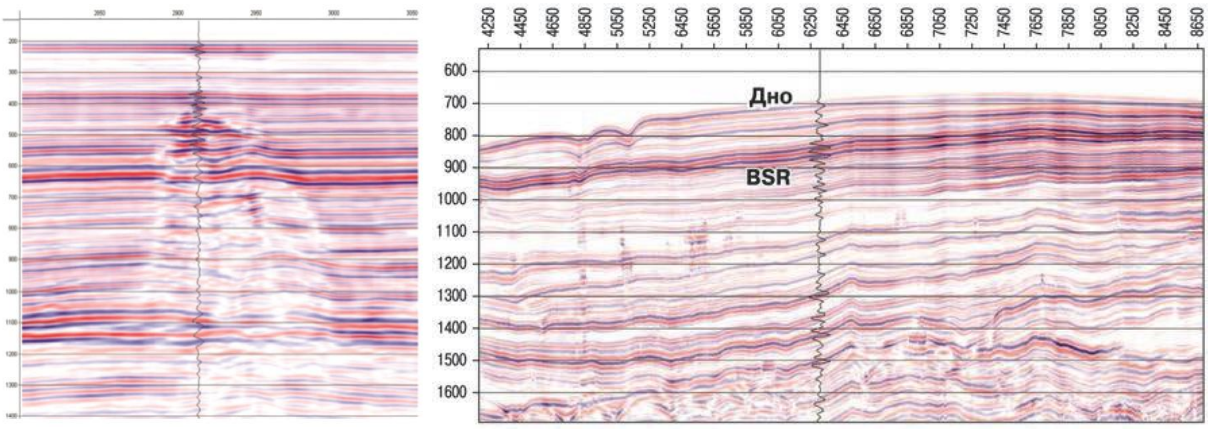
3. Обратная полярность отраженных волн. На нижней границе ЗСГГ при переходе от ГГ к газонасыщенным породам резко снижается акустическая жесткость, в связи с чем происходит инвертирование фазы сигнала отраженных волн. При сравнении полярности отражающего горизонта с границей между водной толщей и придонными отложениями можно определить, обладает ли выбранный горизонт прямой полярностью или обратной.

4. Над горизонтом BSR, как правило, наблюдается акустически прозрачная толща с ослабленными отражениями, под горизонтом – интенсивные отражения.

Это обусловлено тем, что гидратонасыщенные породы имеют относительно однородную акустическую жесткость, в то время как расположенные ниже отложения, насыщенные свободным газом, могут иметь слои с существенным различием импедансов.

Важно понимать, что горизонт BSR является лишь косвенным признаком существования ГГ и не является доказательством их однозначного присутствия. Возможны ситуации, когда над горизонтом BSR ГГ не обнаруживаются, и наоборот, когда ГГ открываются в зонах, где BSR не наблюдается (Макогон, 2003). Детальное изучение предполагаемых ГГ, выделенных на основе горизонта BSR, проводится с помощью бурения скважин, выполнения в них геофизических исследований, отбора керна, образцов ГГ, при их наличии, последующего лабораторного анализа.

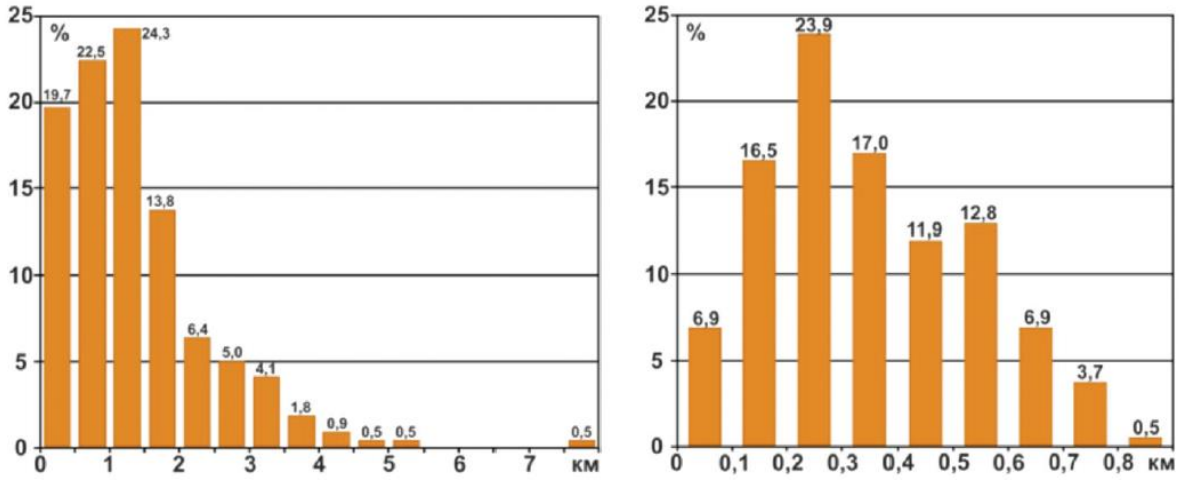
Описанные выше критерии выделения газонасыщенных объектов в ВЧР по данным сейсморазведки были успешно применены при исследования отложений Охотского моря в 2016 г. (Богоявленский и др., 2016, Bogoyavlensky et al., 2018a). Для этого исследования использовались региональные сейсмические профили общей протяженностью 4249 км и детализационные профили на Киринском лицензионном участке объемом около 3000 км, отработанные ОАО «Дальморнефтегеофизика» (ДМНГ) в 1998-2009 гг. и переобработанные в 2014 г. В ходе работы выделялись аномалии сейсмической записи, указывающие на возможные газонасыщенные объекты и ГГ по признакам, описанным выше. На рисунке 1.7а представлен один из выделенных в этой работе объектов, ассоциируемый с залежью свободного газа, характеризуемый признаками 1, 2, 3, 4 и 5, описанными выше. Всего при интерпретации региональных профилей выявлено 218 потенциально газонасыщенных объектов.



а) б)

Рисунок 1.7 – Фрагменты временных разрезов МОГТ в Охотском море с аномальным газонасыщенным объектом (а) и горизонтом BSR (б) (Богоявленский и др., 2016)

По 218 выделенным объектам была проведена оценка их распределения в ВЧР по размерам вдоль профилей и глубинам верхних границ потенциального газонасыщения относительно дна моря (в большинстве случаев нижнюю границу газонасыщения определить было сложно из-за низкой разрешенности сейсмических материалов). Для оценки глубин от уровня морского дна все аномалии были распределены в интервалы с шагом 100 м. Для оценки горизонтальных размеров вдоль соответствующих профилей аномалии были разделены по интервалам с шагом 500 м. На рисунке 1.8 приведены диаграммы, демонстрирующие модели распределения газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б). Выполненный анализ показал преимущественное распространение потенциально газонасыщенных объектов (82,1 %) на глубинах 100-600 м от морского дна. По горизонтальным размерам, большинство объектов (80,3 %) характеризуется шириной менее 2 км.



а) б)

Рисунок 1.8 – Распределение прогнозируемых газонасыщенных объектов в ВЧР Охотского моря по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б) (Богоявленский и др., 2016)

Полученное преимущественное распространение потенциально газонасыщенных объектов в широком диапазоне глубин ВЧР до 600 м от поверхности осадочного чехла может говорить о наличии на данных глубинах ряда хороших покрышек, экранирующих газовые залежи. Распределение по горизонтальным размерам может указывать на ограниченные по размерам резервуары УВ, что может быть обусловлено отсутствием протяженных ловушек и наличием разломов, по которым происходит миграция УВ.

Также на четырех временных разрезах выделен отражающий горизонт BSR (см. рисунок 1.7б), указывающий на потенциальные ГГ, причем во впадине ТИНРО он выделен впервые. Работы (Богоявленский и др., 2016; Bogoyavlensky et al., 2018a) послужили основой для последующего расширения подобных исследований на акваториях арктических и субарктических морей, выполненного в рамках настоящей диссертации.

1.3.2. Выделение многолетнемерзлых пород с возможными газовыми гидратами по сейсмограммам общего пункта взрыва

Признаком наличия ММП в ВЧР является наличие на глубинах до 400-500 м от поверхности осадочного чехла в слабо консолидированных терригенных отложениях сейсмических горизонтов с повышенными скоростями распространения упругих колебаний.

Эффективным методом обнаружения пластов с повышенными скоростями является анализ записей преломленных волн, которые обычно регистрируются в первых вступлениях сейсмограмм ОПВ (Гамбурцев и др., 1952; Епинатьева и др., 1990; Богоявленский, 1990 и др.). По годографам на сейсмограммах определяются кажущиеся скорости волн. Для горизонтально-слоистой модели среды кажущиеся скорости преломленных волн равны граничным скоростям в преломляющих горизонтах. Также это с небольшой погрешностью справедливо при малых углах наклона границы раздела (до 1-1,5°) (Brothers et al., 2012). В упрощенной модели с горизонтальной или наклонной границей двух однородных сред годограф преломленной волны прямолинеен (рисунок 1.9). Он проявляется на сейсмограмме ОПВ с начальной точки регистрации преломленных волн.

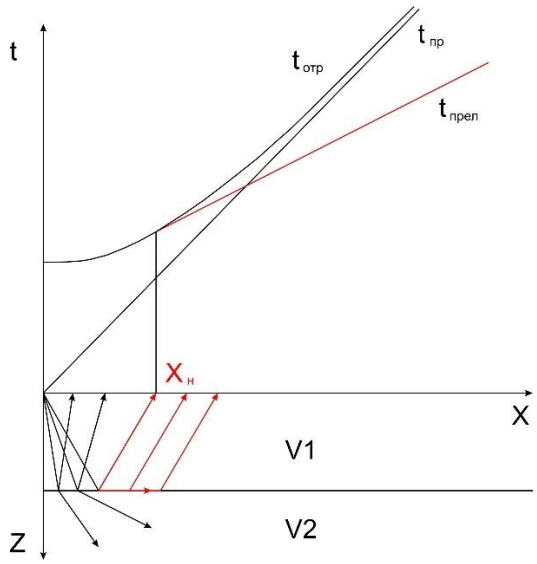


Рисунок 1.9 – Взаимоотношение годографов прямой ($t_{пр}$), отраженной ($t_{отр}$) и преломленной ($t_{прел}$) волн от горизонтальной границы между средами со скоростями V1 и V2. $X_{н}$ – начальная точка регистрации преломленных волн

В XX веке метод преломленных волн имел достаточно широкое распространение в различных модификациях на суше и акваториях для решения ряда задач, главным образом, в глубинных исследованиях (Гамбурцев и др., 1952; Епинатьева и др., 1990; Сакулина, Епинатьева, 1984; Сакулина и др., 2003; Богоявленский, 1990). Кроме того, метод преломленных волн применялся для изучения ВЧР с целью расчета статических поправок и при инженерных исследованиях (Богоявленский, 1992, 1996; Козырев и др., 2003; Спасский и др., 1985, 1987; Старобинец, Старобинец, 1983).

На шельфе Арктики МПВ применялся на разных временных этапах для изучения распространения ММП. В частности, анализ скоростей преломленных волн был осуществлен в конце XX века специалистами Геологической службы Канады (GSC) для канадского сектора моря Бофорта (MacAulay, Hunter, 1982; Marine …, 1987). На современном этапе специалисты Геологической службы США (USGS) исследовали распространение ММП в американском секторе моря Бофорта при анализе архивных сейсмопрофилей МОГТ в объеме около 5000 км, отработанных в 1977-1992 гг. (Brothers et al., 2012). На рисунке 1.10 показан пример выделения преломленных волн от кровли ММП на сейсмограммах ОПВ по морю Бофорта.

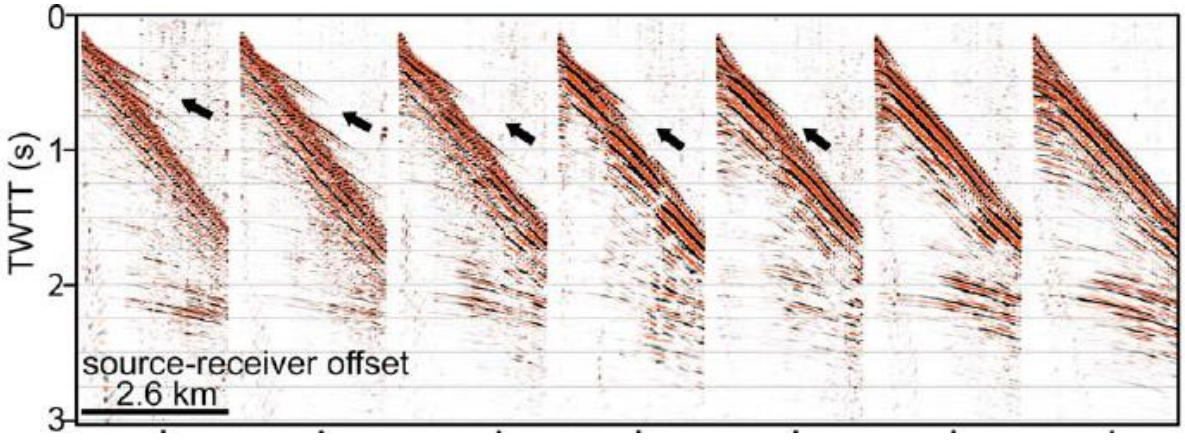


Рисунок 1.10 – Сейсмограммы по морю Бофорта (Brothers et al., 2012). Стрелками показаны выделенные преломленные волны, ассоциируемые с ММП

1.4. Актуальность исследования потенциальной газоносности верхней части разреза для выбранных регионов

Объектами исследования выбраны акватории арктических регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока России – моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Берингово и относящееся к американскому шельфу Аляски море Бофорта (рисунок 1.11). Северные акватории Восточной Сибири и Дальнего Востока к настоящему времени гораздо менее исследованы, по сравнению с другими российскими морями. В частности, в Российской Арктике высокой степенью геолого-геофизической изученности характеризуется Баренцево-Карский шельф, где пробурены глубокие скважины и открыт ряд месторождений (Лобусев, 2020; Лобусев и др., 2020; Ступакова, 2011; Ступакова и др., 2013; Супруненко и др., 2012; Stoupakova et al., 2011 и др.). Кроме того, в настоящее время ведется добыча нефти на Приразломном месторождении в Печорском море. Для морей Баренцева и Карского изучение газоносности ВЧР имеет большое значение для развития уже накопленных знаний о геологическом строении и нефтегазоносности регионов, снижения рисков газовых выбросов при дальнейших буровых и промысловых работах.

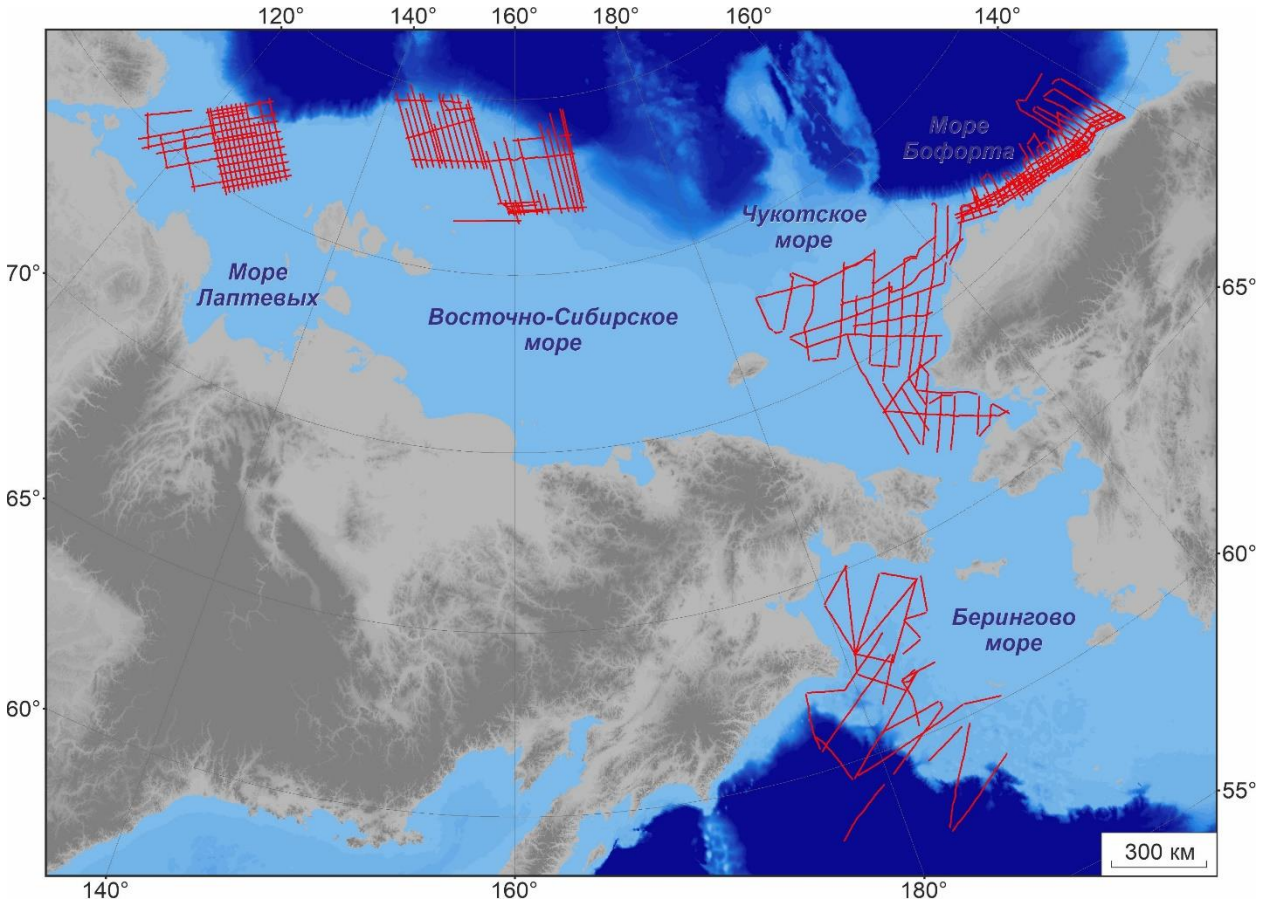


Рисунок 1.11 – Положение сейсмопрофилей, проанализированных в настоящей работе (красный цвет)

Для значительно слабее изученных северных акваторий Восточной Сибири и Дальнего Востока России, где промышленное освоение ресурсов УВ в ближайшее время не планируется, изучение потенциальной газоносности ВЧР также имеет высокую актуальность.

При отсутствии планов по освоению ресурсов на рассматриваемых акваториях в ближнесрочной перспективе, остается важным изучение их геологического строения и нефтегазоносности, так как информация об имеющихся ресурсах УВ имеет стратегическое значение для государства. Изучение потенциальной газоносности ВЧР является эффективным инструментом при поиске и разведке нефти и газа. Признаки наличия флюидов в придонных отложениях, а также разломов, смещающих отложения осадочного чехла от придонных отложений до больших глубин, позволяют делать выводы о динамике

флюидов, их возможном источнике, что может оптимизировать выбор площадей для будущего глубокого бурения с целью открытия крупных месторождений. Кроме того, анализ газонасыщенности придонных отложений способен существенно снизить вероятность опасных газовых выбросов, приводящих к аварийным ситуациям, что особенно важно в условиях высокой технологической сложности буровых работ на удаленных акваториях Восточной Арктики и Дальнего Востока и экологической ранимости данных регионов.

Ввиду слабо развитой инфраструктуры севера Восточной Сибири, исследование газоносности ВЧР может в будущем привести к созданию важного источника энергообеспечения отдаленных поселков, портов, объектов инфраструктуры на побережье. Освоение небольших залежей ВЧР в данном регионе не имеет перспектив энергообеспечения в масштабах страны и, тем более, экспорта сырья. Однако разработка залежей УВ, расположенных на малых глубинах морского дна, при благоприятных экономических условиях и появлении эффективных технологических решений может удовлетворить потребности в энергетических ресурсах находящихся рядом объектов промышленности и жизнедеятельности человека. Возможность эффективного освоения залежей ВЧР подтверждается приведенными выше примерами промышленной добычи на шельфах Нидерландов и Норвегии, отмеченными выше.

Вопрос эмиссии газа через морское дно имеет также высокую актуальность для Восточно-Сибирского арктического шельфа, в связи с его мелководностью (на 75% площади глубина моря составляет менее 50 м). При небольших морских глубинах выходящий со дна метан может не успевать полностью раствориться в гидросфере, и как следствие, попадать в атмосферу (Шахова и др., 2009; Shakhova, Semiletov, 2009; Shakhova et al., 2017, 2019). Попадающий в атмосферу метан нарушает баланс газов и способен в значительной степени усиливать парниковый эффект, что является фактором глобального потепления (Giustiniani et al., 2013; Henriet, Mienert, 1998; Judd et al., 2002 и др.).

Важным является установление генезиса эмиссии газа, происходящей на Восточно-Арктическом шельфе в настоящее время. Газ может выделяться за счет разложения ГГ, образовавшихся при промерзании ВЧР во время последнего оледенения и оказавшихся в условиях повышенных температур при постледниковой трансгрессии. В таком случае глобальное потепление может усиливать процесс эмиссии газа вследствие продолжающейся диссоциации ГГ (Сергиенко и др., 2012; Shakhova et al., 2017, 2019 и др.). С другой стороны, если в районах эмиссии газа уже не имеется ГГ, в связи с завершившимися процессами диссоциации, то современное потепление климата не должно влиять на интенсивную дегазацию Земли в данном регионе, и процесс газовой эмиссии можно считать результатом вертикальной миграции газа по разломам из сформировавшихся залежей осадочного чехла к морскому дну.

Таким образом, по ряду причин, описанных выше, изучение потенциальной газоносности ВЧР имеет высокое значение для исследования северных акваторий Восточной Сибири и Дальнего Востока России.

Глава 2. Геолого-геофизические особенности строения и нефтегазоносности районов исследований

Основными районами исследований в рамках данной работы являются акватории Арктики, включая моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и Бофорта, и северной части Тихого океана в пределах акватории Берингова моря. Эти районы характеризуются различной геологической эволюцией, возрастом осадочного чехла, перспективами нефтегазоносности. Данные особенности необходимо понимать при изучении потенциальной газоносности ВЧР по сейсмическим данным для корректной интерпретации получаемых результатов. Этим вопросам посвящены пять разделов данной главы.

2.1. Море Лаптевых

Море Лаптевых является одним их окраинных морей Северного Ледовитого океана. На западе граничит с Карским морем (по островам Северная Земля), на востоке – с Восточно-Сибирским морем (по Новосибирским островам), на юге – с побережьем Сибири, на севере граница моря условна и проходит по глубоководной части Северного Ледовитого океана (Атлас …, 1985; Деев, 2010; Национальный …, 2017; рисунок 2.1). Площадь моря Лаптевых составляет около 662 тыс. кв. км. Море на большей площади мелководное, в северной части на континентальном склоне его глубина резко возрастает. Максимальная глубина моря составляет 3385 м.

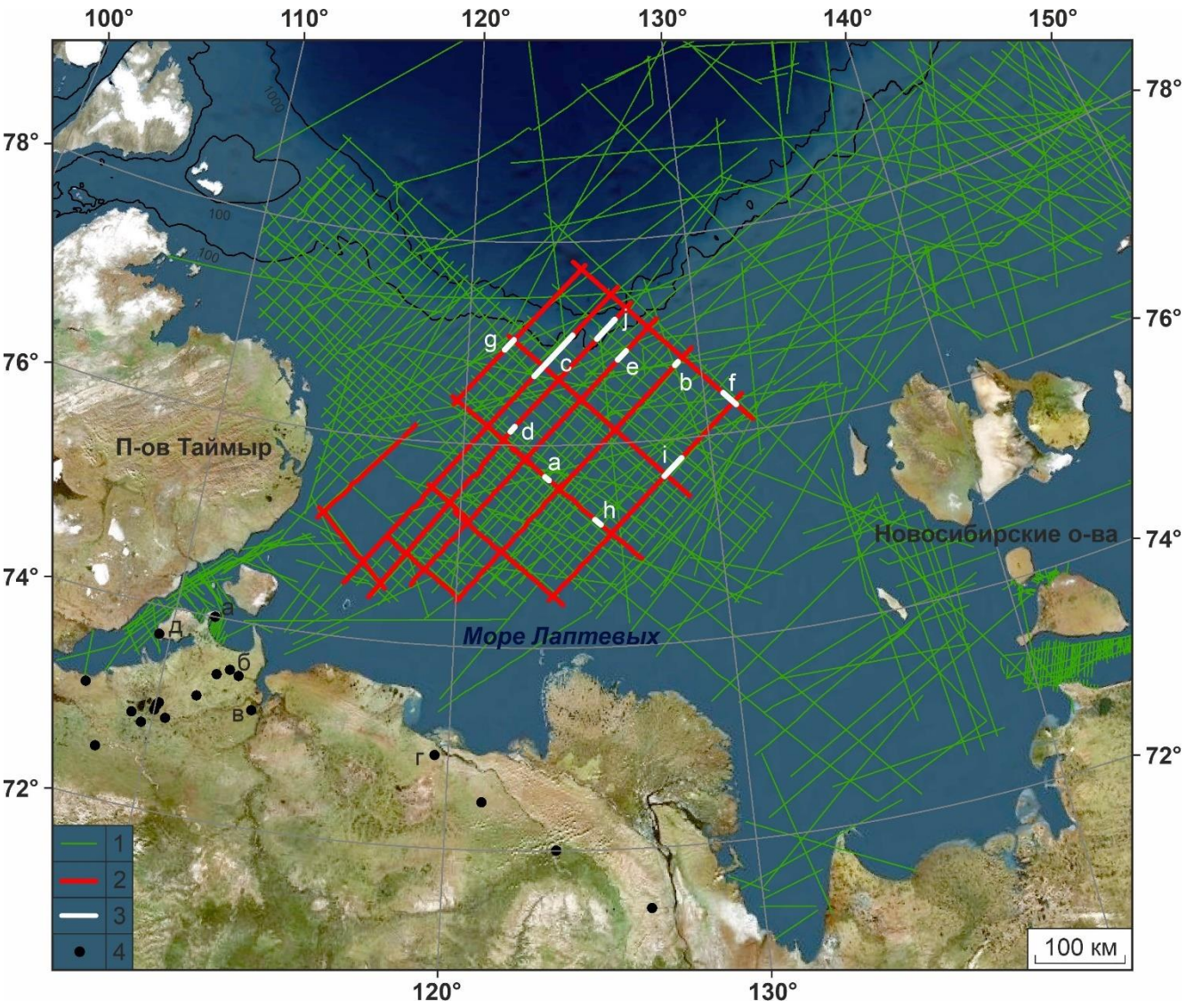


Рисунок 2.1 – Схема изученности акватории моря Лаптевых. Обозначения: 1 – сейсмопрофили МОГТ; 2 – сейсмопрофили МОГТ МАГЭ, проанализированные на первом этапе исследования; 3 – участки сейсмопрофилей, приведенные на рисунках 3.1-3.9; 4 – прибрежные скважины (а – Нордвикская, б – Гуримисские, в – Восточная, г – Усть-Оленекская, д – Центрально-Ольгинская-1). Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Береговая линия сильно изрезана, образует многочисленные заливы и бухты. Значительно расчленены восточные берега островов Северной Земли и полуострова Таймыр. Западное побережье Новосибирских островов изрезано в меньшей степени. В пределах моря Лаптевых находится несколько десятков островов. В море впадает множество рек – Лена, Яна, Хатанга, Оленёк, Анабар и

другие, обеспечивая значительное опреснение прибрежных морских вод и сток минерального и органического веществ.

Климат на акватории моря арктический. Температура воздуха в январе опускается до -34 °С, в июле поднимается до 0-4 °С. Температура приповерхностной воды летом составляет от -1 до 4 °С, зимой – от -1,8 до -1 °С. Глубже 15-20 м температура воды принимает отрицательные значения. Однако на глубинах 100-300 м на континентальном склоне температура становится положительной, в связи с согревающим влиянием атлантических вод. Ледяной покров держится от 7-8 месяцев на юге до 9-11 месяцев на севере, но в теплые годы в конце августа – начале сентября акватория становится полностью свободной ото льда.

Геолого-геофизическая изученность моря Лаптевых преимущественно основана на результатах трех этапов сейсморазведочных работ МОГТ. На первом этапе во времена СССР в 1986-1990 гг. проводились работы МОГТ с кратностью 12-48 – МАГЭ ПГО «Севморгеология», в 1989 и 1991 гг. – трестом «Севморнефтегеофизика» (СМНГ), в 1989 г. – Лабораторией региональной геодинамики (ЛАРГЕ). На втором этапе (1993, 1994 и 1997 гг.) трестом СМНГ совместно с Федеральным институтом геолого-геофизических исследований и природных ресурсов Германии (BGR) проводилась сейсморазведка с кратностью от 48 до 240. По первым двум этапам общий объем данных МОГТ составил около 30 тыс. км сейсмопрофилей, имеющих неравномерное расположение и различное качество материалов. На третьем этапе (2005-2012 гг.) проводились работы по госконтракту МАГЭ с кратностью до 120 в объеме около 16,6 тыс. км.

На акватории моря Лаптевых отсутствуют пробуренные глубокие скважины, однако на побережье в окрестностях Хатангского залива открыты небольшие нефтяные месторождения, в частности, Нордвикское (рис. 2.1, а). К востоку от месторождений возле побережья находятся скважины Гуримисские, Восточная, Усть-Оленекская (рис. 2.1, б, в, г) и другие. В 2017 г. компанией «НК Роснефть» при бурении горизонтальной скважины Центрально-Ольгинская-1 в Хатангском

заливе с побережья полуострова Хара-Тумус было открыто нефтяное месторождение (рис. 2.1, д). В рамках международной программы по бурению в океанах IODP (Integrated Ocean Drilling Program) в ходе экспедиции ACEX-302 (Arctic Coring Expedition) бурение проведено в приполюсной части хребта Ломоносова. Пробуренные неглубокие скважины, вскрыли отложения кайнозоя (Backman et al., 2008). Также важным источником геологических данных при изучении моря Лаптевых являются результаты исследований берегового обрамления шельфа и Новосибирских островов по естественным обнажениям и картировочным скважинам (Косько и др., 2013).

Необходимо отметить, что на акватории моря Лаптевых имеются неглубокие скважины, вскрывающие придонные отложения, включая ММП. Скважины бурились в восточной части моря в 1993, 1994 и 2000 гг. в ходе совместных российско-немецких экспедиций (Kassens et al., 1994, 2001), а также у южного берега в заливе Буор-Хая в 2011, 2012 и 2014 гг. (Ульянцев и др., 2016; Кошурников и др., 2016; Overduin et al., 2015), в районе между дельтами рек Оленек и Анабар в 2005 г. (Overduin, 2007), в районе Новосибирских островов (Соловьев и др., 1987).

В связи с отсутствием на акватории глубоких скважин, фактически не имеется четкой информации о геологическом строении осадочной толщи и фундамента моря Лаптевых. Однако на основе накопленных материалов геофизических исследований, данных по соседним структурам, а также представлений об эволюции региона, существуют две основные концепции геологического строения акватории моря Лаптевых.

Некоторые отечественные исследователи рассматривают Лаптевоморский шельф как акваториальное продолжение древней Сибирской платформы с докембрийским фундаментом и осадочным чехлом от рифея до кайнозоя (Евдокимова и др., 2008; Ким и др., 2011 и др.). Вторая точка зрения основана на представлении о том, что Лаптевоморский шельф окружен системой складчатости мезозойской консолидации. Согласно данной концепции, складчатость продолжается на акватории и формирует фундамент Лаптевоморского бассейна,

перекрываемый позднемезозойским-кайнозойским осадочным чехлом (Богданов и др., 1998; Виноградов, Драчев, 2000, Драчев, 2002; Шкарубо, Заварзина, 2011; Drachev et al., 2010 и др.). Вторая концепция имеет обоснования по результатам полевых исследований на побережье континента и островов, где обнажаются отложения, деформированные в ходе мезозойской складчатости. Ввиду широкого использования второй концепции многими современными исследователями, данная гипотеза была использована в настоящей диссертации при рассмотрении геологического строения моря Лаптевых.

Историю образования и развития Лаптевоморского бассейна связывают с эволюцией расположенного к северу Евразийского бассейна (Грамберг и др., 1990, 2000; Грамберг, Пискарев, 2002; Ступакова и др., 2016; Черных, 2005; Drachev et al., 2010; Drachev, Shkarubo, 2017 и др.). В позднем мелу – палеоцене на шельфе происходило растяжение континентальной коры, в возникавших прогибах накапливалось большое количество осадков, которые сносились с Таймыра, Верхоянья, Северной Земли, севера Сибири (Дараган-Сущова и др., 2010; Драчев, 2000). Это растяжение считается первой фазой рифтогенеза в регионе (рисунок 2.2). В результате неё образовалась Лаптевоморская рифтовая система, в которой наиболее крупной структурой является Усть-Ленский рифт. В рифтах накоплены мощные толщи синрифтовых отложений. В конце палеоцена в Евразийском бассейне произошел разрыв континентальной коры в хребте Гаккеля, началось образование океанической коры, в результате чего произошел отрыв будущего хребта Ломоносова, и раскрывались котловины Нансена и Амундсена (Drachev et al., 2010). На Лаптевоморском шельфе в это время континентальный рифтинг также приостановился, однако океаническая кора не формировалась, происходило погружение бассейна и накапливались пострифтовые комплексы осадочного чехла.

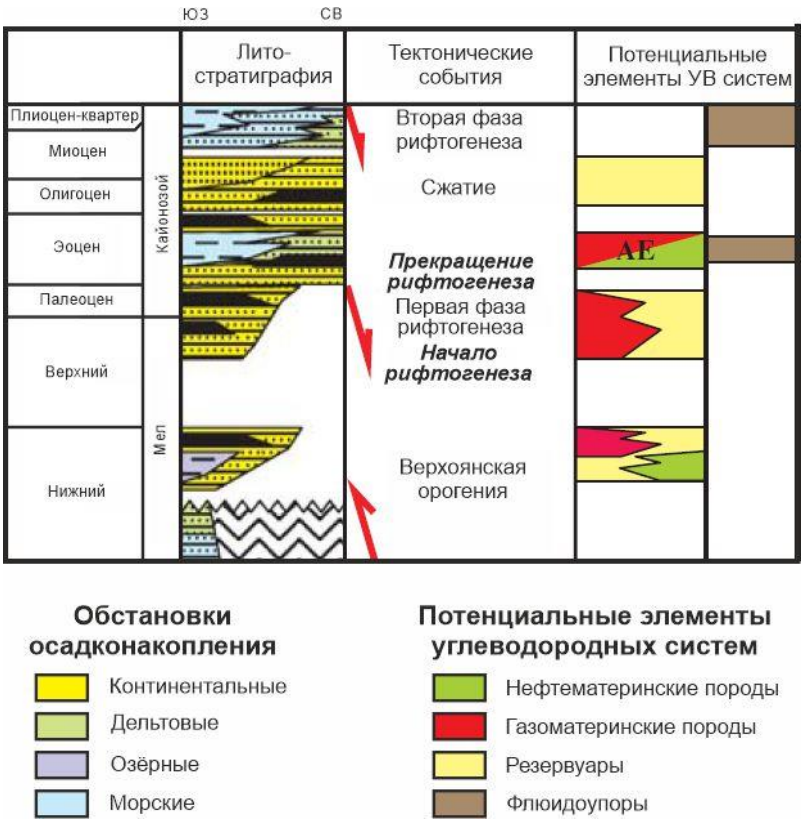


Рисунок 2.2 – Сводная таблица тектоностратиграфии и прогнозируемых элементов углеводородных систем Лаптевоморского шельфа (Drachev et al., 2010, с дополнениями автора)

В олигоцене – раннем миоцене в регионе происходило сжатие, связанное с изменением характера взаимодействия Северо-Американской и Евразийской тектонических плит, а также с замедлением спрединга в Евразийском бассейне. Следствием преобладания обстановок сжатия являлись складчатые деформации в регионе. В позднемиоцен-плейстоценовое время возобновилось растяжение коры, связанное с ускорением спрединга в Евразийском бассейне (Драчев, 2000). При этом происходила вторая фаза активизации Лаптевоморской рифтовой системы, в результате которой разрывные нарушения деформировали большую часть разреза осадочного чехла. По данным сейсмоакустического профилирования в рельефе дна выделяются разломы и грабены, которые указывают на наличие неотектонических движений (Рекант, Гусев, 2009; Колюбакин и др., 2016). Кроме того, Лаптевоморский шельф и прилегающий континентальных склон

характеризуются активной сейсмичностью, магнитуда современных землетрясений достигает 5-6,7 (Аветисов, 2000, 2002; Колюбакин и др., 2016).

Район исследования в настоящей диссертации включает центральную и юго-западную части моря Лаптевых, в которых находятся Центрально-Лаптевский, Южно-Лаптевский и Юго-западный районы исследования МАГЭ (Казанин и др., 2020). Он преимущественно относится к мелководной шельфовой зоне, однако на севере Центрально-Лаптевского района происходит переход к континентальному склону. Основными геологическими структурами являются: Юго-западный рифтовый бассейн моря Лаптевых, Усть-Ленский рифт, Восточно-Лаптевский горст (Drachev et al., 2010).

Фундамент Лаптевоморского бассейна слагают магматические и метаморфические отложения, которые формировались предположительно с архея до мезозоя и были деформированы при мезозойской складчатости. Осадочный чехол состоит из мел-кайнозойских отложений, мощность которых достигает 14-16 км в наиболее погруженных частях рифтов (рисунок 2.3).

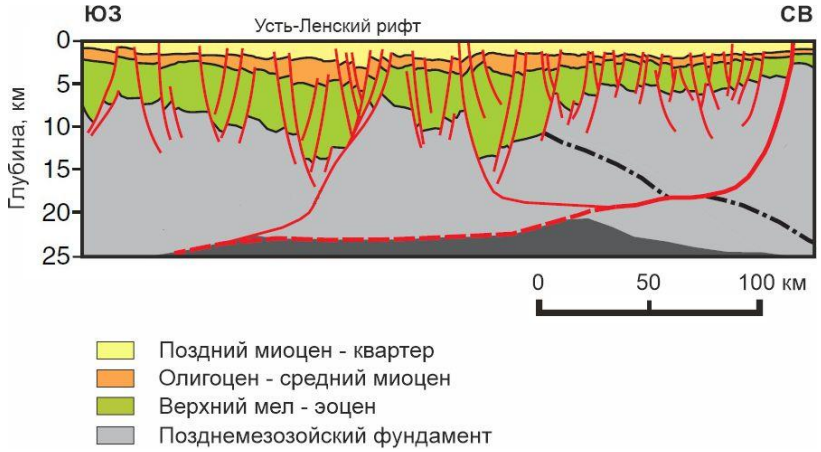


Рисунок 2.3 – Геологический разрез по акватории моря Лаптевых (Drachev et al., 2010, с дополнениями автора)

По данным МАГЭ, осадочный чехол акватории моря Лаптевых, с учетом синрифтовой толщи, разделяется на четыре сейсмостратиграфических комплекса (Кириллова-Покровская, 2017; Отчет…, 2011б): верхнемеловой-палеоценовый

(синрифтовый), палеоцен-эоценовый, олигоцен-нижнемиоценовый и среднемиоцен-четвертичный (пострифтовые). К ВЧР относятся отложения верхнего среднемиоцен-четвертичного комплекса, локально могут быть включены и более древние отложения. По литологическому составу все сейсмостратиграфические комплексы прогнозируются терригенными (Drachev et al., 2010). Изученные бурением в заливе Буор-Хая плейстоцен-голоценовые отложения, в основном, представлены рыхлыми песками с различным содержанием алеврита, пелита, гравийно-галечных включений (Ульянцев и др., 2016; Overduin et al., 2015). Весь осадочный чехол пронизан и интенсивно деформирован дизъюнктивными нарушениями, обусловленными сложностью геологического развития.

Несмотря на имеющиеся вопросы о геологическом строении региона, многие исследователи (Евдокимова и др., 2008; Ким и др., 2011; Drachev et al., 2010 и др.) считают, что Лаптевоморский шельф имеет высокий нефтегазоносный потенциал, что обуславливается большой мощностью осадочного чехла и наличием ловушек УВ.

В качестве потенциальных резервуаров акватории моря Лаптевых рассматриваются олигоценовые и нижнемиоценовые отложения, которые на побережье сложены крупнозернистыми песчаниками (Drachev et al., 2010). В среднемиоцен-четвертичном комплексе прогнозируются преимущественно глинистые породы, которые предположительно являются основными региональными флюидоупорами.

Наличие в разрезе нефтегазоматеринских толщ не вызывает сомнений. Присутствие ОВ наземного происхождения прогнозируется в палеоцене, эоцене, олигоцене – в отложениях, приносимых с суши, в основном, реками Леной и Яной. Терригенное ОВ является потенциальным источником газообразных УВ. В глинистых отложениях среднего эоцена может присутствовать ОВ папоротника Azolla, образовавшегося в условиях термального климатического максимума, обнаруженного в скважине на хребте Ломоносова (Отчет…, 2011б; Drachev et al.,

2010). Однако вклад данных отложений в генерацию нефти и газа еще не доказан. Верхнемеловые и палеоценовые отложения синрифтового комплекса также могут содержать наземное ОВ. Отложения в рифтах погружены до глубин 4-5 км и более, где возможна генерация термогенного газа.

В 2008-2011 гг. в центральной части моря Лаптевых (в северной части шельфовой зоны) была обнаружена и закартирована крупная (около 80х220 км) Центрально-Лаптевская зона сипов газа (ЦЛЗСГ), которая впоследствии исследовалась рядом российских и международных экспедиций (рисунок 2.4) (Анисимов и др., 2012; Баранов и др., 2019; Лобковский и др., 2015; Сергиенко и др., 2012; Юсупов и др., 2010; Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Steinbach et al., 2021 и др.). Отличием ЦЛЗСГ от многих других зон интенсивной эмиссии газа (например, верхняя часть континентального склона у западного побережья Шпицбергена (Bunz et al., 2012; Knies et al., 2018 и др.) являются небольшие глубины дна (50-120 м). ЦЛЗСГ находится в области сочленения Лаптевоморской рифтовой системы с Хатангско-Ломоносовской зоной разломов (Шипилов и др., 2019, 2020) и хребтом Гаккеля (Drachev et al., 2010).

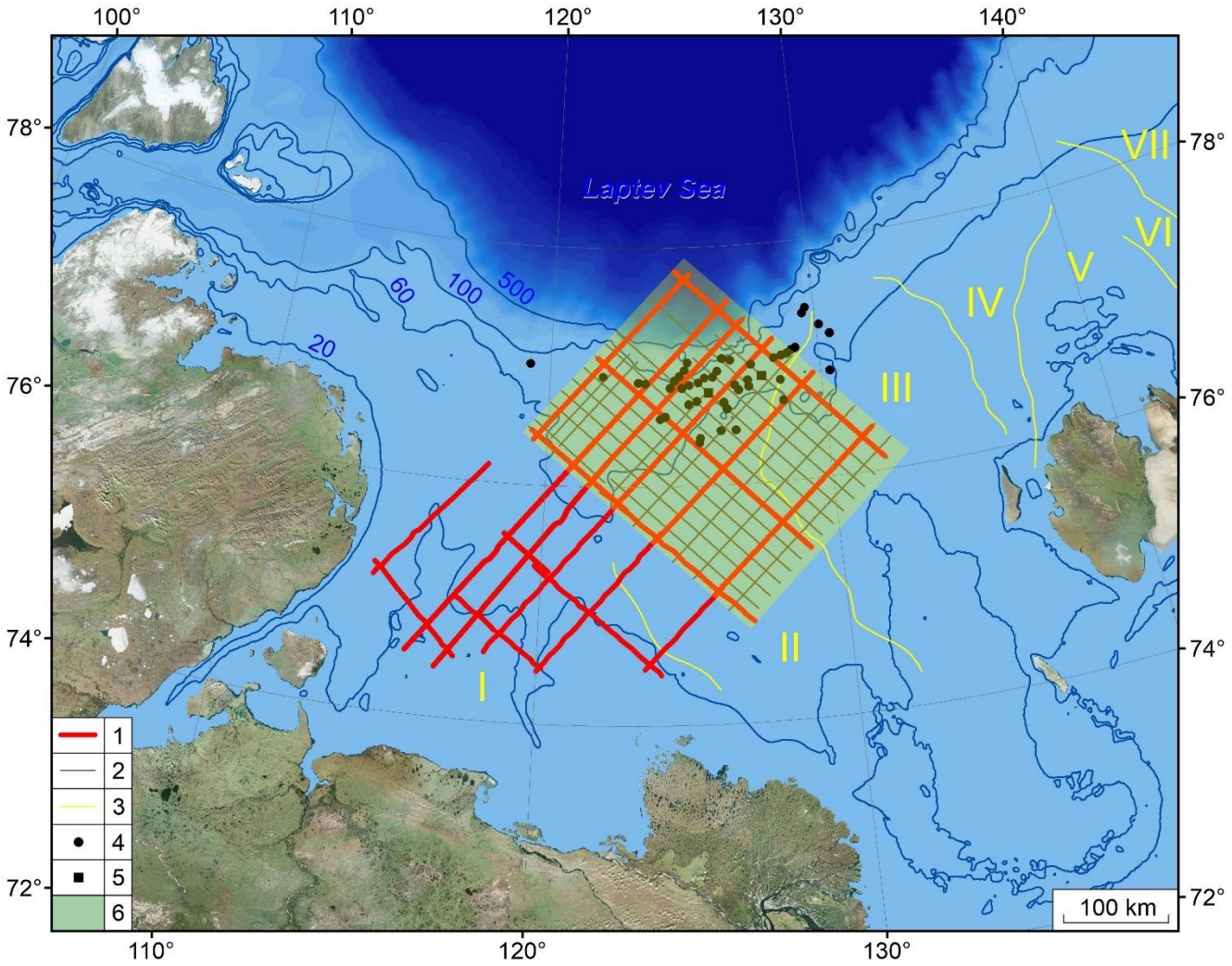


Рисунок 2.4 – Расположение сейсмопрофилей МОГТ МАГЭ в зоне активной эмиссии газа в море Лаптевых. Обозначения: 1 и 2 – сейсмопрофили первого (1) и второго (2) этапов исследований; 3 – границы геологических структур (I – Юго-Западный Лаптевский рифтовый бассейн, II – Усть-Ленский рифт, III – Восточно-Лаптевский горст, IV – Анисинский рифт, V – поднятие Котельное, VI – Новосибирский рифт, VII – поднятие Де-Лонга (Drachev et al., 2010)); 4 и 5 – интенсивные сипы газа по данным работ (Баранов и др., 2019; Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Steinbach et al., 2021), включая зоны их высокой концентрации (5) (Baranov et al., 2020); 6 – Центрально-Лаптевский район. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

В ходе последнего четвертичного оледенения современный Восточно-Сибирский арктический шельф не покрывался ледником и находился в

субаэральных условиях, при этом береговая линия располагалась примерно на уровне современной изобаты 120 м. Под влиянием отрицательных температур воздуха в его пределах сформировалась мощная толща ММП (Collett, Dallimore, 2000). Внутри и под ММП в благоприятных термобарических условиях могли образоваться ГГ. После таяния ледников Восточно-Сибирский арктический шельф был затоплен, однако при отрицательных температурах придонной воды, ММП могли сохраниться. Современные процессы деградации ММП и диссоциации ГГ приняты рядом авторов как основное объяснение интенсивной эмиссии газа в ЦЛЗСГ (Сергиенко и др., 2012; Shakhova et al., 2015, 2019 и др.).

Обнаруженная ЦЛЗСГ являлась ключевым объектом комплексного исследования, проведенного в рамках данной диссертации. Это исследование включало анализ временных разрезов МОГТ МАГЭ 2009 г. по Центрально-Лаптевскому району (см. раздел 3.1), сейсмограмм ОПВ, придонных температур воды, а также аналитический расчет условий стабильного существования ГГ (см. главу 4). Целью исследования являлось изучение потенциальной газоносности ВЧР, прогноз распространения ММП и ГГ, анализ генезиса эмиссии газа в ЦЛЗСГ.

2.2. Восточно-Сибирское море

Восточно-Сибирское море является окраинным морем Северного Ледовитого океана, на западе граничит с морем Лаптевых по Новосибирским островам, на востоке – с Чукотским морем по меридиану 180°, проходящему через остров Врангеля, на юге омывает берега Сибири, на севере переходит в глубоководную котловину Подводников (Атлас …, 1985; Национальный …, 2017; рисунок 2.5). Площадь моря составляет 913 тыс. км^2. Море по большей части характеризуется небольшими глубинами – до 50 м, наибольшая глубина на континентальном склоне составляет 915 м. Большую часть года акватория покрыта льдом. Средняя температура в феврале – от -28 до -30 °С, в июле – от 0 до 7 °С.

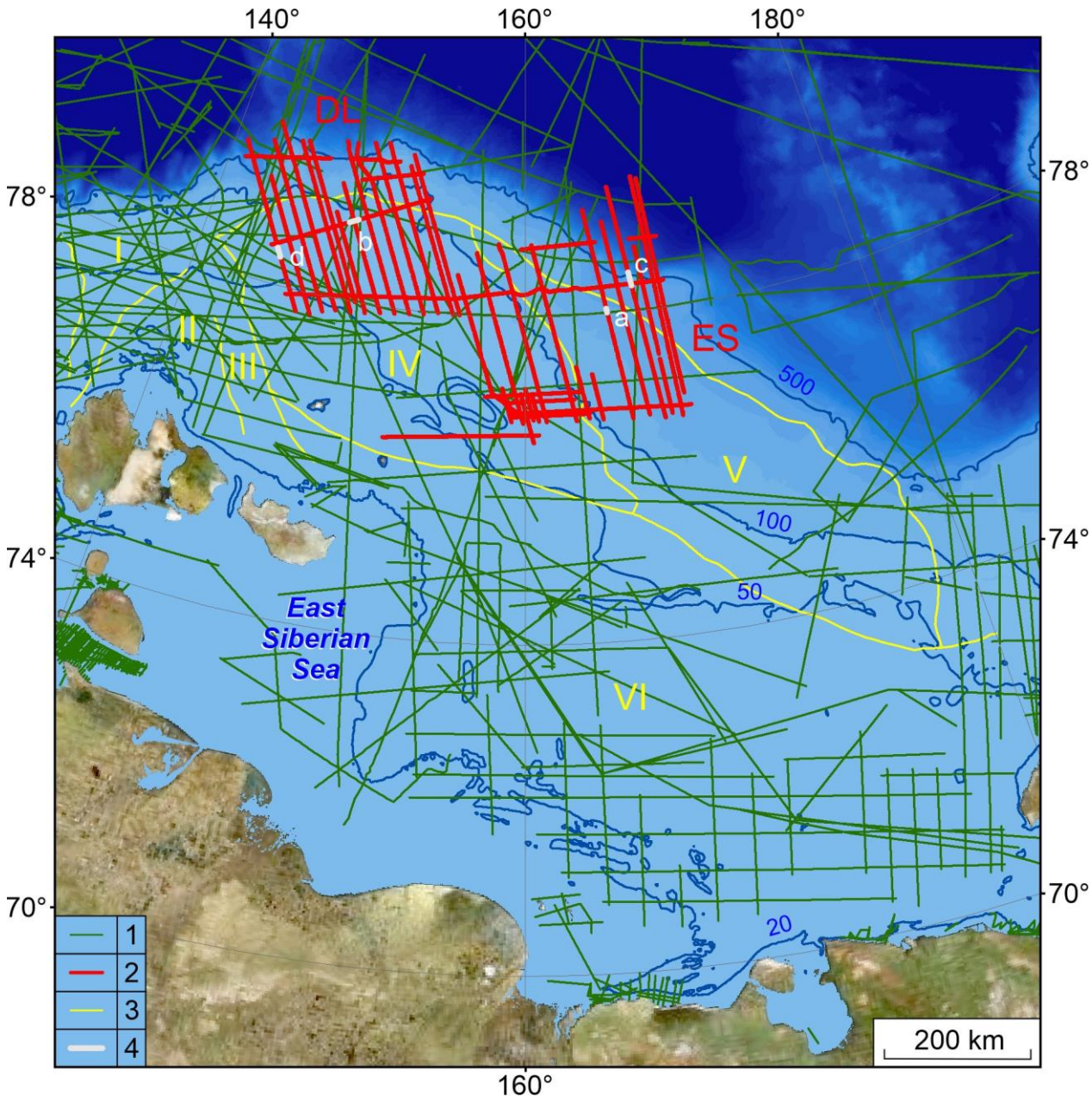


Рисунок 2.5 – Схема изученности Восточно-Сибирского моря. Обозначения: 1 – сейсмопрофили МОГТ; 2 – проанализированные сейсмопрофили МОГТ в районах Де-Лонга (DL) и Восточно-Сибирском (ES); 3 – границы геологических структур (I – Анисинский рифт, II – Котельное поднятие, III – Новосибирский рифт; IV – поднятие Де-Лонга, V – бассейн Вилькицкого, VI – Новосибирско-Чукотский складчатый пояс (Drachev et al., 2010)); 4 – участки сейсмопрофилей, приведенные на рисунках 3.19-3.22. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Западная часть побережья Восточно-Сибирского моря низменная, сложена аллювиально-морскими отложениями, содержащими линзы льда. Восточная часть гористая, сложена коренными породами (Чернякова, 2006). Береговая линия относительно ровная. В акваторию впадают крупные реки – Колыма, Алазея, Индигирка, Хрома, однако речной сток относительно невелик. В Восточно-Сибирском море происходит круговорот течений – в северной части воды движутся в западном направлении, в южной – в восточном направлении.

Восточно-Сибирское море характеризуется слабой геолого-геофизической изученностью, однако ряд исследований, проведенных как российскими, так и зарубежными организациями, позволяет делать теоретические выводы о геологическом строении и нефтегазоносности региона.

В 1989-1992 гг. Полярной морской геологоразведочной экспедицией (ПМГРЭ) выполнялись сейсмические работы методами МОВ и ГСЗ в рамках межведомственной программы комплексных геофизических работ «Трансарктика». Профили покрывали северный шельф моря, котловины Подводников и Макарова. В 1990-е годы трестом ДМНГ совместно с Halliburton Geophysical Services была отработана система увязанных между собой региональных профилей МОГТ в центральной и восточной частях Восточно-Сибирского моря (Агапитов, Арюпин, 2001). В 1993-1994 гг. и в 1997 г. Федеральным институтом геологии и природных ресурсов Германии (BGR) совместно с трестом СМНГ на шельфах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского было отработано 11 777 км профилей (Franke et al., 2001). В 1995 и 1998 гг. проводились сейсмоакустические исследования на шельфе и континентальном склоне с немецкого научно-исследовательского ледокола «Polarstern» (Ким и др., 1999).

В 2007 г. МАГЭ отработало профиль «Арктика-2007» с научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Куренцов» и провело комплексные морские геофизические исследования хребта Ломоносова и зоны его сочленения со структурами островов Котельный и Де-Лонга. Объем работ МОГТ 2D с надводной

гравиметрией и дифференциальной магнитометрией по линии регионального профиля А7 составил 820 км. В 2011-2012 гг. МАГЭ проведены комплексные геофизические работы в северной части шельфа, переходящей в континентальный склон. В 2014 г. в рамках проекта «Арктика-2014» МАГЭ были выполнены сейсмические работы МОГТ в районе котловин Нансена и Амундсена в Евразийском бассейне, в котловинах Подводников, Макарова, на хребте Ломоносова и на окраине морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. В 2016 г. МАГЭ проводила комплексные геолого-геофизические исследования континентальной окраины Восточно-Сибирского моря. С НИС «Николай Трубятчинский» были выполнены комплексные работы, включавшие сейсморазведку МОГТ 2D, надводную гравиметрию и дифференциальную гидромагнитометрию.

Геологическая информация, как и по морю Лаптевых, базируется на данных исследований берегового обрамления и островов (Косько и др., 2013), а также результатах бурения скважин ACEX в приполюсной части хребта Ломоносова (Backman et al., 2008).

В тектоническом плане, акватория Восточно-Сибирского моря разделяется на две различные по строению зоны: в северной части – поднятие Де-Лонга – блок платформы с протерозойским фундаментом, не подвергшийся воздействию мезозойской складчатости, и в южной части – Новосибирско-Чукотский складчатый пояс, образовавшийся при мезозойской складчатости (Drachev et al., 2010). В первой зоне осадочный чехол начинается с палеозоя (предположительно, девон), во второй – с раннего мела (апт-альб).

В депоцентре южной части моря в мелу-палеоцене происходило осадконакопление без значительных тектонических движений, в эоцене – среднем миоцене район находился в обстановке транстенсии, позже сменившейся обстановкой сжатия, что было обусловлено изменением характера взаимодействия Евразийской и Северо-Американской плит. Тектонические движения прекратились с позднего миоцена, так как зона взаимодействия плит сместилась к

Лаптевоморскому региону, где в это время началась фаза рифтогенеза. Такая же эволюция предполагается с мелового времени для бассейна Вилькицкого, примыкающего с востока к поднятию Де-Лонга (рисунок 2.5).

Районами исследования в настоящей работе являлись два полигона, соответствующие районам исследований МАГЭ – Восточно-Сибирскому и Де-Лонга (ES и DL на рисунке 2.5). Полигоны находятся в северной части шельфа Восточно-Сибирского моря, в месте его перехода в котловину Подводников Амеразийского бассейна. В тектоническом плане этот район охватывает поднятие Де-Лонга и прогиб Вилькицкого. Отличительная черта строения поднятия Де-Лонга – наличие базальтовых комплексов апт-альбского возраста (Драчев и др., 2001; Никишин и др., 2017; Drachev et al., 2010; Mazarovich, Sokolov, 2003). По данным МАГЭ, на поднятии Де-Лонга кроме кристаллического фундамента также выделяется акустический, или промежуточный структурный этаж. Кровля акустического фундамента является диахронным несогласием апт-альбского возраста, перекрывающим породы с возрастом от девона до нижнего мела. Однако в промежуточном структурном этаже – домеловых отложениях – также прослеживаются отражения (Drachev et al., 2010). Эти отражения могут соответствовать аналогу элсмирского комплекса, выделяемого на Северной Аляске (см. раздел 2.3; Drachev et al., 2010). По данным МАГЭ поднятие Де-Лонга и бассейн Вилькицкого имеют единый акустический фундамент, перекрываемый отложениями мелового-кайнозойского возраста (Казанин и др., 2017б; Отчет …, 2011а, 2016).

Частично район исследования на севере охватывает котловину Подводников, где возможны более древние отложения осадочного чехла. В пределах поднятия Де-Лонга акустический фундамент находится близко к морскому дну, при этом основной объем осадочных пород в рассматриваемом регионе приурочен к прогибу Вилькицкого и верхней части континентального склона, ограничивающего на севере поднятие Де-Лонга и прогиб Вилькицкого.

Осадочный чехол (без учета промежуточного этажа), по данным МАГЭ, разделяется на пять сейсмостратиграфических комплексов – палеозой-мезозойский, палеоцен-эоценовый, олигоцен-раннемиоценовый, среднемиоцен-позднемиоценовый, плиоцен-четвертичный. К ВЧР в прогибе Вилькицкого относятся отложения среднемиоцен-четвертичного возраста, однако в местах повышения фундамента могут включаться и более древние отложения. В районе поднятия Де-Лонга все сейсмостратиграфические комплексы могут быть отнесены к ВЧР. По составу все осадочные комплексы прогнозируются терригенными (Drachev et al., 2010). В качестве потенциальных резервуаров УВ, как и для акватории моря Лаптевых, рассматриваются олигоценовые и нижнемиоценовые песчаные отложения, региональным флюидоупором потенциально могут быть глинистые миоцен-четвертичные отложения. Нефтегазоматеринские толщи прогнозируются в верхнем мелу – палеоцене, и олигоцене – нижнем миоцене, в которых предполагается накопление большого объема терригенного ОВ (Drachev et al., 2010).

2.3. Чукотское море

Чукотское море является окраинным морем Северного Ледовитого океана, омывает северный берег Чукотского полуострова и северо-западный берег полуострова Аляски (Атлас …, 1985; Деев, Мирлин, 2017; Национальный …, 2017; рисунок 2.6). На западе оно граничит с Восточно-Сибирским морем примерно по меридиану 180°, на востоке – с морем Бофорта в районе мыса Барроу, на юге соединяется с Беринговым морем через Берингов пролив. Северная граница моря носит условный характер. Площадь моря составляет 582 тыс. км^2. Дно моря по большей части неглубокое (до 50-70 м), но в северо-западной части снижается примерно до 1250 м. Береговая линия изрезана слабо, островов мало, наиболее крупные – Врангеля и Геральд. Чукотское море разделяется на российский и американский секторы примерно по меридиану 169° з.д.

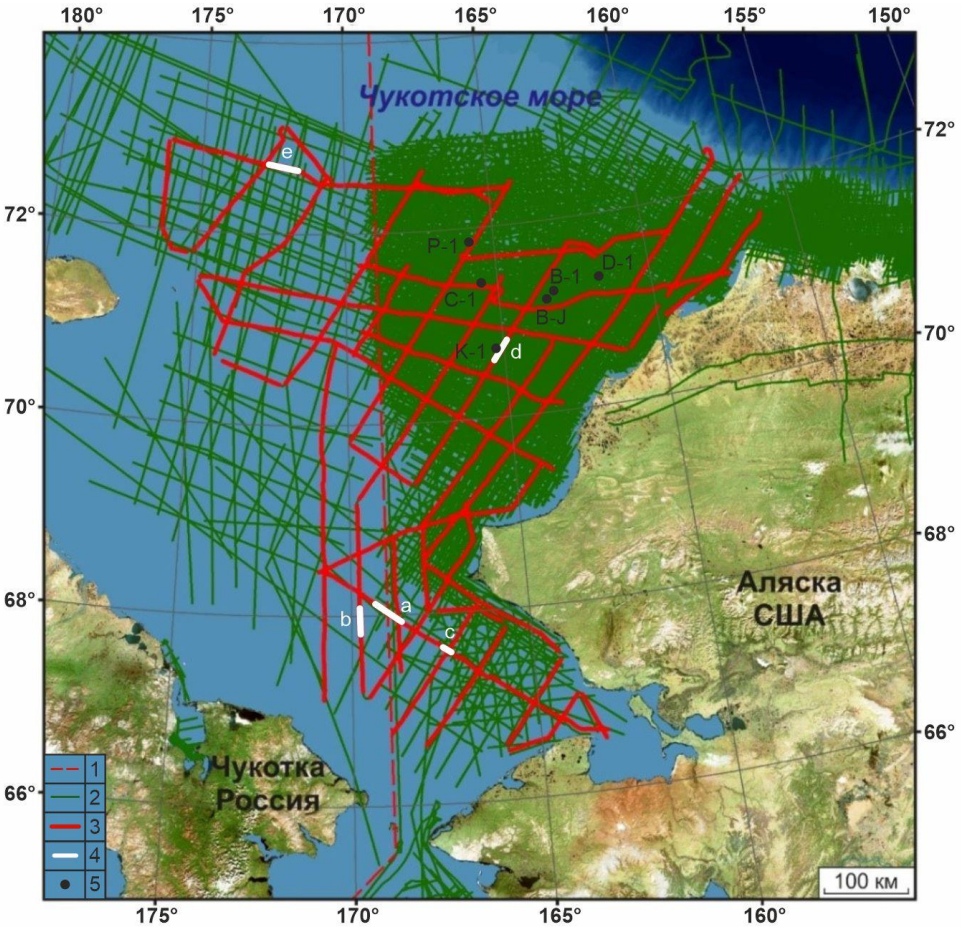


Рисунок 2.6 – Схема изученности акватории Чукотского моря. Обозначения: 1 – морская граница между Россией и США; 2 – сейсмопрофили МОГТ; 3 – проанализированные сейсмопрофили МОГТ USGS (Triezenberg et al., 2016); 4 – участки сейсмопрофилей, приведенные на рисунках 3.25-3.29; 5 – шесть скважин: K-1 – Klondike-1, P-1 – Popcorn-1, B-1 – Burger-1, B-J – Burger-J, C-1 – Crackerjack-1 и D-1 – Diamond-1. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Средняя температура в феврале меняется в диапазоне от -21 до -27 °С, в июле – от 2,5 до 5,5 °С. В конце октября-ноябре море полностью замерзает, в мае-июне лед начинает таять. В Чукотское море с юга через Берингов пролив заходит теплое течение, которое разделяется на три ветви – Аляскинскую, вдоль побережья Аляски, Геральдовскую, восточнее о. Геральд, и Лонговскую, в проливе Лонга (Атлас …, 2002; Drumm et al., 2016). В тоже время вдоль берега Чукотки существует холодное течение, несущее воды из Восточно-Сибирского моря в Берингово.

Геолого-геофизические исследования проводятся в Чукотском море с начала XX века. Отдельные магнитные исследования проводились в 1920 г., а в 1957-1962 гг. кондиционной магнитной съемкой были покрыты Чукотский полуостров и прилегающие части моря (Атлас …, 2002). В 1966 г. Научно-исследовательским институтом геологии Арктики (НИИГА) выполнена аэромагнитная съемка и сейсморазведка в глубоководной части морей Чукотского и Восточно-Сибирского. В 1969 г. аэромагнитная съемка была продолжена, и построены магнитные карты.

В 1964 г. выполнены гравиметрические работы в юго-западной части моря. В 1966-1969 гг. НПО «Севморгео» проведены гравиметрические исследования для составления Государственной гравиметрической карты.

В 1976 г. НПО «Севморгео» провело комплекс гравитационных и магнитных исследований, а также отработало два профиля МОВ общей длиной 725 км. В 1982 г. еще один профиль МОВ ОГТ длиной 350 км отработан ДМНГ от острова Врангеля до Колючинской губы. В 1987-1988 гг. ПГО «Севморгеология» проведены комплексные геофизические исследования в объеме 2300 км в юго-восточной части моря, включая семь региональных профилей МОВ ОГТ. В 1990 г. была выполнена комплексная геофизическая съемка в объеме 8791 км совместным американско-российским коллективом исследователей. Работы включали сейсмические, гравиметрические, магнитометрические исследования. Комплексные геолого-геофизические исследования в регионе были проведены в рамках проекта «Арктика 2005» по изучению восточной части Арктического шельфа (Поселов и др., 2011). Также компания TGS-NOPEC проводила сейсмические исследования в российском секторе Чукотского моря (Вержбицкий и др., 2010). Общая длина профилей составила 3600 км. В 2010-2012 гг. сейсмические исследования в Восточно-Сибирском и Чукотском морях были проведены ДМНГ.

Значительный объем исследований выполнен специалистами США в американском секторе Чукотского моря – более 161 тыс. км профилей отработано до 1991 г. В американском секторе в мелководной зоне в 1989-1991 гг. с бурового

судна «Canmar Explorer III» («Jasper Explorer») было пробурено пять глубоких скважин (Klondike-1, Popcorn-1, Burger-1 и Crackerjack-1 компании «Shell» и Diamond-1 – «Chevron») с забоями от 2056 до 3660 м (максимальный забой на структуре Klondike) (рисунок 2.6). В 2015 г. пробурена скважина Burger-J. В российском секторе не пробурено ни одной глубокой скважины, в связи с этим исследование российских бассейнов (установление времени накопления отложений, оценка перспектив нефтегазоносности и др.) базируется на геолого-геофизической изученности шельфа Аляски.

В ходе сложной геологической истории развития Северной Аляски и прилегающего шельфа морей Чукотского и Бофорта, в пределах региона сформировался ряд осадочных бассейнов, характеризующихся различными стратиграфическим диапазоном и мощностью отложений. Основные бассейны и важнейшие геологические структуры Северного склона Аляски и прилегающего шельфа показаны на рисунке 2.7.

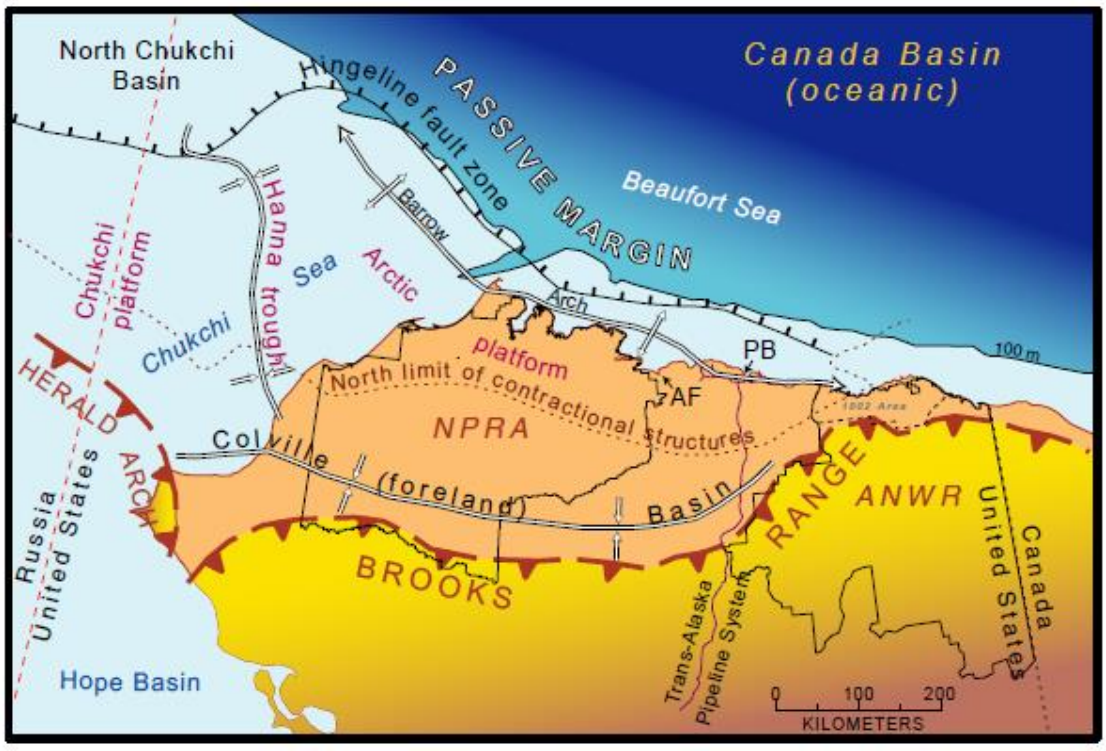


Рисунок 2.7 – Основные геологические структуры и осадочные бассейны Северного склона Аляски и прилегающего шельфа (Houseknecht, Bird, 2005)

Для Северной Аляски и прилегающего шельфа морей Чукотского и Бофорта принято разделение геологического разреза на четыре основных стратиграфических комплекса: франклинский, элсмирский, бофортский и брукский (Grantz et al., 1994; Sherwood et al., 2002; Houseknecht, Bird, 2005; рисунок 2.8).

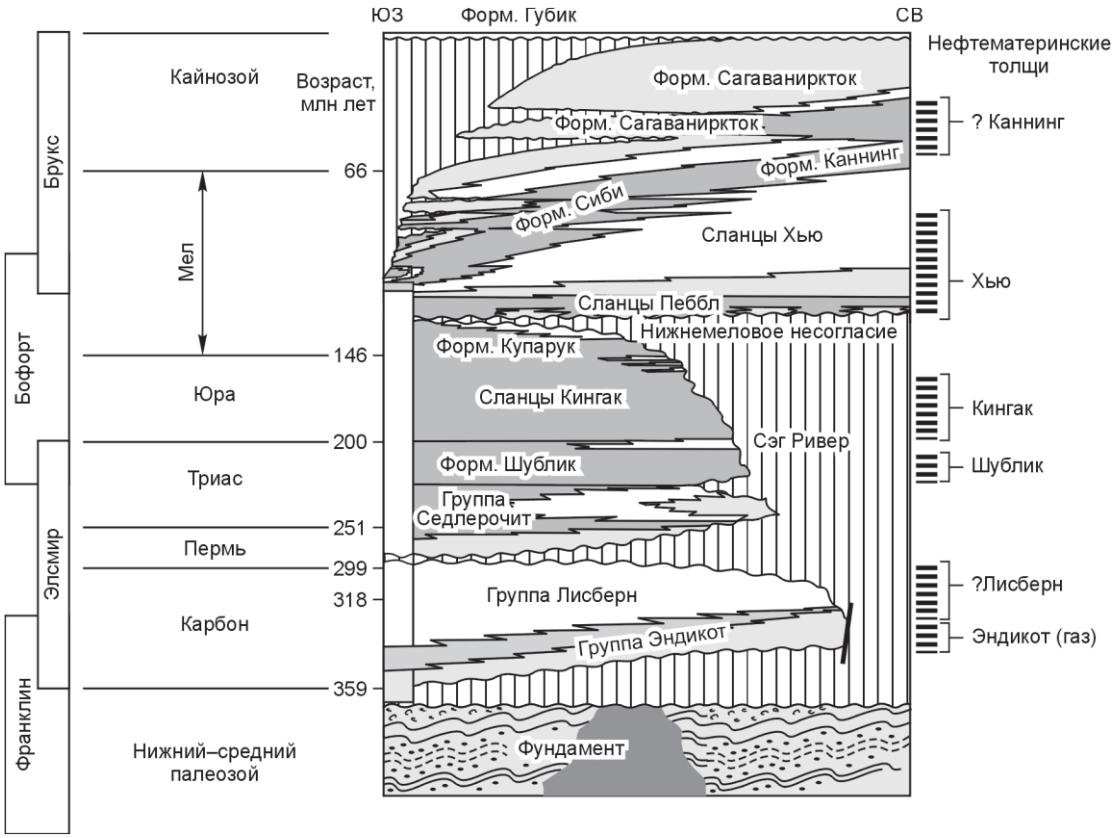


Рисунок 2.8 – Стратиграфические комплексы Северной Аляски (Houseknecht, Bird, 2005; Хаин и др., 2009)

К франклинскому комплексу относят отложения различного происхождения в возрастном диапазоне от докембрия до девона. В пределах Северной Аляски эти породы значительно деформированы и метаморфизованы, и представляют собой акустический фундамент осадочных бассейнов. Элсмирский комплекс представлен отложениями, накопленными с карбона по триас. На Северном склоне элмирский комплекс выклинивается у свода Барроу, его мощность увеличивается в южном направлении к хребту Брукс. Также мощность увеличивается к западу в троге

Ханна и далее уменьшается к Чукотской платформе. Бофортский комплекс представлен триасовыми-раннемеловыми породами, он развит в грабенах и полуграбенах, образованных при растяжении коры, в основном, к северу от современной береговой линии (Sherwood et al., 2002). Выше элсмирского и рифтового комплексов с несогласием залегают отложения брукского комплекса, образовавшегося позднем мелу – кайнозое (Grantz et al, 1982). Отложения заполняют Колвиллский бассейн и, переходя через свод Барроу, продолжаются на современном шельфе Северной Аляски. К ВЧР на акватории морей Чукотского и Бофорта относятся отложения брукского комплекса, представленные терригенными породами.

История развития осадочного чехла Северной Аляски и прилегающего шельфа, включающего моря Чукотское и Бофорта, начинается с юры, когда на месте современной Канадской котловины начался активный рифтогенез. Впоследствии, в раннем мелу от Северо-Американского континента отделился блок, называемый рядом авторов микроплитой «Чукотка – Арктическая Аляска» (Лобковский и др., 2011; Drachev et al., 2010 и др.) (рисунок 2.9). После отделения данный блок испытывал вращательное движение против часовой стрелки (Хаин и др., 2009), в результате которого и сформировалась Канадская котловина. Столкновение Чукотско-Аляскинского блока с Евразийской окраиной привело к образованию складчато-надвигового пояса, протянувшегося от Новосибирских островов через Чукотку к хребту Брукс на Аляске (Лобковский и др., 2011; Drachev et al., 2010), который упоминался в разделе 2.2 как Новосибирско-Чукотский складчатый пояс. В позднем мелу – кайнозое происходили денудация и снос осадков с возвышенностей образовавшегося пояса, в частности, с хребта Брукс.

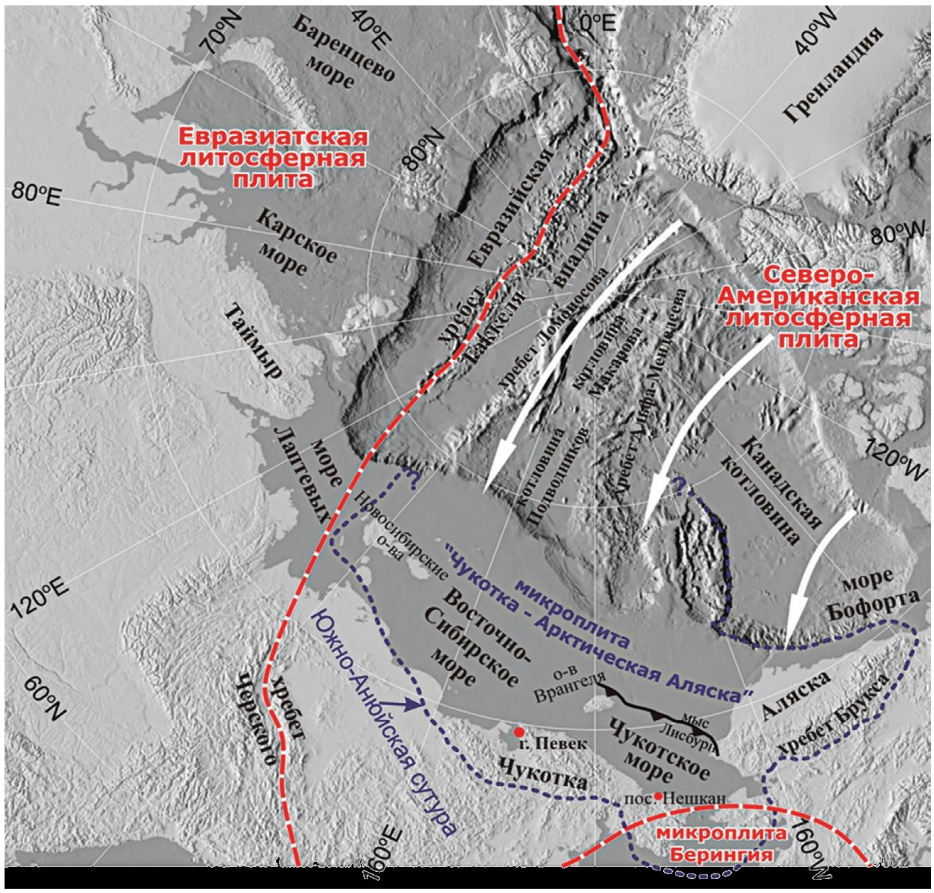


Рисунок 2.9 – Ротационная модель движения микроплиты «Чукотка – Арктическая Аляска» (Лобковский и др., 2011)

Крупные области осадконакопления на акватории Чукотского моря относятся к трогу Ханна, Северо-Чукотскому и Южно-Чукотскому (Хоуп) бассейнам (рисунок 2.7). Район исследования в Чукотском море в настоящей диссертации охватывает все указанные области.

Трог Ханна в разрезе имеет асимметричную форму, с пологим западным бортом и круто падающим восточным. Трог находится между Чукотской и Арктической платформами (рисунок 2.7; Sherwood et al., 2002). Глубина фундамента на севере трога превышает 13700 м. В большей части бассейна глубина фундамента оценивается примерно в 3000 м. Нефтегазоносность прогнозируется для резервуаров брукского комплекса и ловушек, связанных со сложными системами разломов (Thurston, Theiss, 1987).

Северо-Чукотский бассейн расположен к северу от Чукотской платформы, к северо-западу от свода Барроу (Grantz et al., 1982; Houseknecht, Bird, 2005; рисунок 2.7). Бассейн включает мощную толщу терригенных отложений брукского комплекса. В пределах бортов впадины присутствуют элсмирские отложения (Wiley, 1986). Листрические сбросы смещают брукские и, местами, более древние отложения. Они простираются параллельно бровке континентального шельфа. На южной окраине Северо-Чукотского бассейна, в области перехода к Чукотской платформе присутствуют диапировые структуры, предположительно, глиняного состава, деформировавшие осадочный чехол во время накопления брукского комплекса (Grantz et al, 1982). Многочисленные листрические разломы и связанные с ними смещенные блоки пород брукского возраста являются благоприятными факторами для накопления залежей УВ. Также УВ могут находиться в элсмирских отложениях в пределах южной окраины бассейна (Drachev et al, 2010). Кроме того, возможны залежи в ловушках, связанных с диапирами. Потенциальные нефтегазоматеринские породы брукского комплекса в Северо-Чукотском бассейне могут находиться в нефтяном окне, в связи с большой мощностью накопленных отложений.

Бассейн Южно-Чукотский (Хоуп) расположен к юго-западу от хребта Брукс, к югу от свода Геральда (рисунок 2.7; Bird et al., 2008). Бассейн включает отложения брукского комплекса, в основном, кайнозойские (Grantz et al., 1982). Максимальная мощность отложений составляет 5,6 км. Бассейн характеризуется присутствием сбросов, взбросов, надвигов (Wiley, 1986). Несмотря на наличие перспективных структурных ловушек, углеводородный потенциал бассейна является низким в связи с тем, что молодые отложения, в которых присутствует ОВ наземного происхождения, не достигли термального созревания. Тем не менее, в бассейне возможно существование ограниченного количества биогенного газа (Bird et al., 2008).

2.4. Море Бофорта

Море Бофорта является окраинным морем Северного Ледовитого океана, омывает с севера берега Аляски (США) и Канады. На востоке море ограничено островами Канадского Арктического архипелага, на северо-западе – условной линией от мыса Барроу на Аляске до острова Принс-Патрик (Атлас …, 1985; Britannica …, 2019). Площадь моря составляет примерно 476 тыс. км^2, средняя глубина – 1004 м. Мелководный шельф распространен на расстоянии до 145 м от побережья, на севере через континентальный склон он переходит в глубоководную Канадскую котловину (рисунок 2.10).

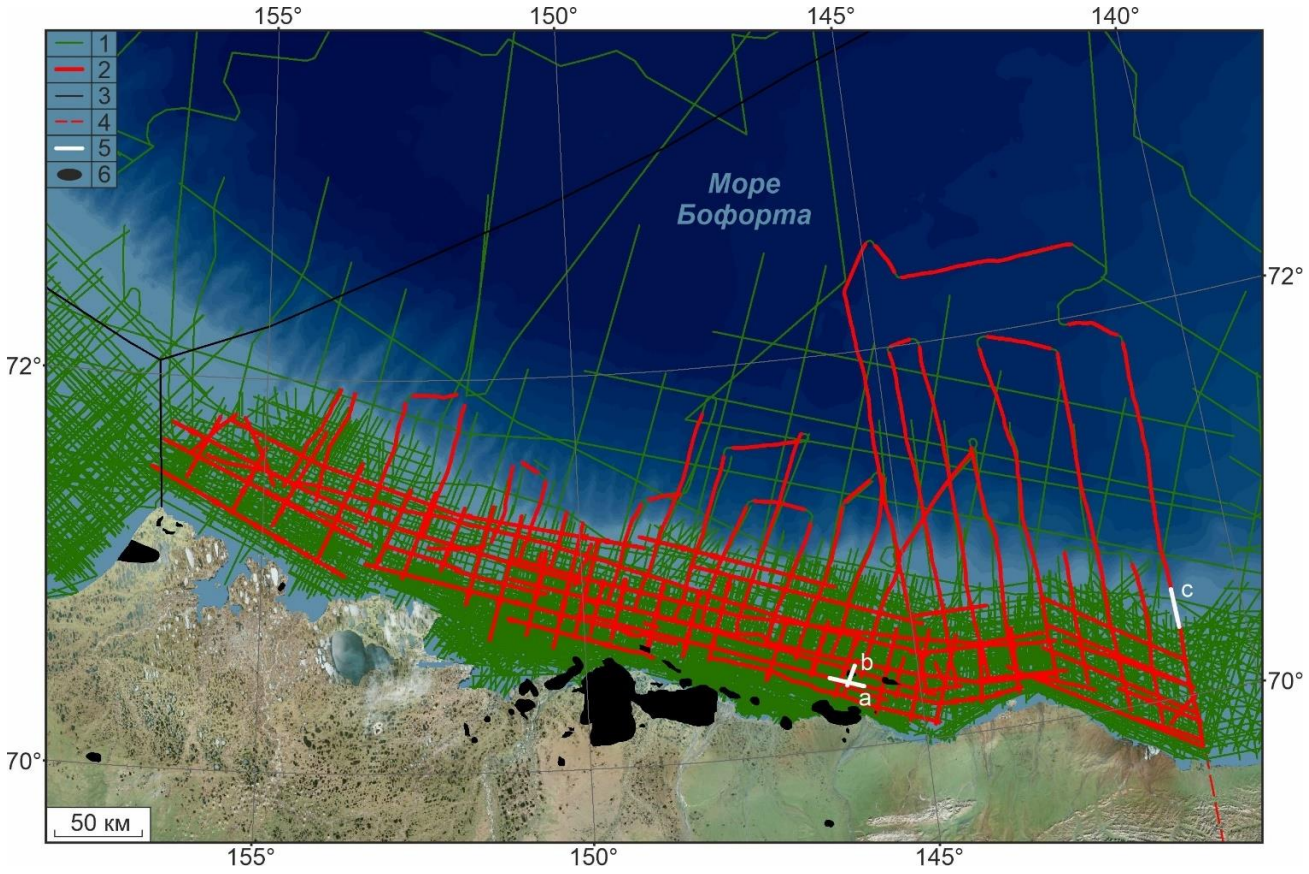


Рисунок 2.10 – Схема изученности американского сектора моря Бофорта. Обозначения: 1 – сейсмопрофили МОГТ; 2 – проанализированные сейсмопрофили МОГТ USGS (Triezenberg et al., 2016); 3 – граница моря; 4 – сухопутная граница между США и Канадой; 5 – участки сейсмопрофилей, приведенные на рисунках 3.32-3.34; 6 – месторождения УВ. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Акватория характеризуется арктическим климатом, средняя температура в январе составляет -28-30 °С, в июле – 6-8 °С. В море происходит круговорот течений: на юге в августе переносятся на восток прогретые поверхностные воды с температурой до 2 °С, на севере переносятся на запад арктические воды с температурами от -0,5 до 1 °С (Бофорта …, 2006). Однако почти круглый год море покрыто льдом, который оттаивает в августе в окрестностях берегов. Море Бофорта характеризуется значительным материковым стоком, в него впадают реки крупные Маккензи, Колвилл, Андерсон и другие.

Американский сектор моря Бофорта являлся районом исследования в диссертации. Он характеризуется высокой степенью геолого-геофизической изученности, шельфовая зона покрыта плотной сеткой профилей МОГТ, однако в глубоководной части акватории профилей гораздо меньше, что связано с тяжелыми ледовыми условиями и меньшими перспективами нефтегазоносности, доступностью и востребованностью потенциальных месторождений УВ (рисунок 2.10). На суше Северного склона Аляски открыт ряд месторождений УВ, самыми крупными из них являются Прудо Бэй (Prudhoe Bay) и Купарук (Kuparuk). На прилегающей акватории моря Бофорта открыты месторождения Эндикотт (Endicott), Нортстар (Northstar), Либерти (Liberty), Хаммерхед (Hammerhead) и другие.

Одним из важнейших этапов изучения геологического строения моря Бофорта являлась многоканальная сейсморазведка МОГТ, выполненная в 1977 году USGS с НИС S.P. Lee, охватившая как шельфовую зону, так и область континентального склона. Результаты съемки были использованы для региональных геологических интерпретаций, оценки ресурсов УВ, а также картирования зоны распространения ГГ и изучения стабильности склона (Grantz et al., 1982; Hart et al., 2011).

По данным геофизических исследования и бурения, достаточно давно известно о существовании ГГ, связанных с ММП, на суше Аляски и в прибрежных районах моря Бофорта (Andreassen et al., 1995; Collett, 1993; Grantz et al., 1989;

Kvenvolden, Grantz, 1990), а летом 2010 г. первый образец гидрата был поднят из глубоководной зоны акватории с судна Healy в ходе совместной экспедиции USGS и GSC, которая также включала многоканальную сейсморазведку и многолучевое эхолотирование (Hart et al., 2011). Позже существование ГГ было подтверждено в канадском секторе моря Бофорта (Paull et al., 2015).

Море Бофорта имеет общую геологическую историю с Чукотским морем (см. раздел 2.3). На американском шельфе моря Бофорта выделяются два осадочных бассейна – Нувук и Кактовик (рисунок 2.11). Осадочный чехол данных бассейнов представлен брукскими отложениями, проградирующими на север, залегающими на франклинском фундаменте, в некоторых местах также распространены элсмирские отложения (Wiley, 1986). На шельфе развиты листрические разломы и оползни, по которым отложения смещаются в сторону глубоководной Канадской котловины (Grantz et al., 1982; Houseknecht, Bird, 2005). В пределах шельфа известно о наличии глиняных диапиров, деформировавших осадочный чехол (Grantz et al., 1982). Предположительно, диапиры сложены породами юрского, мелового, палеоценового возрастов. Их образование связано с более низкой плотностью глиняных толщ указанных возрастов, по сравнению с перекрывающими комплексами.

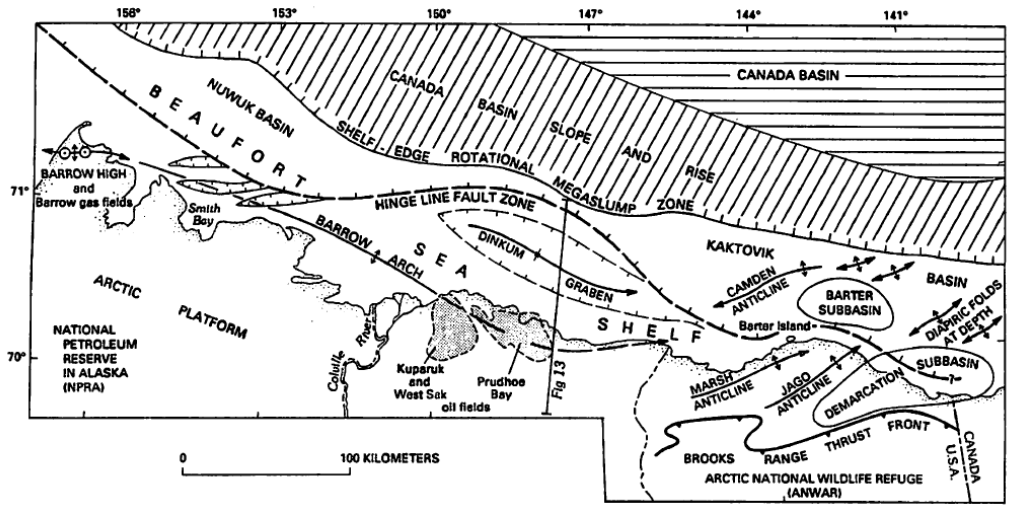


Рисунок 2.11 – Основные геологические структуры американского сектора моря Бофорта (Haimila et al., 1990)

Море Бофорта имеет высокие перспективы нефтегазоносности по аналогии с Северным склоном Аляски (Grantz et al., 1982). Нефтегазоматеринские породы, содержащие сапропель, имеются в элсмирском комплексе, где они являются термально зрелыми для генерации нефти (Haimila et al., 1990). В брукском комплексе имеются материнские породы с керогеном наземного происхождения, однако не являющиеся достаточно зрелыми для генерации УВ. Перспективными резервуарами могут являться брукские дельтовые песчаники. Также залежи могут быть расположены в элсмирских песчаниках, несогласно перекрытых брукскими породами.

2.5. Берингово море

Берингово море относится к окраинной северной части Тихого океана, расположено между Азией и Северной Америкой, на юге ограничивается Командорскими островами и Алеутской грядой, на севере через Берингов пролив соединяется с Чукотским морем (Атлас…, 1985; Деев, 2005; Национальный …, 2017; рисунок 2.12). Площадь Берингова моря составляет около 2,32 млн км^2. Шельфовая зона, по большей части, расположена в северо-восточной части моря, через континентальный склон она переходит в глубоководную Алеутскую котловину, находящуюся в юго-западной части моря, с максимальной глубиной 4150 м. Береговая линия сильно изрезана, образует множество заливов, полуостровов.

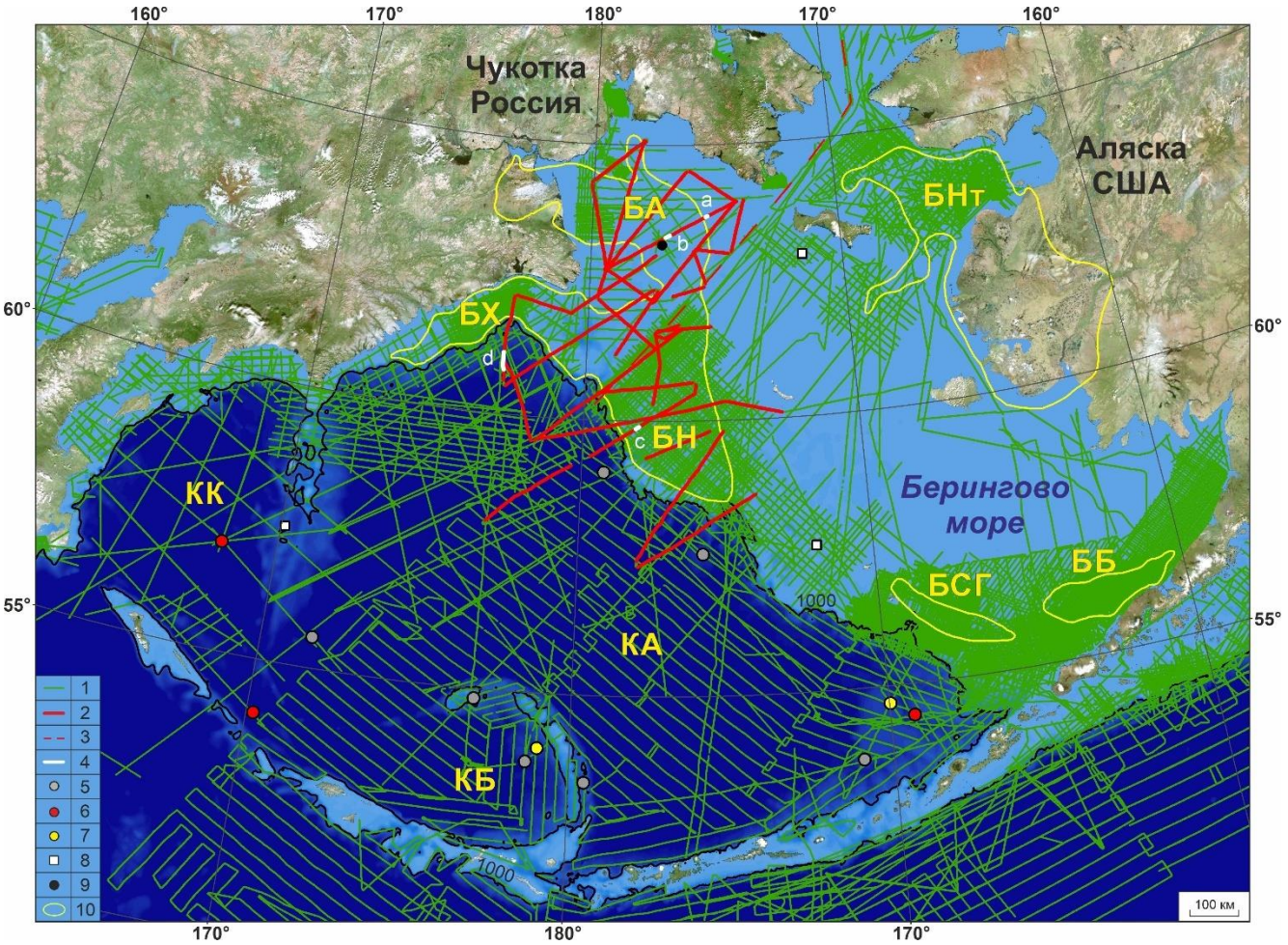


Рисунок 2.12 – Схема изученности акватории Берингова моря. Обозначения: 1 – сейсмопрофили МОГТ; 2 – проанализированные сейсмопрофили МОГТ USGS (Triezenberg et al., 2016); 3 – морская граница между Россией и США; 4 – участки сейсмопрофилей, приведенные на рисунках 3.37-3.40; 5 и 6 – скважины IODP и DSDP, включая с газопроявлениями (6); 7 и 8 – места прогнозирования ГГ по BSR по скважинным (7) и сейсмическим данным (8); 9 – скважина Центральная-1; 10 – контуры осадочных бассейнов, включая Анадырский – БА, Наваринский – БН, Хатырский – БХ, Нортон – БНт, Святого Георгия – БСГ и Бристольский – ББ; котловины Алеутская – КА, Командорская – КК, Бауэрса – КБ. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Большая часть Берингова моря характеризуется субарктическим климатом. Средняя температура воздуха в январе-феврале – от 0-4 °С на юге и юго-западе до -15-23 °С на севере и северо-востоке. В море впадают реки Юкон, Анадырь,

Кускоквим и другие, приносящие пресные воды, в основном, в северные районы моря, что приводит к опреснению поверхностного слоя в летнее время. Температура воды зимой опускается до -1,5 °С на севере, летом поднимается до 11 °С на юге. Ледовый покров на акватории образуется в сентябре-октябре, тает в мае-июне.

В Беринговом море существует круговорот поверхностных течений против часовой стрелки (Деев, 2005). Вдоль побережья Аляски на север идет ветвь теплого течения Куросио, часть которого уходит в Берингов пролив. Вдоль азиатского берега на юг идет холодное Камчатское течение, несущее воды из Чукотского моря.

Российский сектор Берингова моря характеризуется низкой изученностью, по сравнению со смежным американским сектором. Тем не менее, на береговом обрамлении Анадырского бассейна в 1968-1991 гг. пробурено 58 скважин. В 2002 г. в Анадырском заливе ОАО «Сибнефть-Чукотка» в 180 км от берега пробурило скважину Центральная-1 (рисунок 2.13), однако она не привела к открытию месторождения УВ.

Большой объем сейсмических исследований в 1976-1982 гг. выполнен USGS как по американскому, так и по российскому секторам моря. В российском секторе профили USGS покрывают Анадырский бассейн и область континентального склона. В 2003 и 2012 гг. ДМНГ выполнило сейсморазведку МОГТ, гравимагнитометрию, аэрогравимагнитометрию в восточной части моря у берегов Камчатки (Дзюбло и др., 2019).

На акватории Берингова моря осуществлялось бурение в рамках международных программ DSDP (Deep Sea Drilling Program) и IODP (Integrated Ocean Drilling Program). В 1971 году в ходе 19 этапа программы DSDP с бурового НИС “Glomar Challenger” пробурено шесть скважин в глубоководной части акватории (Scholl, Creager, 1973; рисунок 2.12). В трех из них были отмечены газопроявления (рисунок 2.12 – 5). В 2009 году в рамках экспедиции IODP 323 с бурового НИС “JOIDES Resolution” было пробурено также шесть скважин в пределах глубоководной котловины (Sakamoto et al., 2011).

В Беринговом море выделяют следующие осадочные бассейны: Анадырский, Наваринский, Хатырский, Нортон, Бристольский, Святого Георгия (рисунок 2.12). Район исследования в настоящей диссертации включал первые два из указанных бассейнов. Анадырский бассейн находится в северо-западной части Берингова моря и частично на примыкающей суше Чукотского полуострова (Полудеткина, 2007; Харахинов и др., 2014). На севере и северо-западе бассейна расположено Чукотское нагорье, на юге и юго-западе – Корякское нагорье. Данные структуры имеют акваториальное продолжение и формируют фундамент Анадырского бассейна. Время заложения бассейна – конец позднего мела – начало палеоцена. В среднем эоцене – олигоцене в северной части впадины происходили растяжение и рифтинг, в южной части – сжатие. В среднемиоценовое время происходили процессы сдвигообразования и рифтогенеза (Антипов и др., 2009).

Фундамент Анадырского бассейна представлен складчатыми структурами мезозойских и более древних отложений (Агапитов, 2004). Фундамент перекрывается комплексом верхнемелового-среднеэоценового возраста, который определяется как переходный. Выше залегают два комплекса, разделенные стратиграфическим перерывом – верхнеэоцен-олигоценовый и миоцен-четвертичный. Отложения осадочного чехла представлены терригенными, вулканогенными, туфогенно-осадочными породами. Снос осадков происходил с Чукотской и Корякской складчатых структур. В разрезе переходного комплекса встречаются известково-щелочные формации Охотско-Чукотского вулканического пояса и диабазовые силлы сенонского возраста. К верхней части разреза относится миоцен-четвертичный комплекс, представленный терригенными отложениями. В структуре осадочного чехла выделяются прогибы, поднятия, разрывные нарушения, образованные в результате интенсивных тектонических деформаций.

Наваринский бассейн расположен к юго-востоку от Анадырского и отделяется от последнего покровно-складчатыми структурами, являющимися акваториальным продолжением Корякского нагорья. Наваринский бассейн имеет историю развития аналогичную Анадырскому. Так же осадочный чехол

представлен верхнемеловыми-кайнозойскими терригенными отложениями с наличием магматических интрузий и вулканогенных формаций (Wiley, 1986). Снос терригенных осадков происходил как с Сибири, так и с Аляски.

В материковой части Анадырского бассейна имеются открытые месторождения УВ – Верхне-Эчинское нефтяное, Телекайское и Восточно-Телекайское газоконденсатно-нефтяные, Западно-Озерное газовое (Антипов и др., 2008). Потенциальные нефтегазоматеринские нижнемиоценовые и эоцен-олигоценовые толщи находятся, преимущественно, на ранних стадиях катагенеза, в них возможна генерация нефти. Более глубокие верхнемеловые и палеоцен-эоценовые отложения способны генерировать легкую нефть и газоконденсат. В породах среднего-верхнего миоцена возможно образование биогенного газа. Потенциальными коллекторами являются песчаники миоцена (Антипов и др., 2008). На акватории открытые месторождения отсутствуют, тем не менее, по аналогии с сушей прогнозируется наличие элементов углеводородных систем.

Глава 3. Изучение потенциальной газоносности верхней части разреза в районах исследования

Исходные данные для изучения потенциальной газоносности ВЧР включали временные разрезы МОГТ, полученные в акваториях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского МАГЭ и морей Чукотского, Бофорта и Берингова USGS. В разделе 1.3.1 подробно рассмотрены шесть основных критериев выделения аномалий в ВЧР, указывающих на потенциальные залежи свободного газа, а также признаки зон миграции газа и залежей ГГ. Для каждой аномалии, указывающей на газонасыщенный объект, определялись размер по горизонтали – протяженность вдоль соответствующего сейсмопрофиля и глубина относительно поверхности морского дна. Необходимо отметить, что глубина для каждого объекта определялась по верхней границе предполагаемой зоны газонасыщения, поскольку во многих случаях нижнюю границу определить не удавалось в связи с низкой разрешенностью сейсмических материалов и сильным поглощением сигнала.

На основе полученных данных по каждому району исследований строились модели распространения аномалий в ВЧР. При этом для оценки глубин все аномалии распределялись в интервалы с шагом 100 м от дна моря. Для оценки линейных размеров аномалии распределялись по интервалам с шагом 500 м вдоль соответствующих профилей.

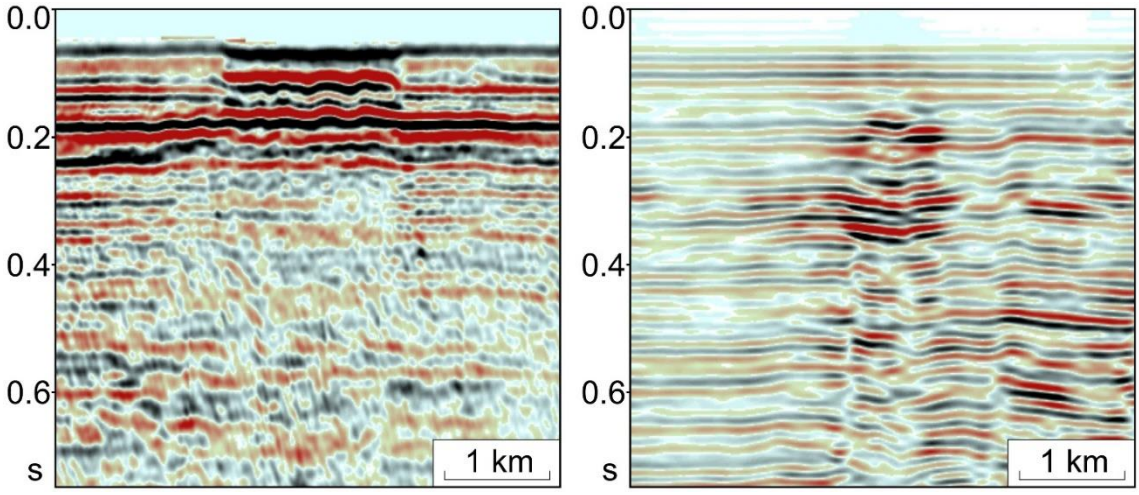
3.1. Море Лаптевых

3.1.1. Анализ временных разрезов МОГТ

Исходные данные для анализа включали временные разрезы МОГТ МАГЭ, построенные по профилям, отработанным в море Лаптевых в 2005-2009 гг. (рисунок 2.1). Полевые работы были проведены МАГЭ с НИС «Профессор Куренцов» и «Геолог Дмитрий Наливкин». На обоих судах использовались сейсмические косы Sercel SEAL Sentinel Solid длиной 8100 м (648 каналов с шагом 12,5 м), удаление первого канала (вынос) – 120 м; кратность наблюдений – 120,

длина записи – 12 с. На первом этапе работы анализировались разрезы по каркасной сети общей длиной около 3550 км. Анализ временных разрезов для выделения потенциально газонасыщенных объектов по морю Лаптевых и по всем акваториям, рассмотренным в настоящей диссертации, осуществлялся в ПО IHS Kingdom.

На рисунке 3.1 на фрагментах временных разрезов 200501 и LS0919 показаны примеры выделенных сейсмических аномалий, указывающих на потенциальные залежи свободного газа в ВЧР. Объект на рисунке 3.1а расположен непосредственно у поверхности морского дна, он характеризуется признаками газонасыщения 1, 2, 3, 4 и 5, указанными выше. Объект на рис. 3.1б имеет признаки 1, 3 и 4. Ниже данной аномалии наблюдается смещение сейсмических рефлекторов, указывающее на наличие разлома, проводящего газ к залежи из более глубоких горизонтов.



а) б)

Рисунок 3.1 – Фрагменты временных разрезов 200501 (а) и LS0919 (б) МАГЭ в море Лаптевых с аномальными объектами (положение – см. рисунок 2.1-a, b)

На рисунке 3.2 показан крупный фрагмент временного разреза МОГТ по профилю LS0924 длиной 55 км, на котором выделяются разломы, доходящие до больших глубин. В ВЧР выделяется множество аномалий, указывающих на потенциально газонасыщенные объекты. В частности, на времени 0,55 с

наблюдается аномальный объект протяженностью 3,3 км с признаками 1, 3, 4 и 5 (рисунок 3.2a). На временах 0,6-0,85 с выделяются три аномалии (рисунок 3.2b). Объект на времени 0,7 с протяженностью 2,9 км характеризуется признаками 1, 3, 4, 5 и 6, у данного объекта также отмечается горизонтальная ось синфазности, указывающая на возможный газоводяной контакт. На временах до 0,3 с выделяется ряд объектов, характеризующихся признаками 1 и 2 (рисунок 3.2c). На времени 0,85 с отмечена аномалия длиной 3,3 км с признаками газонасыщения 1, 4, 5 и 6 (рисунок 3.2d).

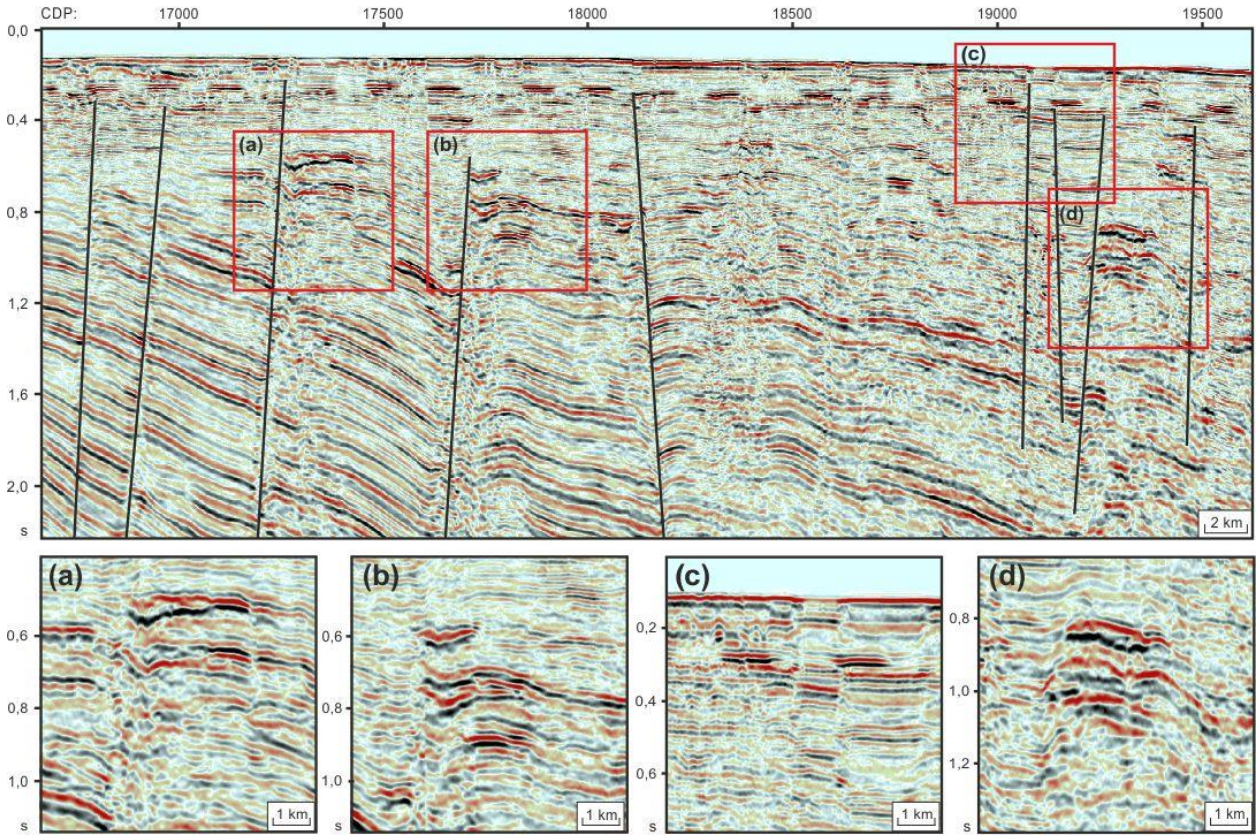
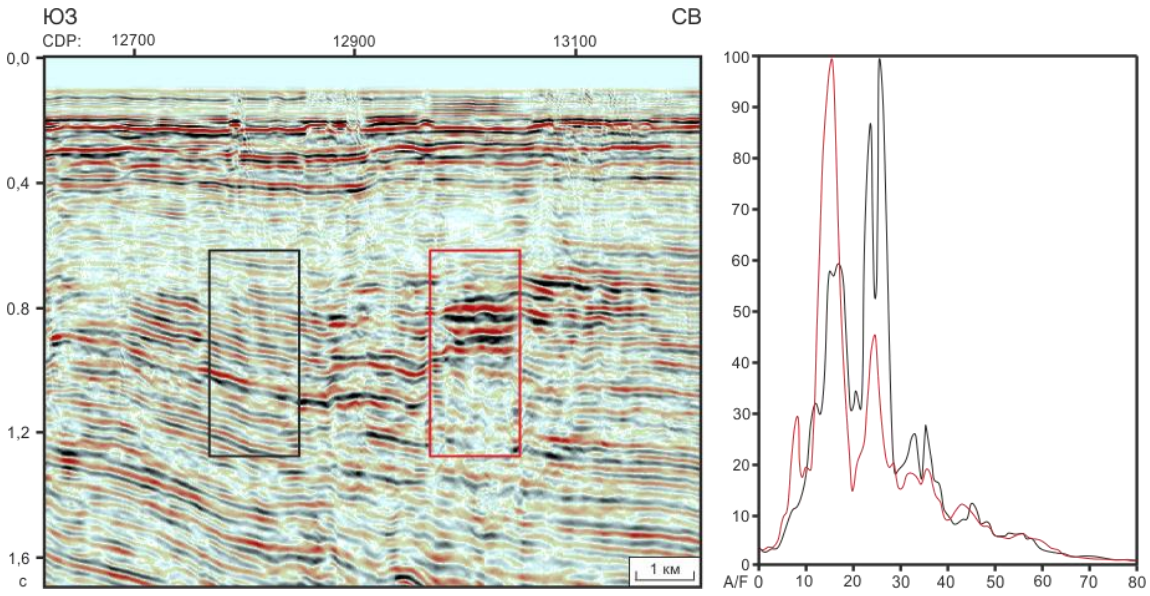


Рисунок 3.2 – Фрагмент временного разреза LS0924 МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых с аномальными объектами (положение – см. рисунок 2.1-c)

На фрагменте временного разреза LS0923 на времени 0,7 с выделяется аномальный объект с признаками 1, 4, 5 и 6 (рисунок 3.3a). Отличительной чертой у данного объекта, как и у аномалий на рисунке 3.2b, d, является наличие

горизонтальных рефлекторов, которые могут указывать на плоское пятно – возможный газоводяной контакт. На рисунке 3.3б проиллюстрирован один из признаков выделяемых аномалий – снижение частоты упругих волн. Представлены результаты сопоставления нормированных по максимальному значению амплитудно-частотных спектров (АЧС), рассчитанных в двух окнах: в зоне аномалии во временном интервале 0,68-1,3 с (красный цвет) и в зоне к юго-западу от аномалии в том же временном интервале (черный цвет). Спектры рассчитаны в программе SeiSee (ДМНГ). При сопоставлении спектров можно отметить, что при прохождении сейсмических волн через аномальный объект – предполагаемую газовую залежь, высокочастотные составляющие спектра теряются. На приведенном примере в зоне аномалии максимум АЧС смещается в сторону низких частот – с 25 до 16 Гц.



а) б)

Рисунок 3.3 – Фрагмент временного разреза LS0923 МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых с аномальным объектом (а) и рассчитанные в двух окнах АЧС (б) (положение – см. рисунок 2.1-d)

Две яркие аномалии типа «яркое пятно», указывающие на потенциальные залежи свободного газа, выявлены на разрезе LS0921 (рисунок 3.4). Объекты характеризуются признакам 1, 3, 4 и 5.

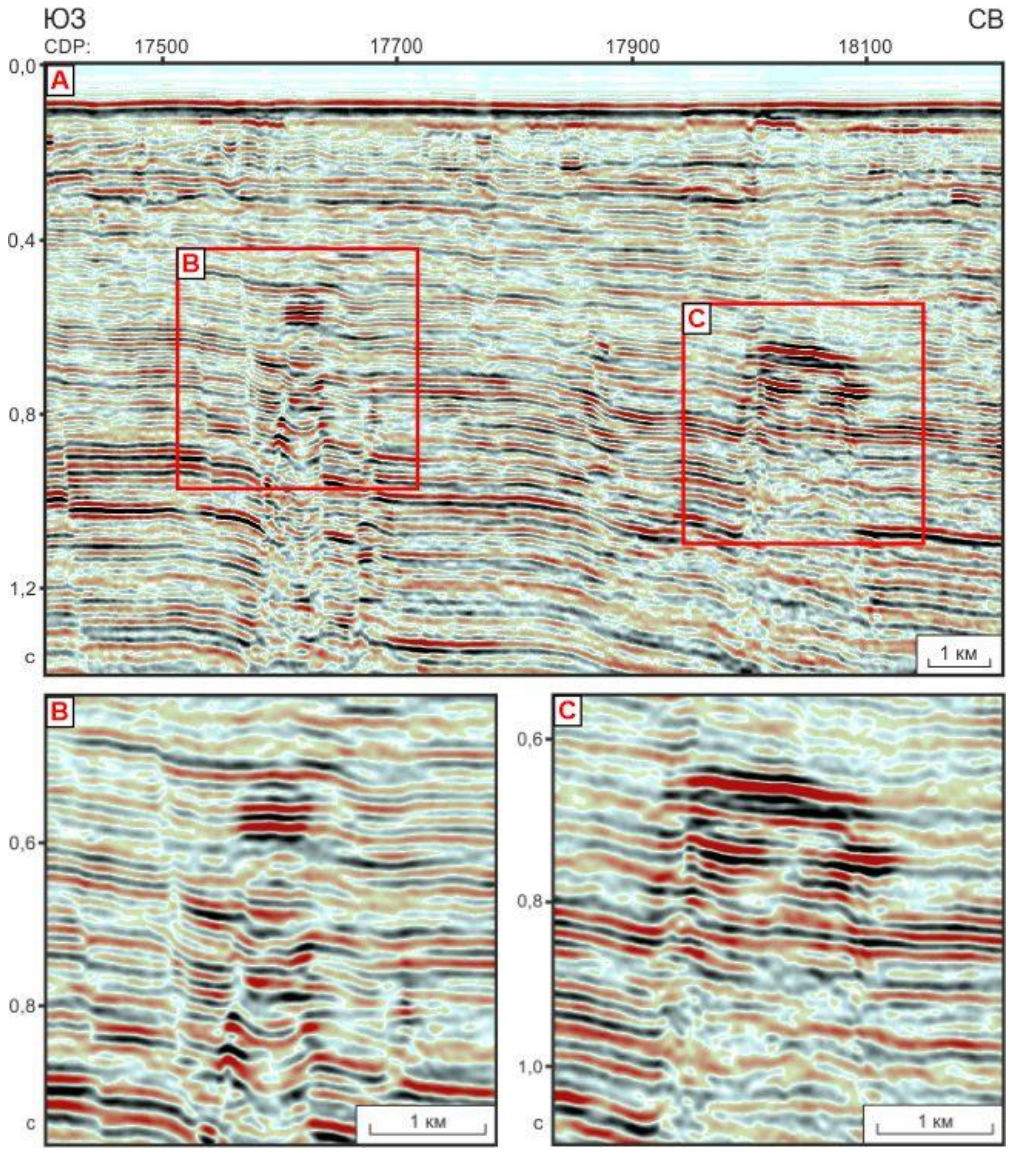


Рисунок 3.4 – Фрагмент временного разреза LS0921 МАГЭ в море Лаптевых (А) с аномальными объектами, показанными в увеличенном масштабе (B, C) (положение – см. рисунок 2.1-е)

На фрагменте разреза LS0914 наблюдаются широкие аномальные зоны, указывающие на газонасыщенность до поверхности осадочного чехла (рисунок 3.5).

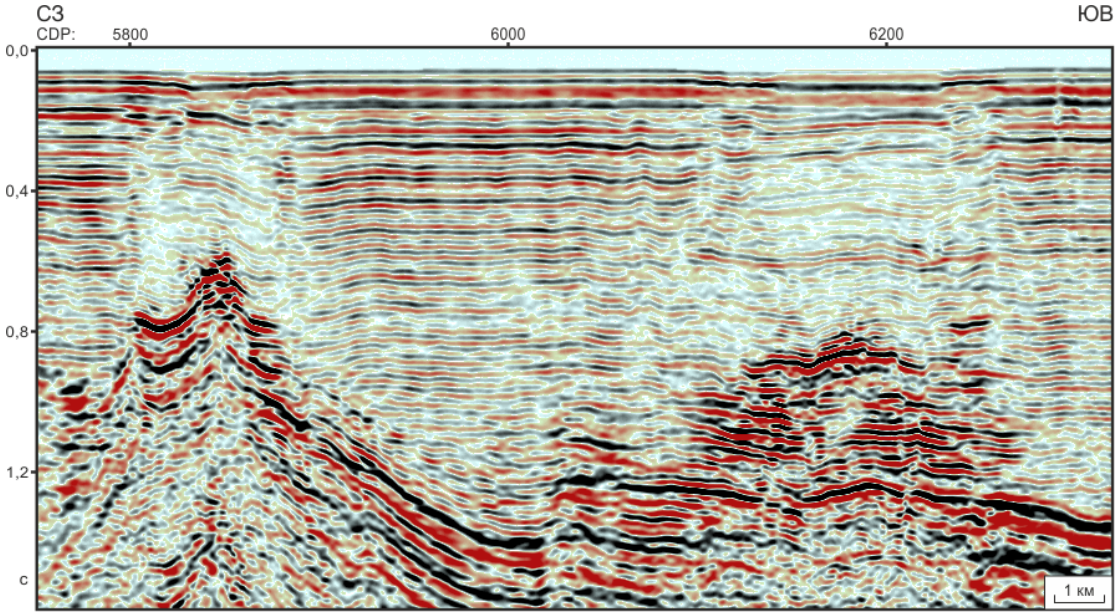


Рисунок 3.5 – Фрагмент временного разреза LS0914 в море Лаптевых с аномальными объектами (положение – см. рисунок 2.1-f)

Кроме аномалий, указывающих на потенциальные залежи газа, также отмечались субвертикальные участки нарушенной сейсмической записи, соответствующие возможным зонам миграции газа (рисунки 3.6, 3.7). Как показано на рисунках, эти зоны могут быть как широкими, так и весьма узкими.

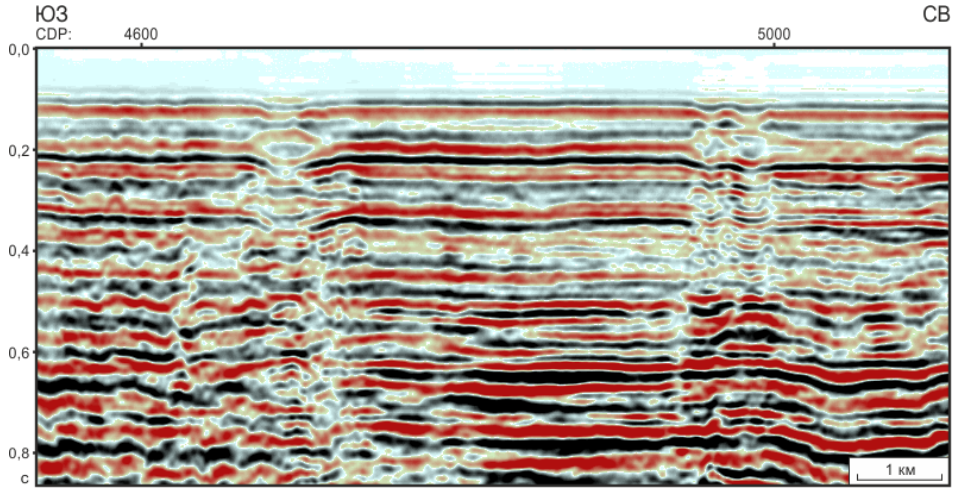


Рисунок 3.6 – Предполагаемые зоны миграции газа на фрагменте временного разреза LS0927 МАГЭ в море Лаптевых (положение – см. рисунок 2.1-g)

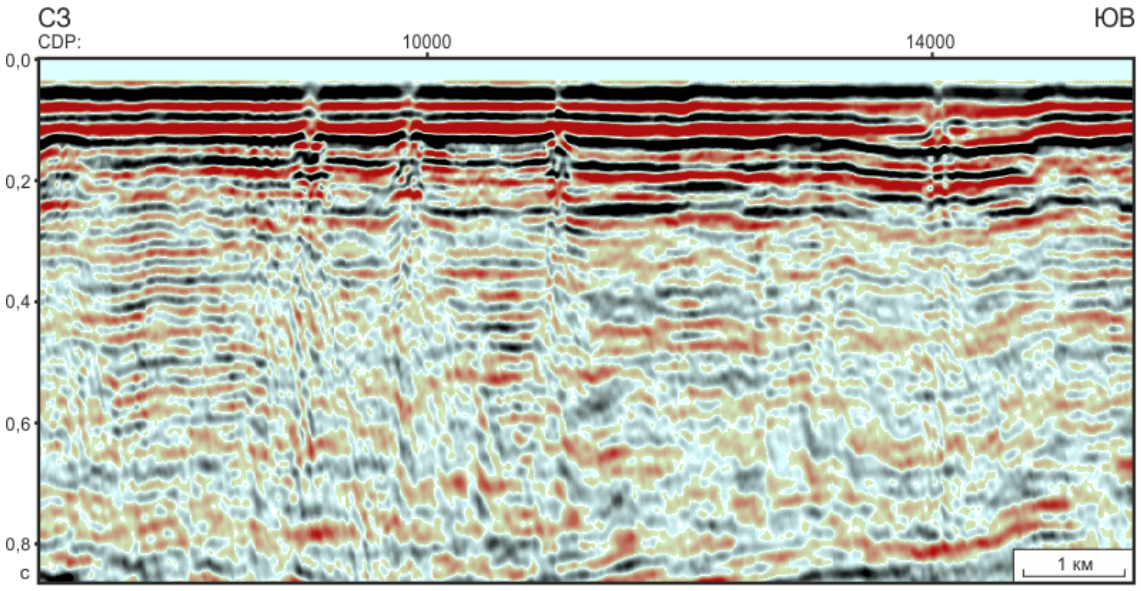


Рисунок 3.7 – Предполагаемые зоны миграции газа до дна на фрагменте временного разреза 200501 МАГЭ в море Лаптевых (положение – см. рисунок 2.1-h)

Понижения в рельефе дна, напоминающие покмарки, отмечены на разрезе LS0916 (рисунок 3.8). Кроме локальных прогибаний морского дна, под ними наблюдаются яркие отражения, указывающие на то, что под кратерами-покмарками, возможно, сформировались новые залежи газа, которые при накоплении в критическом объеме могут повторно вызвать выброс газа.

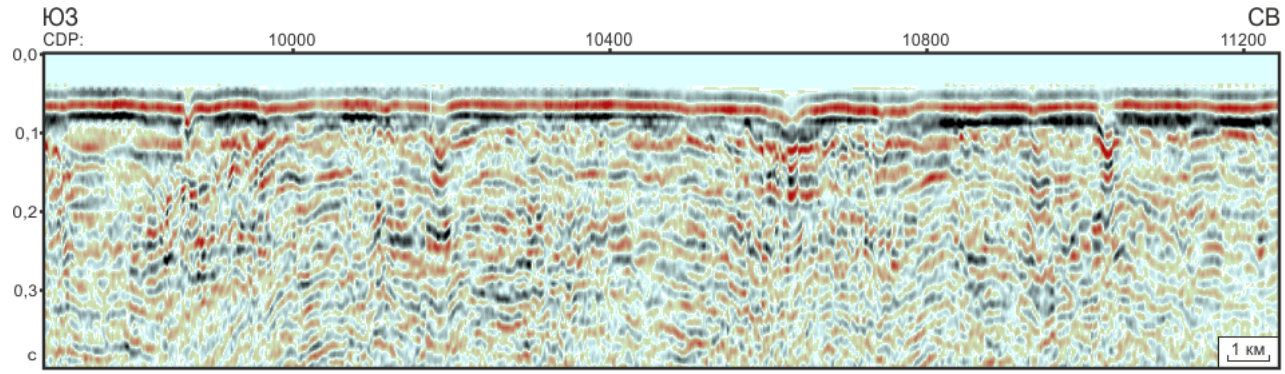


Рисунок 3.8 – Предполагаемые покмарки на фрагменте временного разреза LS0916 МАГЭ в море Лаптевых (положение – см. рисунок 2.1-i)

В ВЧР LS0923 (рисунок 3.9), в области континентального склона выделяется акустически прозрачная толща, в основании которой проявляется горизонт, примерно параллельный поверхности морского дна. Он прослеживается от бровки шельфа (пикет 20580, время 0,65 с) до северо-восточного окончания разреза. Полярность отраженных волн на данном горизонте обратная, по сравнению с границей между водной толщей и придонными отложениями. Кроме того, отмечаются интенсивные отражения под данным горизонтом. На увеличенном фрагменте видно сечение горизонтом слоистости отложений ВЧР. По выделенным признакам можно признать описанный горизонт как BSR, отделяющий залежи ГГ от расположенных ниже скоплений свободного газа.

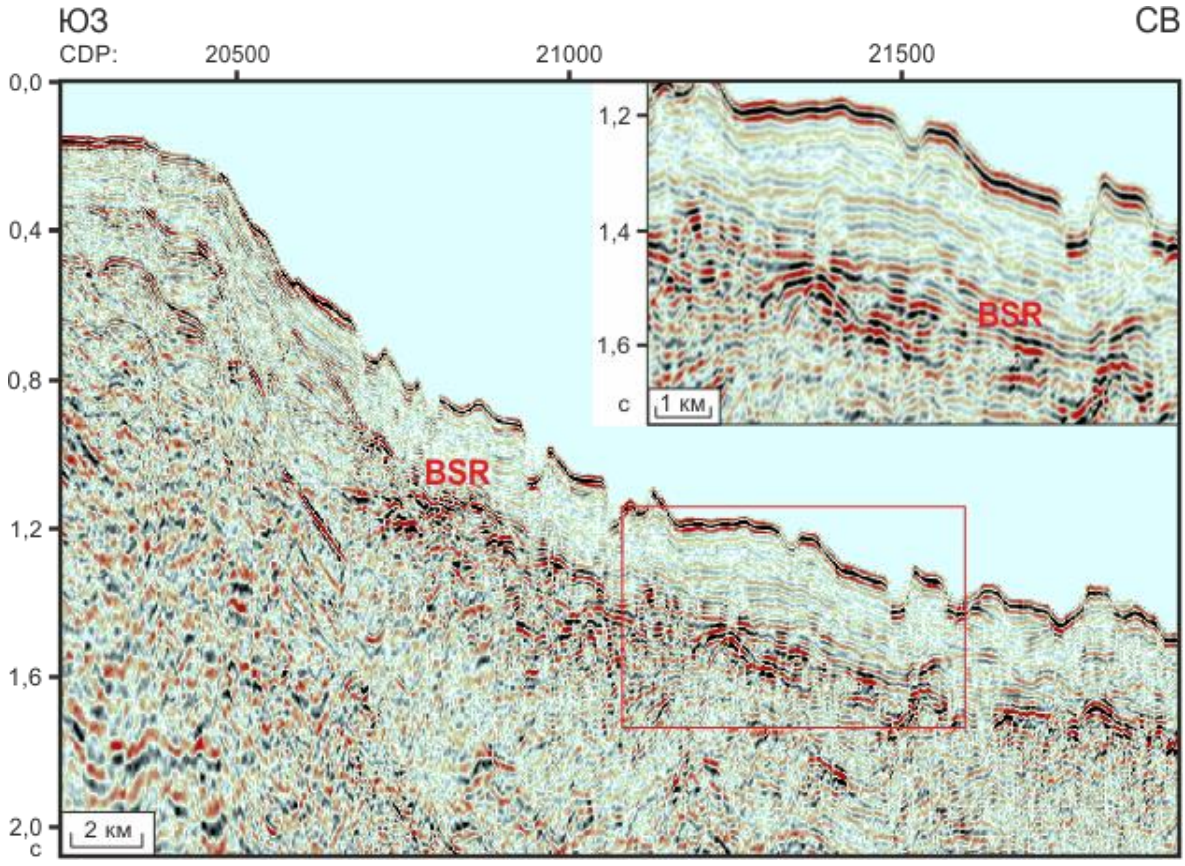


Рисунок 3.9 – Фрагмент временного разреза LS0923 МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых с горизонтом BSR (положение – см. рисунок 2.1-j)

На втором этапе изучения газонасыщенности ВЧР моря Лаптевых детально рассмотрена центральная часть акватории (Центрально-Лаптевский район), для

которой использованы все отработанные в 2009 г. профили МАГЭ. При этом было проанализировано 28 временных разрезов МОГТ общей длиной около 5930 км, из которых 8 разрезов общей протяженностью 1670 км проанализировано на первом этапе работы (рисунок 2.4).

Детальное изучение Центрально-Лаптевского района связано с открытием в данной части акватории обширной зоны интенсивных газовых сипов (см. раздел 2.1). Для этого района задача исследования состояла не только в изучении потенциальной газоносности ВЧР, но и в сопоставлении выявленных сейсмических аномалий с положением известных газовых сипов (Баранов и др., 2019; Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Steinbach et al., 2021), для анализа возможного источника газа, выходящего через морское дно.

В ходе анализа временных разрезов отдельно выделялись субвертикальные зоны нарушения прослеживаемости осей синфазности отраженных волн, указывающие на потенциальные каналы миграции газа (газовые трубы – gas chimneys, gas pipes) (Cartwright et al., 2007; Judd, Hovland, 2007).

Сопоставление положений сипов газа и сейсмопрофилей показало, что в ряде случаев сипы оказались вблизи профилей или практически прямо на них (см. рисунок 2.4). На рисунке 3.10 показан пример сопоставления сейсмических аномалий на фрагменте временного разреза LS0910 с сипами, спроецированными на линию профиля. На пикете ОГТ 1000 (рисунок 3.10А) сип расположен в 0,4 км от профиля и находится на уровне разлома, доходящего до поверхности морского дна, по которому, газ мог мигрировать с различных стратиграфических уровней. На пикетах 1600-1800 находится зона с высокой концентрацией газовых сипов (рисунок 3.10В), выделенных в работе (Baranov et al., 2020). Данный участок корреспондируется с вертикальной зоной нарушенного сейсмического сигнала, наиболее вероятно, обусловленной миграцией глубинного газа. На морском дне в месте высокой концентрации сипов газа наблюдается поднятие (PLF), возможно, сформировавшееся под давлением газа, скапливающегося в придонных отложениях.

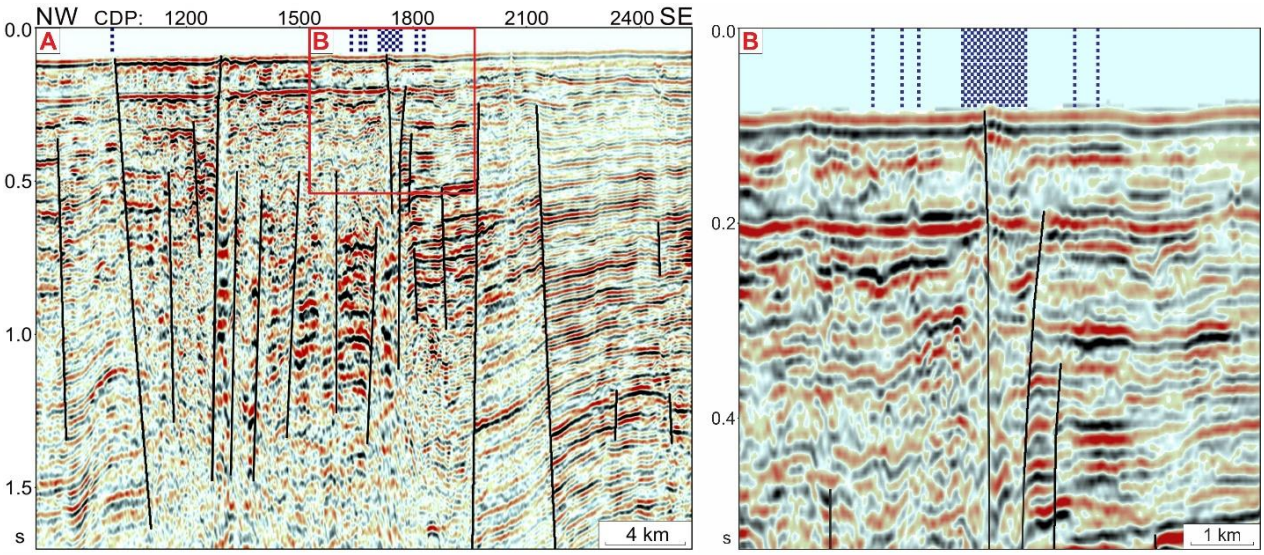


Рисунок 3.10 – Фрагмент временного разреза LS0910 (A) МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых с увеличенными объектами (B и C) (положение – см. рисунок 3.18-F1). Синие пунктирные линии – проекции сипов газа

На рисунке 3.11 приведен фрагмент временного разреза LS0912 длиной 57 км со спроецированными на него положениями сипов. На фрагменте разреза указаны расстояния сипов от профиля (в километрах) и направления их удаления. На пикете 4700 сип находится рядом с разломом, доходящим до морского дна (рисунок 3.11B). Справа от разлома (пикеты 4900-5200) наблюдается аномалия с признаками газонасыщения 1, 2 и 4, из данной потенциальной залежи газ может мигрировать к поверхности осадочного чехла по разлому и формировать сип. Кроме того, разломы, идущие с больших глубин, отмечены в районе пикетов 5200-5300. Наиболее глубокий из этих разломов на времени 1,4-2,1 с пересекает зону нарушенной сейсмозаписи – газовую трубу, вероятно, являющуюся каналом миграции газа. Таким образом, по этой зоне и ближайшим разломам газ мог мигрировать к описанной выше залежи из более глубоких стратиграфических уровней. Также над данной потенциальной залежью на пикетах 4900 и 5200 выделяются вертикальные зоны ослабленного сигнала, которые могут являться потенциальными каналами вертикальной миграции газа из залежи к морскому дну.

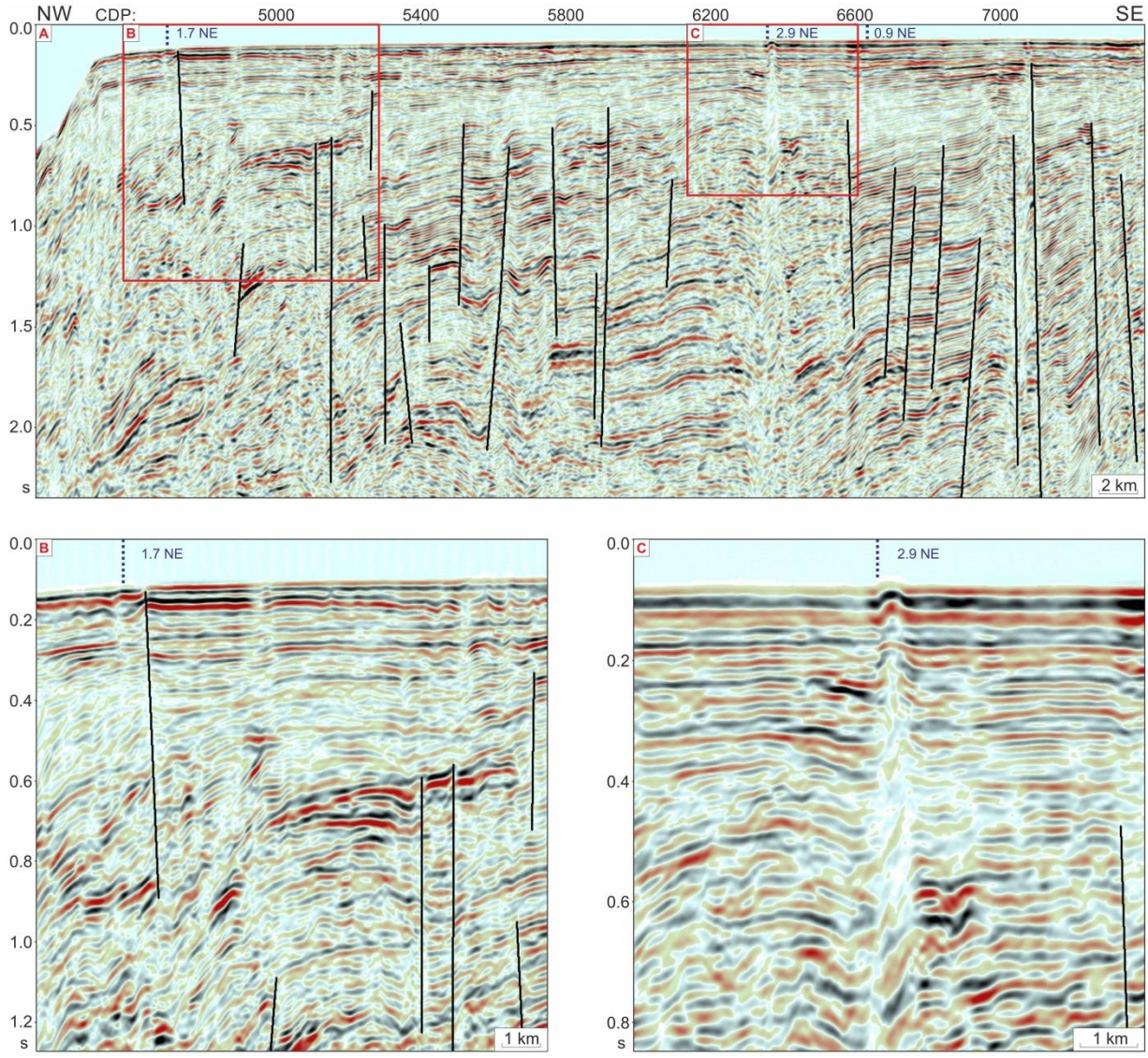


Рисунок 3.11 – Фрагмент временного разреза LS0912 (A) МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых с увеличенными объектами (B и C) (положение – см. рисунок 3.18-F2). Синие пунктирные линии – проекции сипов газа

На временном разрезе LS0912 на пикете 6400 на поверхности морского дна в районе сипа наблюдается поднятие (PLF), вероятно, газодинамического генезиса, ниже видны нарушения осей синфазности и ослабленные амплитуды отражений (рисунок 3.11C). Данные признаки указывают на возможный субвертикальный канал миграции газа. Искривления осей синфазности слева и справа от субвертикальной зоны нарушения сигнала идут плавно вниз, а затем круто вверх, что может указывать на кальдеру проседания и жерло грязевого вулкана соответственно. Таким образом, можно предполагать, что поднятие в рельефе дна

на рисунке 3.11С – грязевулканическая постройка, а сам вулкан является каналом миграции газа из осадочного чехла в гидросферу.

На фрагменте временного разреза LS0922 длиной 35 км сипы находятся над широкой антиклиналью, нарушенной разрывными нарушениями (рисунок 3.12). На пикете 5800 сип находится между двумя разломами, доходящими до придонных отложений. На пикетах 5600-5700 на времени 0,6-0,83 с выделяется аномальный объект с признаками 1, 2, 4, 5 и 6, из которого газ может перетекать по разлому к поверхности морского дна.

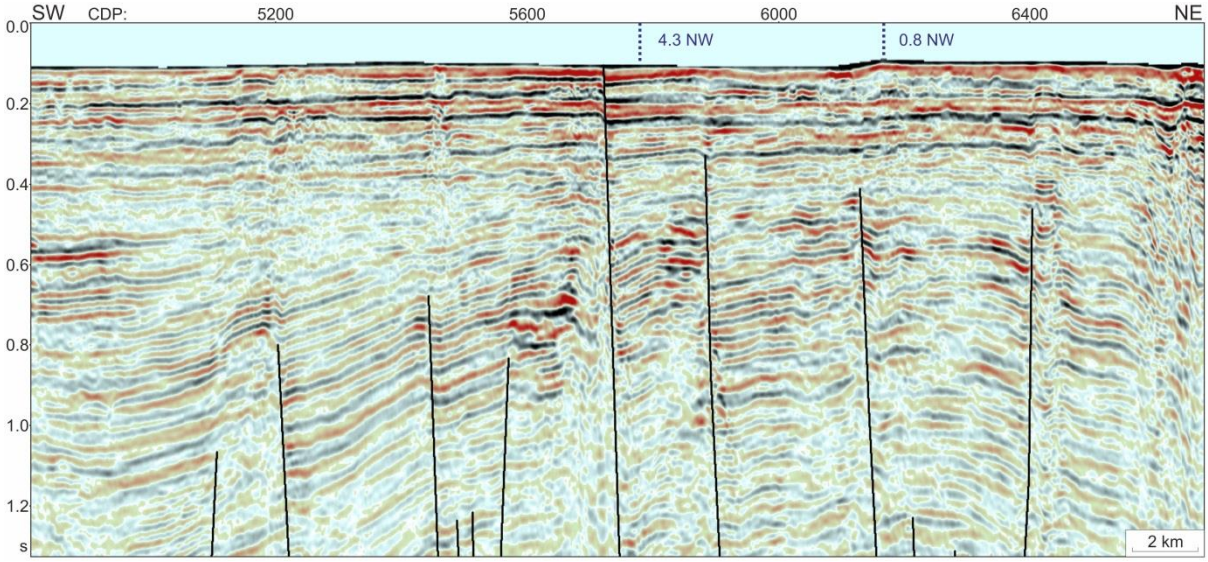


Рисунок 3.12 – Фрагмент временного разреза LS0922 МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых (положение – см. рисунок 3.18-F3). Синие пунктирные линии – проекции сипов газа

На фрагменте временного разреза LS0919 длиной 21 км сип находится над узкой вертикальной зоной нарушенной записи (рисунок 3.13). Данная зона приурочена к разлому, доходящему до поверхности осадочного чехла. В верхней части газовой трубы, у морского дна, наблюдается аномальный объект с признаками 1 и 3, который может соответствовать небольшой газовой залежи.

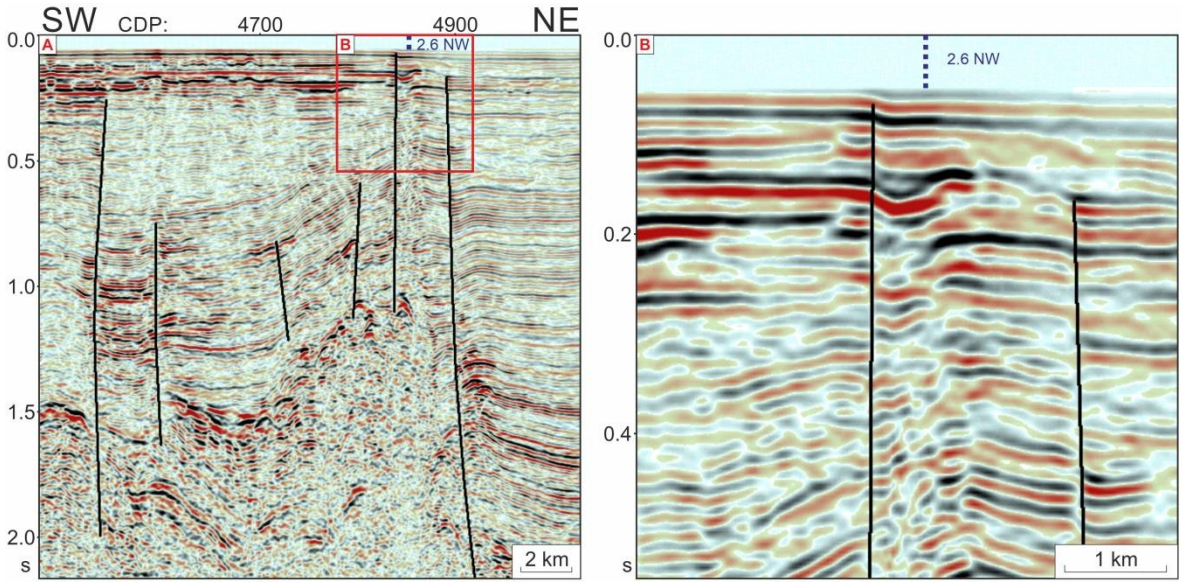


Рисунок 3.13 – Фрагмент временного разреза LS0919 (A) МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых с увеличенным объектом (B) (положение – см. рисунок 3.18-F4). Синие пунктирные линии – проекции сипов газа

На рисунке 3.14 показано сопоставление фрагмента временного разреза LS0913 с участком высокой концентрации сипов, который находится практически на линии профиля. В месте интенсивной эмиссии газа наблюдается аномальный объект с повышенной амплитудой отражения и поглощением сигнала ниже по разрезу, что может объясняться наличием газонасыщенного объекта непосредственно под морским дном, из которого газ выходит на поверхность. Справа и слева от аномалии наблюдаются объекты со схожими характеристиками.

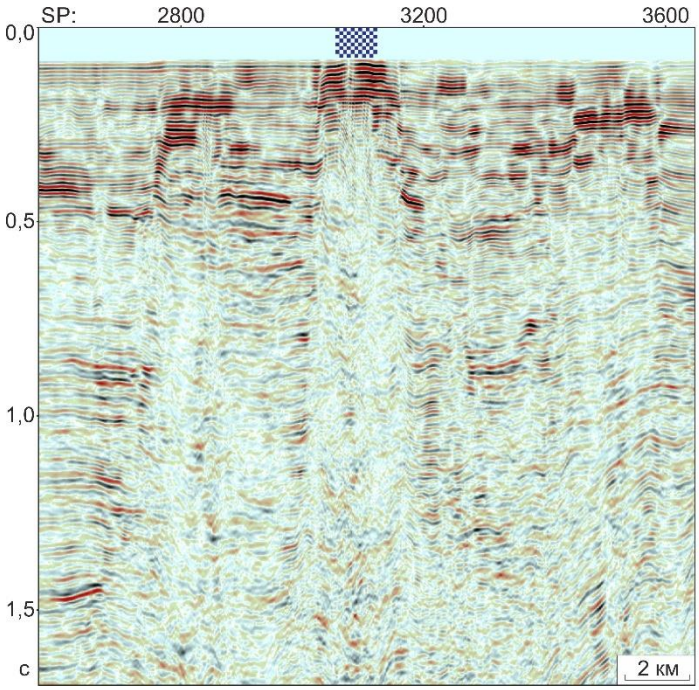


Рисунок 3.14 – Фрагмент временного разреза LS0913 МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых (положение – см. рисунок 3.18-F5). Синие пунктирные линии – проекции сипов газа

Также в Центрально-Лаптевском районе на ряде профилей выделен горизонт BSR, указывающий на возможное наличие ГГ. На композитном временном разрезе по двум профилям LS0924 и LS0912, пересекающимся на континентальном склоне (рисунок 3.15), видна четкая взаимная увязка отражающих горизонтов, включая BSR. Кроме того, на разрезе наблюдаются характерные поднятия в рельефе морского дна (LS – landslide), образовавшиеся в результате оползания придонных отложений на континентальном склоне. При этом углы наклона дна меняются от 1,3 до 7,4°.

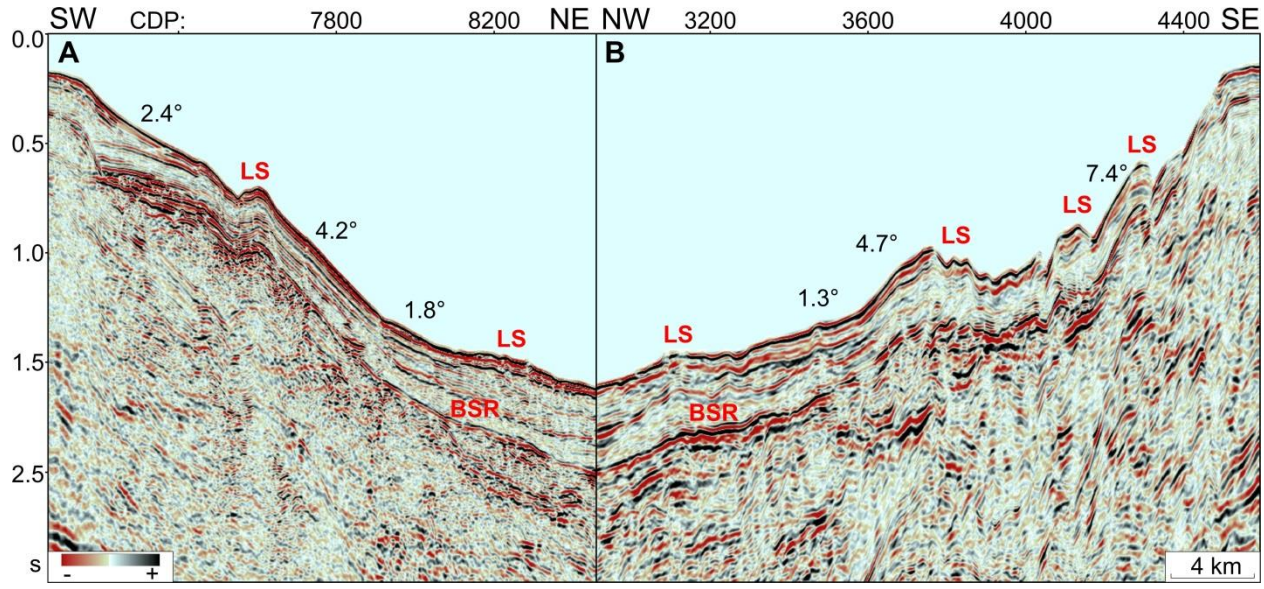


Рисунок 3.15 – Монтаж фрагментов временных разрезов LS0924 (A) и LS0912 (B) МАГЭ (с дополнениями автора) в море Лаптевых (положение – см. рисунок 3.18-F6A, F6B). Обозначения: BSR - псевдодонный отражающий горизонт, LS – оползни, цифры с градусами – углы наклона дна

3.1.2. Результаты и обсуждение

Всего в результате анализа имевшихся временных разрезов МОГТ по морю Лаптевых общей длиной 3550 км (первый этап исследований), выделено 230 аномалий, указывающих на потенциально газонасыщенные объекты. Расположение выделенных объектов в районе исследования показано на рисунке 3.16. Среднее расстояние между аномалиями составило около 15,4 км. Горизонт BSR был выделен на четырех разрезах, проходящих в области континентального склона (Богоявленский и др., 2018а, б; Kishankov, 2018).

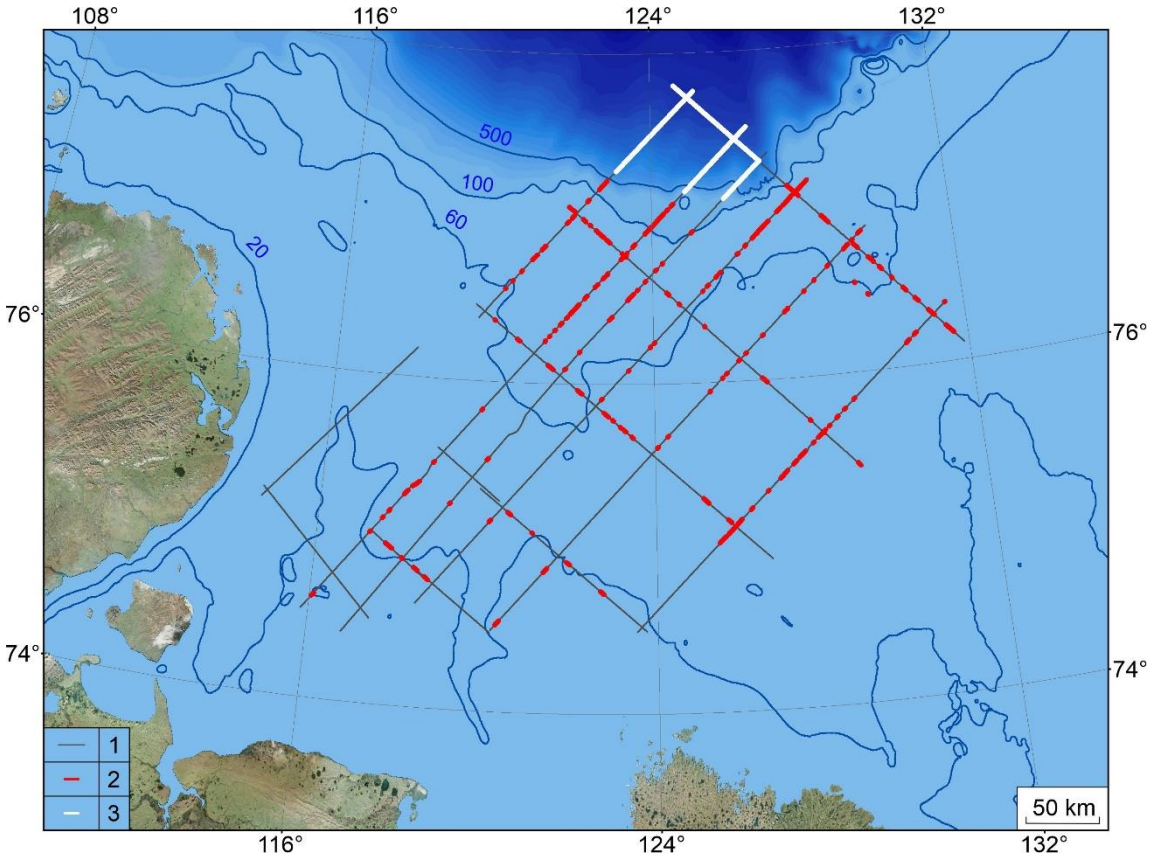
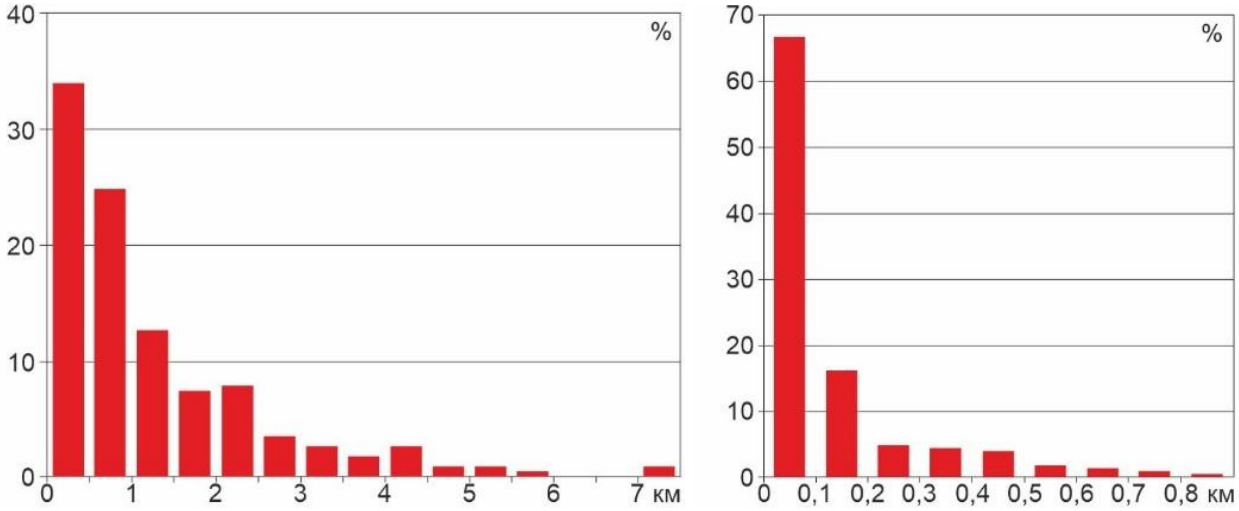


Рисунок 3.16 – Расположение прогнозируемых газонасыщенных объектов (2) и горизонта BSR (3) на исследованных сейсмопрофилях МАГЭ (1) в море Лаптевых. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

На рисунке 3.17 приведены диаграммы, представляющие модели распределения газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б). Большинство объектов имеют размеры до 2,5 км (86,5 %), при этом менее 0,5 км - 33,9 %. Большая часть объектов (82,6 %) имеет верхнюю границу газонасыщения на глубинах до 200 м. Максимальное количество (66,5 %) находится в интервале 0-100 м.



а) б)

Рисунок 3.17 – Распределение прогнозируемых газонасыщенных объектов в ВЧР моря Лаптевых по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б)

Полученное глубинное распределение потенциально газонасыщенных объектов предположительно связано с большим количеством разрывных нарушений – потенциальных каналов миграции газа, многие из которых доходят до придонных отложений вплоть до морского дна. Как было сказано выше, рифтогенез в море Лаптевых начался в позднем мелу, и в миоцене-плейстоцене произошла повторная активизация рифтогенеза. Акватория и в настоящее время характеризуется активной сейсмичностью, что связано с продолжением на акватории зон растяжения от хребта Гаккеля к континенту (Аветисов, 2000, 2002). Также полученное распределение свидетельствует о наличии в ряде мест в придонных отложениях ВЧР (глубины до 200 м) в разной степени герметичных покрышек, полностью или частично не нарушенных разломами. Кроме того, высокая концентрация газонасыщенных объектов в придонных отложениях может быть связана с генерацией микробиального газа in situ.

На втором этапе работы в Центрально-Лаптевском районе при анализе 5930 км сейсмопрофилей выделено 519 аномальных объектов со средним шагом 11,4 км (рисунок 3.18). Среди данных объектов 199 уже были выделены на первом

этапе работы по профилям, находящимся в Центрально-Лаптевском районе (рисунок 3.16). Большинство объектов находится на глубинах до 200 м от поверхности осадочного чехла, что согласуется с распределением аномалий по всему району исследования, описанным выше, и объясняется присутствием активных систем разломов, многие из которых доходят до ВЧР и поверхности морского дна. Также установлена приуроченность известных сипов газа в ЦЛЗСГ (Баранов и др., 2019; Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Steinbach et al., 2021) к глубинным разломам – потенциальным проводникам газа к ВЧР из нефтегазоматеринских толщ и/или сформированных месторождений. На рисунке 3.18 показано распространение разломов по кровле фундамента, ранее выявленных специалистами МАГЭ (Кириллова-Покровская, 2017).

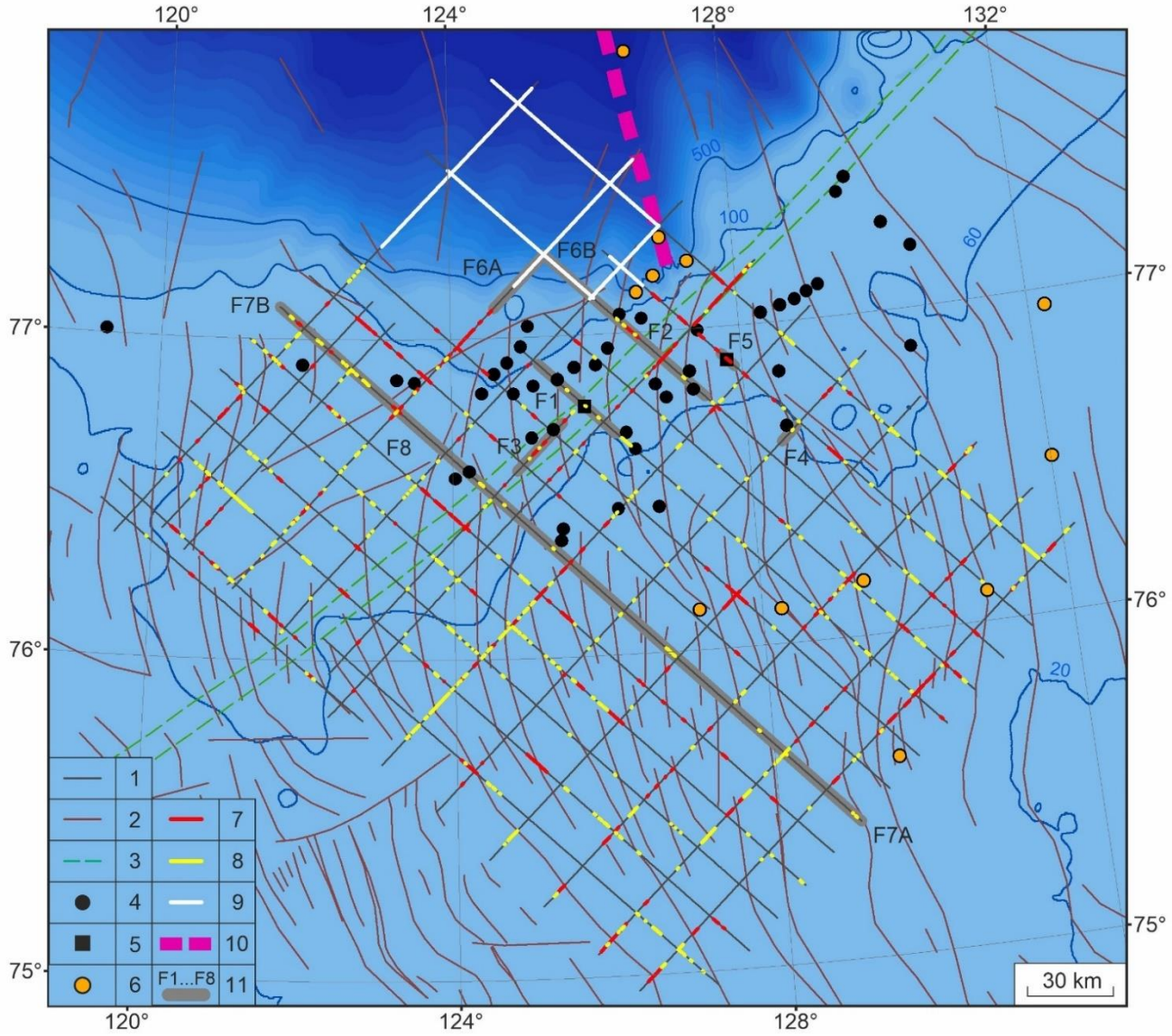


Рисунок 3.18 – Положение сипов газа, аномальных объектов в ВЧР и разломов, выделенных на временных разрезах МАГЭ в море Лаптевых. Обозначения: 1 – сейсмопрофили МОГТ; 2 – разрывные нарушения (Кириллова-Покровская, 2017); 3 – Хатангско-Ломоносовская зона разломов (Шипилов и др., 2019, 2020); 4 и 5 – сипы газа (Баранов и др., 2019; Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Steinbach et al., 2021), в том числе участки с высокой концентрацией сипов газа (5); 6 – места повышенной концентрации метана в придонной воде; 7 – аномальные объекты, отождествляемые с залежами свободного газа в ВЧР; 8 – сейсмические аномалии, указывающие на возможные пути миграции газа; 9 – горизонт BSR; 10 – положение погребенной зоны спрединга хребта Гаккеля (Drachev et al., 2010); 11 – участки сейсмопрофилей, приведенные на рисунках 3.10-3.15 (F1-F6), 4.2 (F8), пункты взрыва сейсмограмм, приведенных на рисунке 4.1 (F7)

Касательно генезиса газа необходимо отметить следующее. Мигрирующий по разломам газ может быть как термогенным, так и биогенным (микробиальным). Присутствие термогенного газа прогнозируется с высокой вероятностью ввиду большого количества глубинных разломов и значительной мощности (до 14-16 км) осадочного чехла (Кириллова-Покровская, 2017; Богоявленский и др., 2021а). Тем не менее, присутствие биогенного газа также возможно, поскольку он может генерироваться на глубинах до нескольких сотен метров от поверхности осадочного чехла (Tissot, Welte, 1984). Однако по морю Лаптевых имеются данные изотопных анализов углерода метана $\delta^{13}C$ (CH_4), которые указывают на превалирование в сипах термогенного газа (Cramer, Franke, 2005; Steinbach et al., 2021 и др.). В большинстве исследований (Cramer, Franke, 2005) в придонных осадках и сипах был обнаружен термогенный метан с $\delta^{13}C$ (CH_4) от -43‰ до -37‰. По данным (Cramer, Franke, 2005), углеводородные газы представлены метаном (79,7-86,1%), этаном (9,2-12,7%), пропаном (4,3-7,6%). Анализы газа из ряда сипов в Центрально-Лаптевском районе (Steinbach et al., 2021) также выявили его термогенное происхождение ($\delta^{13}C$ (CH_4) от -55‰ до -42,6‰). Вероятно, значительная часть объемов биогенного газа придонных отложений мигрировала по разломам в водную толщу на начальных стадиях деградации ММП и диссоциации ГГ или даже раньше, чему способствовали интенсивные потоки термогенного газа.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ключевую роль в эмиссии газа в ЦЛЗСГ играют многочисленные разломы и значительные объемы УВ термогенного происхождения в мощном (до 14-16 км) осадочном чехле акватории, а не разлагающиеся ГГ при деградации ММП, которые, как показано в разделе 4, отсутствуют (Богоявленский и др., 2021б, в; Bogoyavlensky et al., 2021b, 2022). Тем не менее, стоит отметить, что у берега моря Лаптевых, особенно у дельт впадающих в него рек, метан в придонных отложениях характеризуется, в основном, бактериальным происхождением, что объясняется современным накоплением больших объемов ОВ, приносимого с материка. В частности,

результаты анализа изотопного состава углерода метана $\delta^{13}C$ (CH_4) выявили биогенный газ в районе дельты Лены в заливе Буор-Хая (Sapart et al., 2017).

Следует отметить, что возможность миграции глубинного газа по разломам в ЦЛЗСГ ранее допускалась в исследованиях (Анисимов и др., 2014; Баранов и др., 2019; Лобковский и др., 2015; Сергиенко и др., 2012), однако эта возможность представлялась на уровне гипотез и не подтверждалась данными интерпретации временных разрезов.

Важным обстоятельством, объясняющим наличие интенсивных сипов газа, является расположение ЦЛЗСГ в зоне сочленения Лаптевоморской рифтовой системы с Хатангско-Ломоносовской зоной разломов и хребтом Гаккеля, что обуславливает активные сейсмотектонические процессы в этом районе, в обстановке преимущественного регионального напряжения растяжения (Богоявленский и др., 2021б, в; Пискарев и др., 2016; Bogoyavlensky et al., 2022). В районе ЦЛЗСГ происходят землетрясения с магнитудой до 3-6 и даже 6,7 в 1964 г. в 110 км к северу от сипов (78,04° N, 126,56° E), которые усиливают конвективный тепловой поток и увеличивают проницаемость разломов для газа. Связь сипов с сейсмическими событиями была установлена ранее для Охотского моря (Обжиров и др., 2012; Шакиров, 2015).

Кроме того, в зоне спрединга хребта Гаккеля присутствуют периодически извергающиеся стратовулканы (Пискарев и др., 2016), с которыми также связаны сильные землетрясения. Особый интерес вызывает гигантская (примерно 50х105 км) впадина, находящаяся в 470 км к северу от ЦЛЗСГ на хребте Гаккеля (координаты центра – 81,517° N, 120,0° E). Данная впадина, с точки зрения генезиса, определяется как кальдера супервулкана, образовавшаяся при сверхмощном извержении около 1,1 млн лет назад (Пискарев и др., 2016). Масштабное извержение данного супервулкана наряду с землетрясением и напряжением растяжения могло иметь большое значение для формирования сети разломов с высокой проницаемостью.

Исходя из установленной в настоящем разделе связи сипов с глубинными каналами миграции, можно сделать высоковероятное заключение, что в ЦЛЗСГ имеется большое количество сипов, в которых активность эмиссии газа зависит от интенсивности сейсмотектонических процессов. Можно с высокой степенью вероятности утверждать, что на настоящий момент в работах (Баранов и др., 2019; Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Steinbach et al., 2021) открыты и опубликованы не все существующие сипы в ЦЛЗСГ.

В связи с происходящими процессами окисления и рассеивания метана в водной толще, незначительный объем метана, выделяющегося через морское дно, попадает в атмосферу (Ruppel, Kessler, 2017; Sparrow et al., 2018). Однако в определенных областях с интенсивными потоками глубинного газа (таких, как ЦЛЗГС) он может в меньшей степени подвергаться указанным процессам, что повышает вероятность попадания метана в атмосферу.

При исследовании Центрально-Лаптевского района также был выделен горизонт BSR на шести разрезах, пересекающих континентальный склон (рисунок 3.18), что позволило уточнить область потенциального распространения ГГ в глубоководной части моря Лаптевых, определенную на первом этапе работы (рисунок 3.16).

3.2. Восточно-Сибирское море

3.2.1. Анализ временных разрезов МОГТ

Анализ временных разрезов МОГТ МАГЭ в Восточно-Сибирском море проводился по двум районам – Восточно-Сибирскому и Де-Лонга (см. рисунок 2.5 – ES и DL). Общая длина профилей составляла около 8200 км. Полевые работы проводились на площади ES в 2016 г. с НИС «Николай Трубятчинский», а на площади DL – в 2011-2012 г. с НИС «Геолог Дмитрий Наливкин». На обеих площадях использовалась сейсмическая коса с длиной активной части 8100 м (648

каналов с шагом с 12,5 м), минимальная кратность наблюдений – 120, длина записи – 12 с.

На рисунке 3.19 показан фрагмент временного разреза ESS1607 с примером выделенного аномального объекта (потенциальные многопластовые газовые залежи) на временах 0,6-0,7 с, с признаками 1, 2 и 3 – повышенной амплитудой, инвертированным сигналом, по сравнению с морским дном, прогибанием отражающих горизонтов. При этом видно, что объект приурочен к разлому, по которому, вероятно, газ мигрировал к ВЧР из глубинных нефтегазоматеринских толщ или залежей.

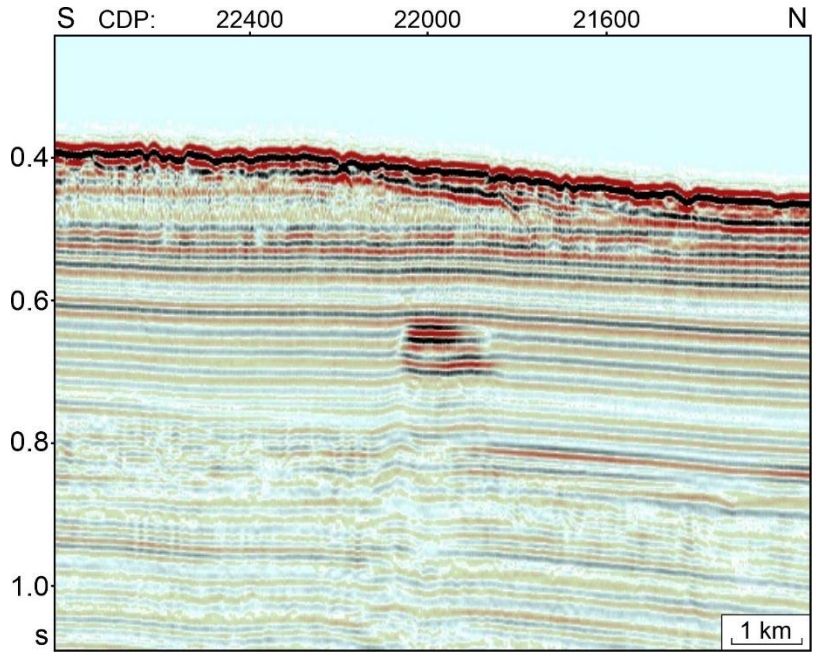


Рисунок 3.19 – Фрагмент временного разреза ESS1607 МАГЭ в Восточно-Сибирском море с аномальным объектом в ВЧР (положение – см. рисунок 2.5-а)

Рисунок 3.20 также демонстрирует приуроченность выделенных потенциальных газовых залежей на глубинах около 500-900 м к разрывным нарушениям. Показанные аномалии характеризуются признаками 1, 3, 4 и 5 – повышенными амплитудами, прогибаниями отражающих горизонтов, пониженными частотами, зонами тени под аномалиями. Стоит отметить, что аномалии расположены близко по глубине к акустическому фундаменту

(консолидированным породам), что указывает на возможность существования в нем (или прямо над ним) залежей УВ.

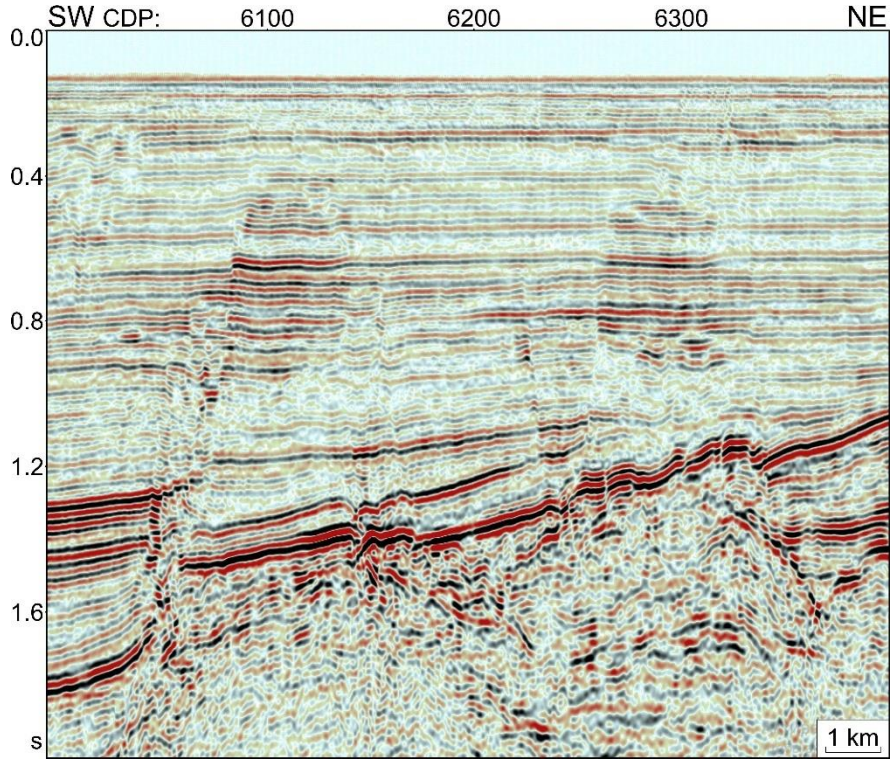


Рисунок 3.20 – Фрагмент временного разреза DL1213 МАГЭ в Восточно-Сибирском море с аномальными объектами (положение – см. рисунок 2.5-b)

На рисунке 3.21 наблюдается ряд аномальных высокоамплитудных объектов, наиболее примечательным из которых является объект на пикете 19600 с признаками газонасыщения 1, 2, 3 и 4. Под аномалией видна зона с хаотическим сигналом – возможный канал миграции. Данный объект имеет подобие с амплитудно-скоростными аномалиями VAMP (velocity-amplitude), соответствующими залежам свободного газа, экранируемым ГГ, которые широко распространены в Беринговом море (см. раздел 3.4.2). Однако в настоящем случае практически не проявляется выгибание вверх кровли предполагаемых ГГ, типичное для данного типа аномалий.

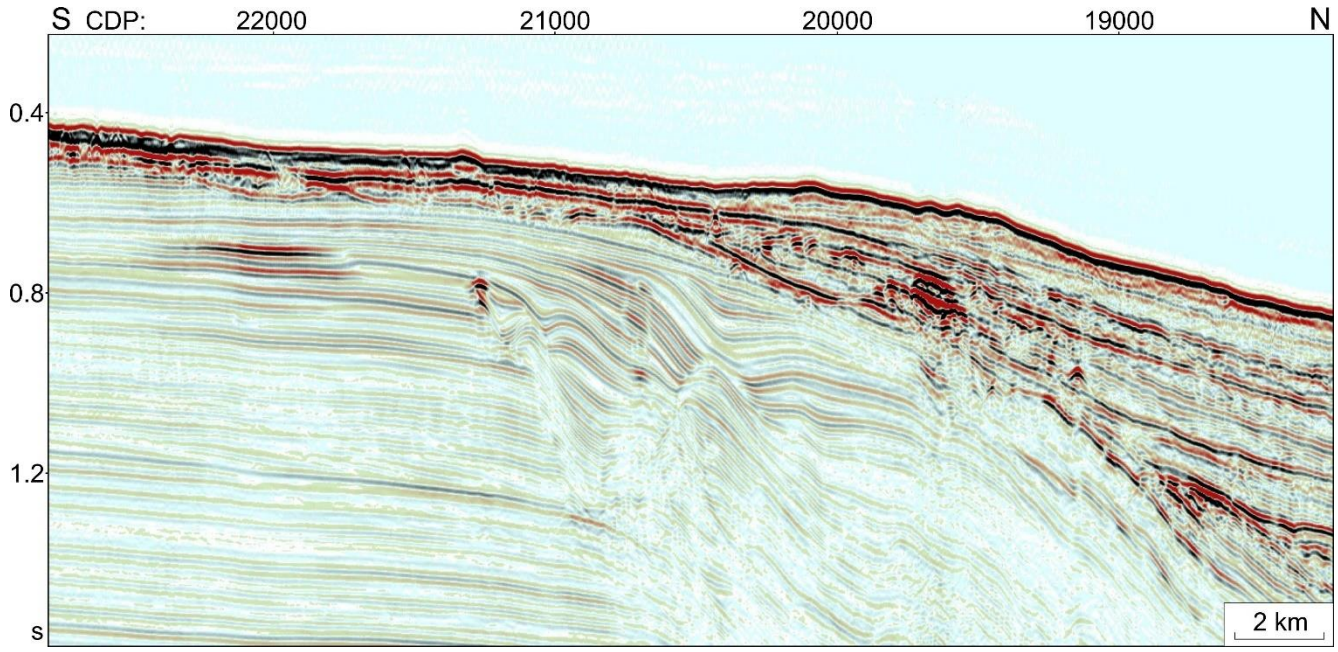


Рисунок 3.21 – Фрагмент временного разреза ESS1608 МАГЭ в Восточно-Сибирском море с аномальными объектами (положение – см. рисунок 2.5-с)

На рисунке 3.22 показана широкая вертикальная зона с хаотическим сигналом – газовая труба. Над трубой, на временных отметках 0,2-0,5 с прослеживаются разрывные нарушения, причем одно из них (пикет 8580), видимо, доходит до поверхности морского дна. Можно предполагать, что газ из данного канала дегазации выходит по разлому на поверхность, образуя сип. Газовая труба проходит через кровлю акустического фундамента, таким образом, как и по рисунку 3.20, можно предполагать существование в нем источников УВ.

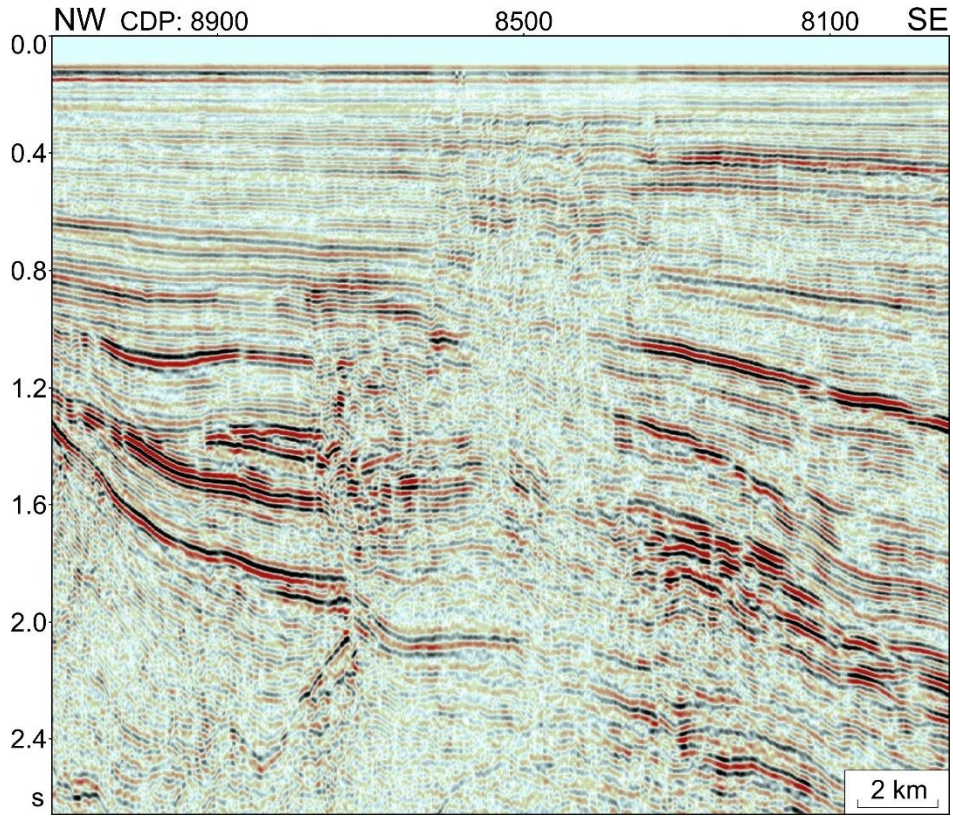


Рисунок 3.22 – Фрагмент временного разреза DL1101 МАГЭ в Восточно-Сибирском море с газовой трубой (положение – см. рисунок 2.5-d)

3.2.2. Результаты и обсуждение

Всего в ходе исследований по районам Восточно-Сибирскому и Де-Лонга было выявлено 129 аномалий, указывающих на потенциально газонасыщенные объекты (рисунок 3.23). Среднее расстояние между аномалиями составило около 63,6 км.

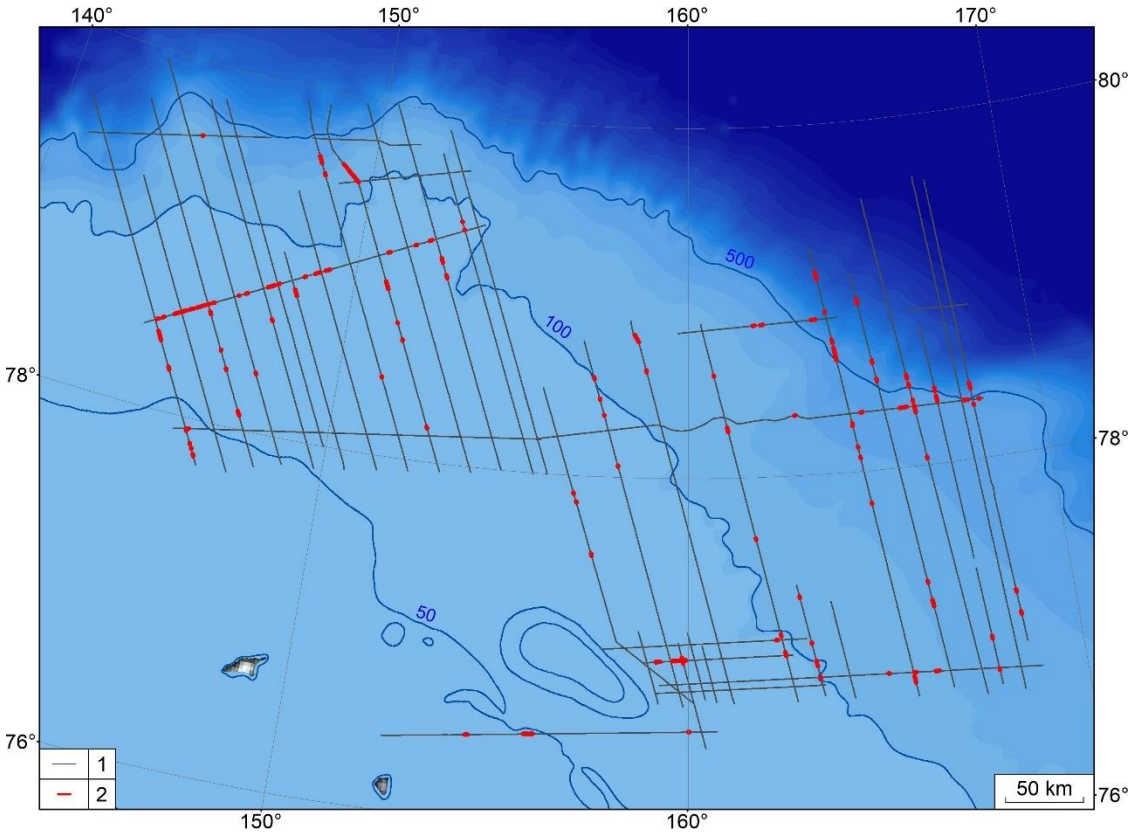
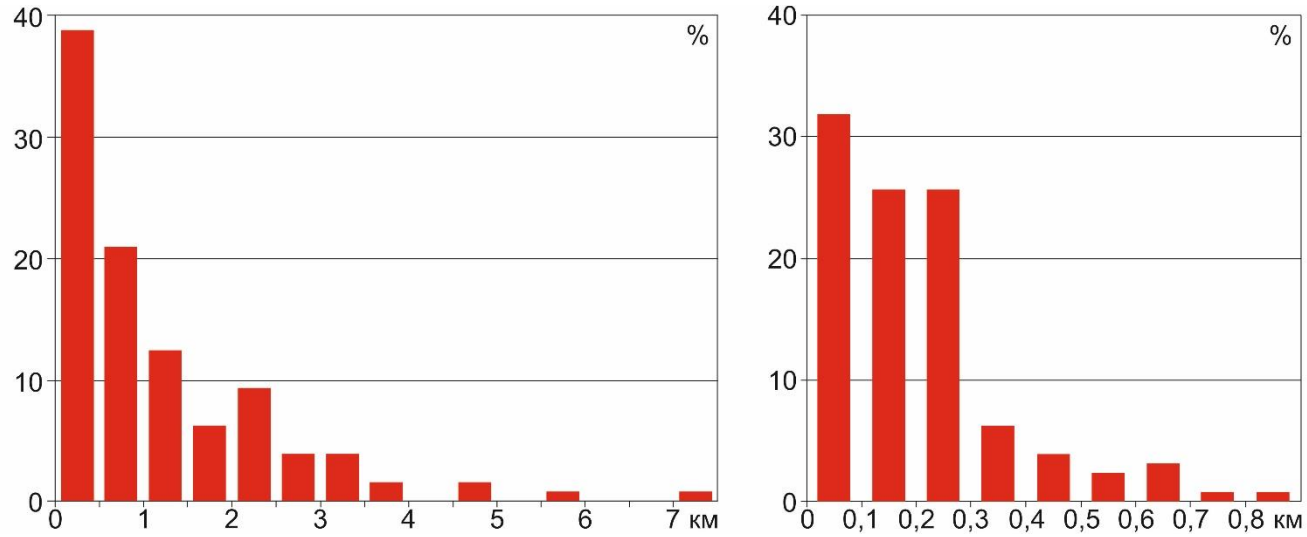


Рисунок 3.23 – Расположение прогнозируемых газонасыщенных объектов (2) на исследованных сейсмопрофилях МОГТ (1). Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Для выявленных аномалий выполнен анализ их распределения в ВЧР. Полученные модели распределения аномалий по горизонтальным размерам и глубинам верхних границ потенциального газонасыщения показаны на диаграммах на рисунке 3.24. Результаты выполненного анализа показывают, что большинство объектов имеют верхние границы газонасыщения на глубинах до 300 м от морского дна. По протяженности вдоль профилей большинство аномалий характеризуются размером до 2,5 км, причем основное количество аномалий сосредоточено в интервале до 500 м.



(а) (б)

Рисунок 3.24 – Распределение прогнозируемых газонасыщенных объектов в ВЧР Восточно-Сибирского моря по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б)

Относительно равномерное распределение потенциально газонасыщенных объектов по глубинам верхних границ газонасыщения на глубинах ВЧР до 300 м отличается от подобных распределений по другим арктическим и субарктическим акваториям – морям Лаптевых, Чукотскому, Бофорта, Берингову (Богоявленский и др., 2018а; Богоявленский, Кишанков, 2018, 2020). В указанных акваториях отмечается значительно большее количество аномалий на глубинах до 100 м, по сравнению с остальными глубинными интервалами (см. разделы 3.1, 3.3, 3.4, 3.5). Причинами таких распределений могли быть тектонические движения на поздних стадиях осадконакопления, при которых образовались разломы, доходящие до придонных отложений, по которым газ мог мигрировать из залежей и нефтегазоматеринских пород с различных глубин осадочного чехла.

При анализе временных разрезов по Восточно-Сибирскому морю было отмечено относительно малое количество разломов, доходящих до морского дна. Это объясняется имеющимися представлениями об истории геологического развития региона, по которым на поздних стадиях осадконакопления отсутствовали активные тектонические движения (Drachev et al., 2010).

Прослеживаемые разломы, вероятно, образовались в эоцене – среднем миоцене в обстановке транстенсии, большинство из них прослеживаются от акустического фундамента и затухают в толще осадочного чехла. Таким образом, отсутствием активных разломов, доходящих до придонных отложений, можно объяснить меньшую интенсивность вертикальной миграции газа в рассматриваемых районах Восточно-Сибирского моря, по сравнению с другими изученными акваториями.

3.3. Чукотское море

3.3.1. Анализ временных разрезов МОГТ

Для исследования ВЧР Чукотского моря были проанализированы временные разрезы МОГТ общей длиной около 9500 км, находящихся в открытом доступе в базе данных USGS (Triezenberg et al., 2016; рисунок 2.6). Полевые работы в исследуемом районе были выполнены в 1977, 1978, 1980 гг. в ходе рейсов L-9-77, L-6-78, L-8-80 с судна «S.P. Lee» с использованием группы из пяти пневмоисточников, 24-канальной сейсмокосы длиной 2400 м и цифровой записывающей системы GUS (Global Universe Science) Model 4200.

На рисунке 3.25 показан фрагмент разреза L-8-80 19, на котором на пикетах 1680-1720 и 1950-2100 наблюдаются аномальные объекты по признакам 1, 3, 4 и 5 от дна до 0,6-0,7 с. Под объектами выделяются вертикальные зоны пониженных амплитуд, связанные с поглощением сейсмических волн при их распространении через газонасыщенные отложения. В районе пикета 1700 со времени 0,25 с происходит сильное прогибание осей синфазности, которое на временах 0,6-2,0 с сильно нарушает сводовую часть антиклинали по форме и динамике отражений. Также в местах аномальных объектов наблюдается нарушение оси синфазности, соответствующей морскому дну, что может свидетельствовать о формировании покмарок (кратеров) в данных местах, через которые происходит эмиссия газа в гидросферу (см. рисунок 3.25.2 и 3.25.3).

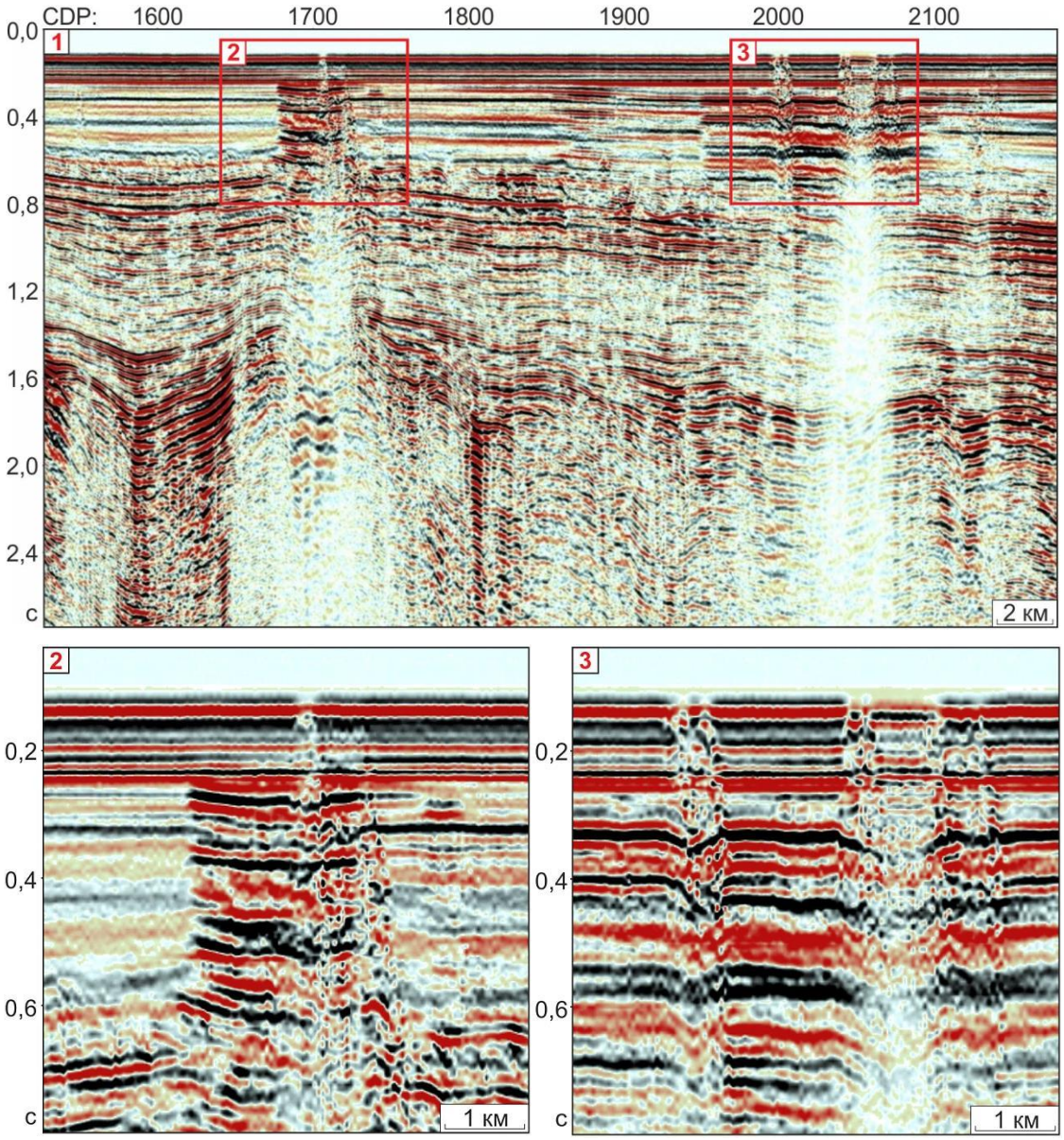


Рисунок 3.25 – Фрагмент временного разреза L-8-80 19 USGS (Triezenberg et al., 2016) в Чукотском море с аномальными объектами (1), показанными в увеличенном масштабе (2, 3) (положение – см. рисунок 2.6-а)

На рисунке 3.26 показан фрагмент разреза L-8-80 10 с аномалиями сейсмической записи. На пикетах ОГТ 1510, 1580, 1610, 1650 аномальные объекты находятся непосредственно под морским дном и характеризуются признаками 1, 3 и 4. На поверхности морского дна в местах аномалий прослеживаются локальные поднятия (PLF), характерные для бугров пучения (рис. 3.26.3), происхождение которых может объясняться высоким давлением газа на придонные слабопроницаемые отложения, препятствующие эмиссии газа в гидросферу. На

пикетах 1610-1700 на временах 0,4-0,5 с наблюдается крупная (4,2 км) аномалия с признаками 1, 3, 4 и 5, соответствующая потенциальной газовой залежи, из которой газ может мигрировать к меньшим залежам, доходящим до поверхности осадочного чехла, описанным выше (пикеты 1610, 1650).

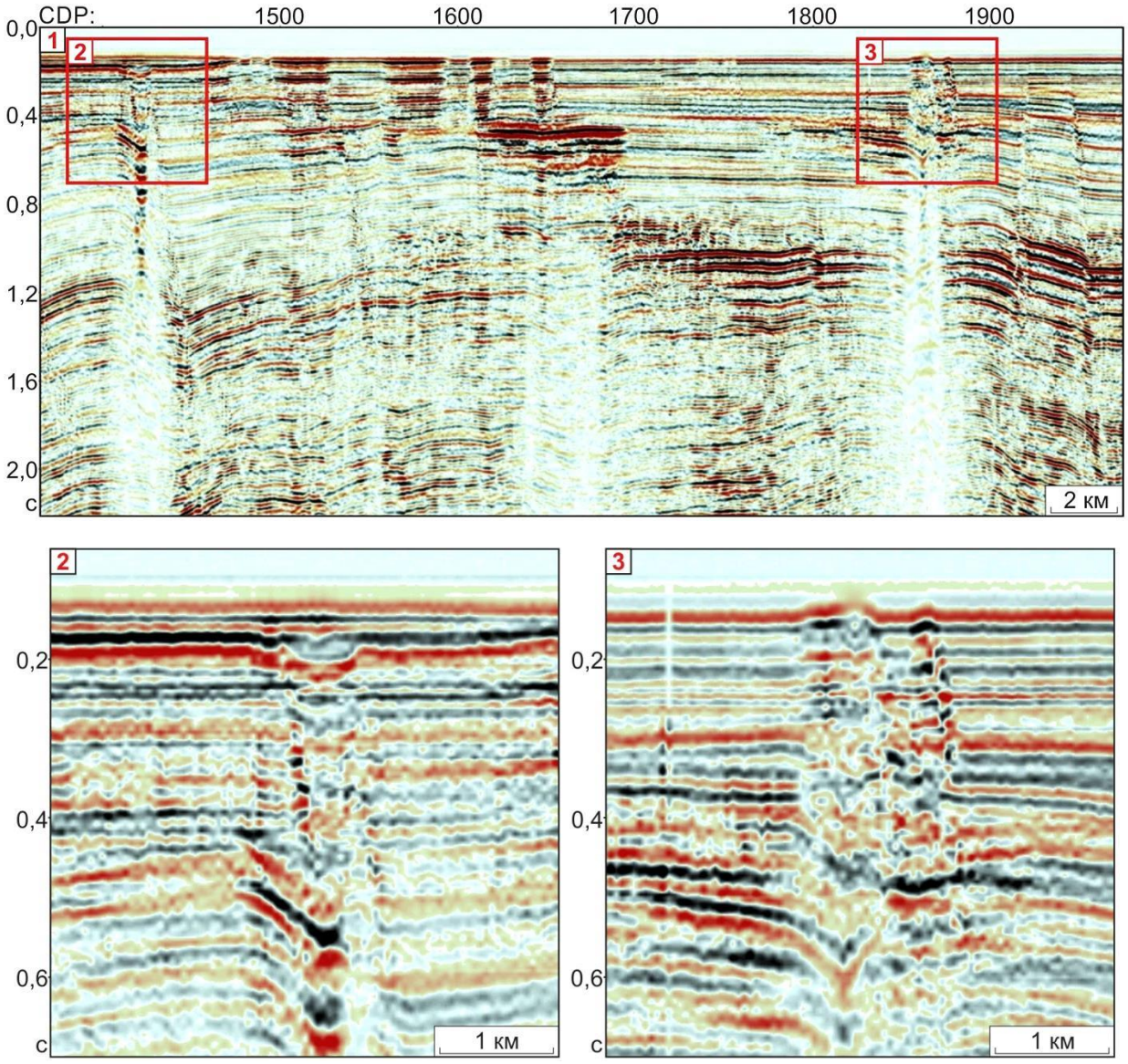


Рисунок 3.26 – Фрагмент временного разреза L-8-80 10 USGS (Triezenberg et al., 2016) в Чукотском море с аномальными объектами (1), показанными в увеличенном масштабе (2, 3) (положение – см. рисунок 2.6-b)

Зоны пониженных амплитуд наблюдаются около пикетов 1420 и 1870. В верхних частях данных зон видны значительные смещения отражающих

горизонтов. Возможно, они обусловлены грязевулканической активностью – при извержениях газо-грязевых потоков возникает дефицит массы, и образуются кальдеры проседания, которые компенсируются новыми отложениями. В частности, в районе пикета 1420 (см. рисунок 3.26.2) наблюдается погребенная покмарка, вероятно, являющаяся кальдерой грязевого вулкана. В районе пикета 1870 (см. рисунок 3.26.3) отмечаются два поднятия на морском дне, которые могут быть связаны с постройками грязевых вулканов или со скоплением газа в придонных отложениях. В любом случае, они являются результатами газодинамических процессов.

На фрагменте разреза L-8-80 19 на пикетах 3350-3550 (рисунок 3.27) наблюдаются одна крупная и четыре небольшие аномалии в ВЧР, доходящие до морского дна (1 – длина 3500 м, 2-5 – длины 400-800 м), указывающие на потенциальное газонасыщение по признакам 1, 3, 4 и 5. В рельефе дна в местах аномалий выделяются бугры пучения (PLF), которые могли образоваться из-за сильного давления от скопившегося в придонных отложениях газа.

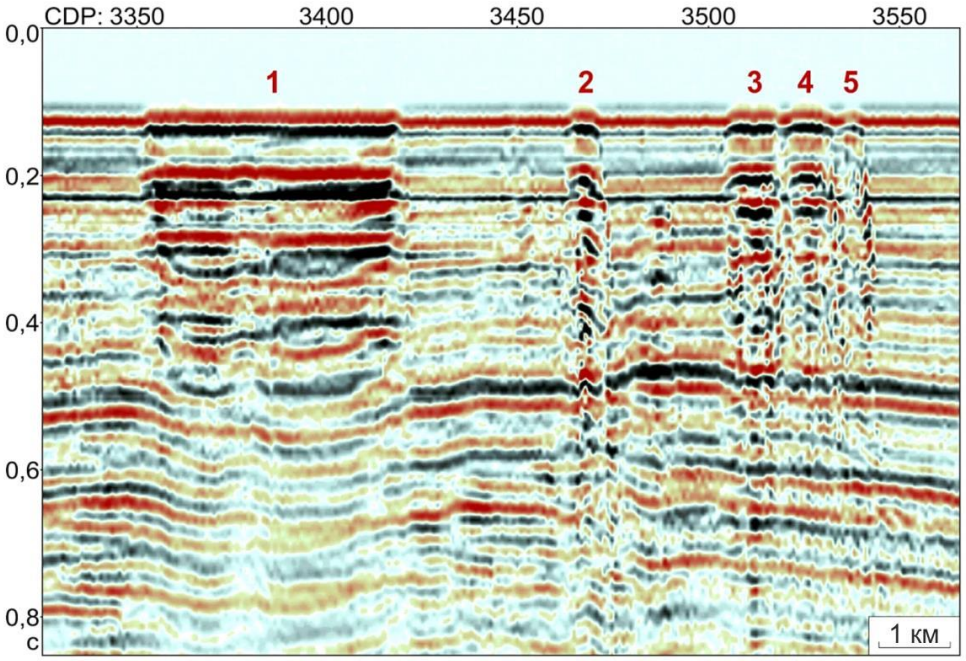


Рисунок 3.27 – Фрагмент временного разреза L-8-80 19 USGS (Triezenberg et al., 2016)в Чукотском море с аномальными объектами (положение – см. рисунок 2.6-с)

Один из выделенных аномальных объектов, пересеченный профилем L-6-78 806, соответствует структуре Klondike, вскрытой одноименной скважиной. На рисунке 3.28 показан фрагмент разреза со спроецированной на него скважиной Klondike-1 (K-1), находящейся в 4,7 км от профиля. На пикетах 2830-3030 в интервале 0,5-0,65 с выделяется антиклинальное поднятие протяженностью около 7,5 км.

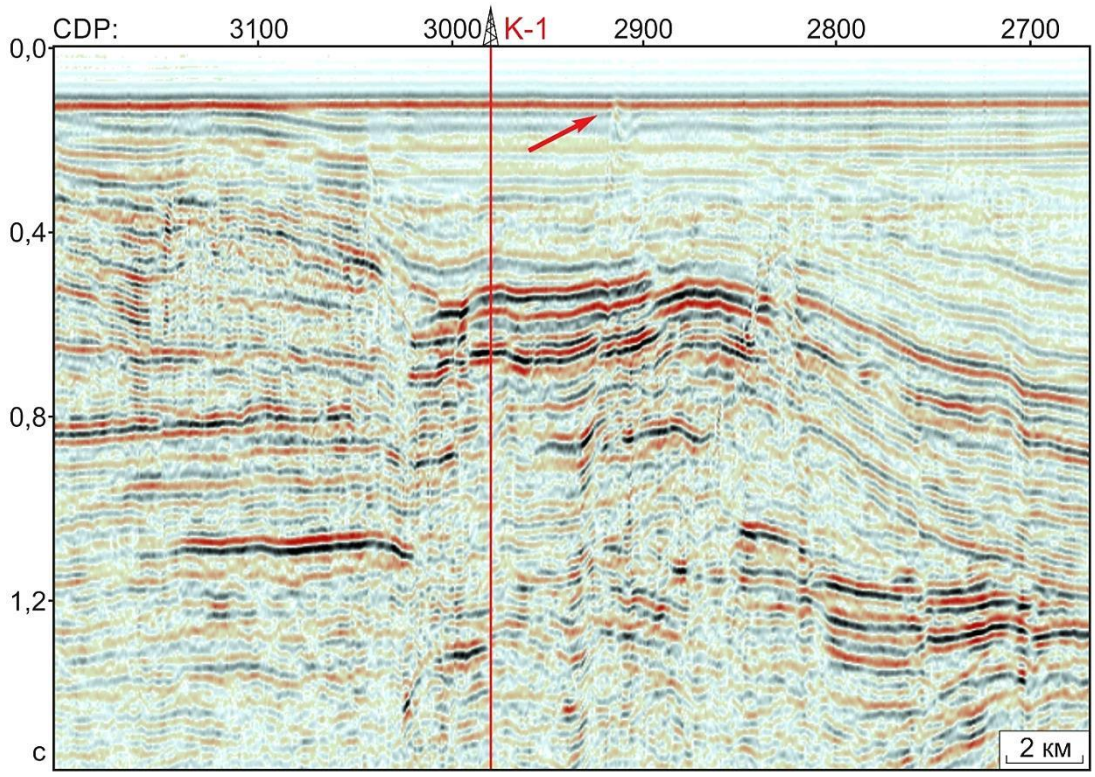


Рисунок 3.28 – Фрагмент временного разреза L-6-78 806 USGS (Triezenberg et al., 2016) в Чукотском море с проекцией скважины К-1 на площади Klondike. Стрелкой показан бугор на морском дне (положение – см. рисунок 2.6-d)

Структура Klondike в сводовой части нарушена разломами (см. рисунок 3.28), при этом через один из разломов газ мог мигрировать до дна и за счет высокого давления сформировать небольшое поднятие в районе пикета 2915 (см. рисунок 3.28, стрелка). Стоит отметить, что в скважине К-1 газоносность в ВЧР не испытывалась, так как скважина бурилась на целевые глубокие нефтеносные интервалы.

Некоторые выделенные объекты выглядят, как гигантские покмарки (рисунок 3.29), однако, более вероятно, что они образованы не газодинамическими процессами. Представленные на указанном рисунке впадины могут являться хасыреями – высохшими озерами с многолетними буграми пучения – булгунняхами, которые образовались, когда шельф Чукотского моря находился выше уровня моря во время последнего оледенения, и были затоплены при последующей трансгрессии.

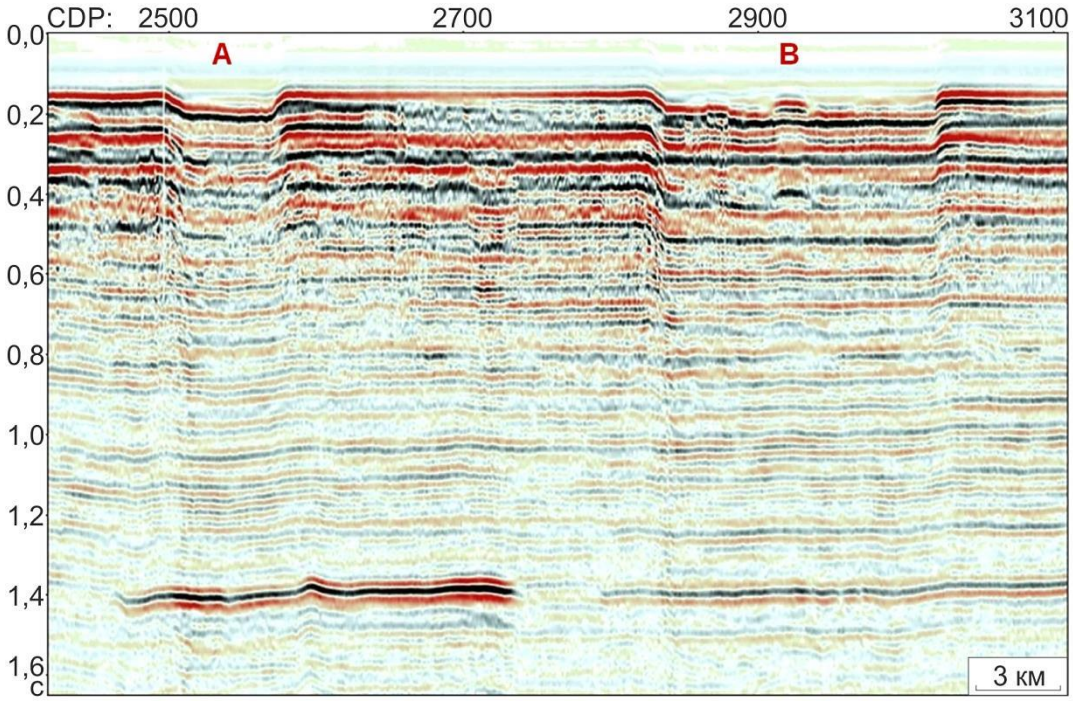


Рисунок 3.29 – Фрагмент временного разреза L-6-78 819 USGS (Triezenberg et al., 2016) в Чукотском море с аномальными объектами (A, B) (положение – см. рисунок 2.6-е)

3.3.2. Результаты и обсуждение

В результате анализа временных разрезов по Чукотскому морю выделено 782 аномальных потенциально газонасыщенных объекта, расположение которых показано на рисунке 3.30 (Богоявленский, Кишанков, 2020). Среднее расстояние между аномалиями составило 12,1 км.

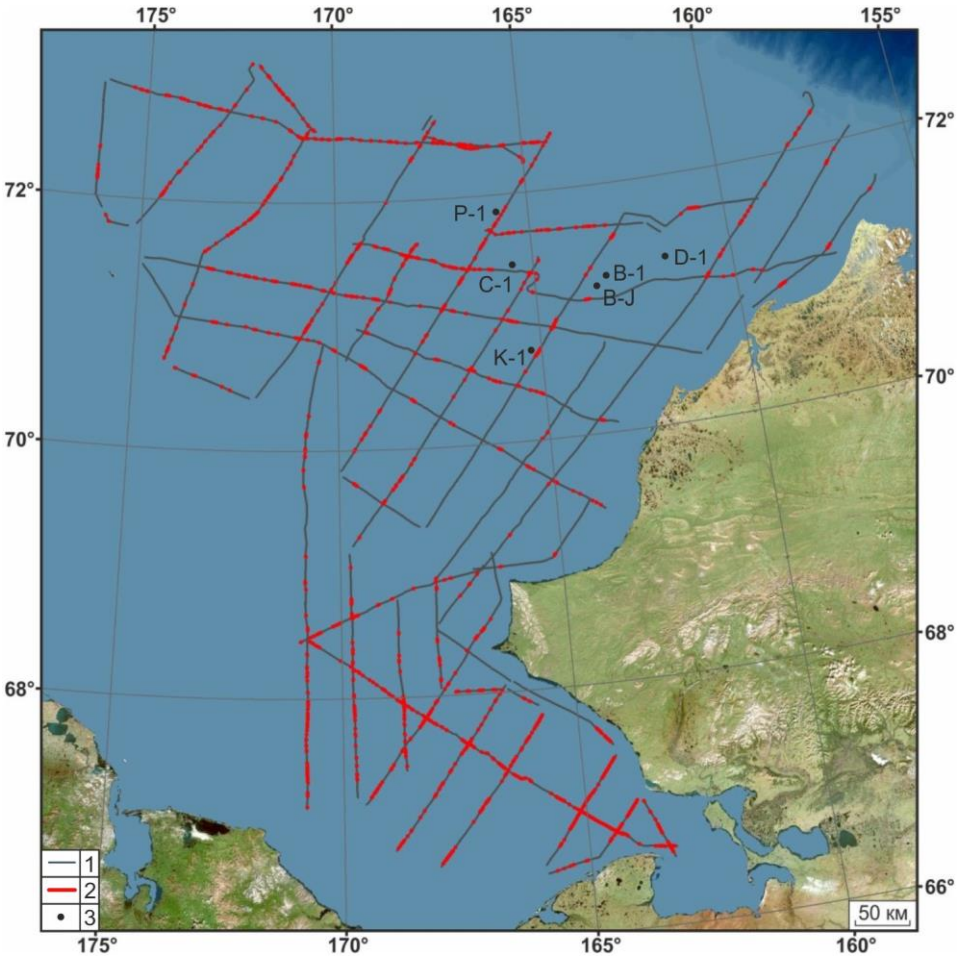
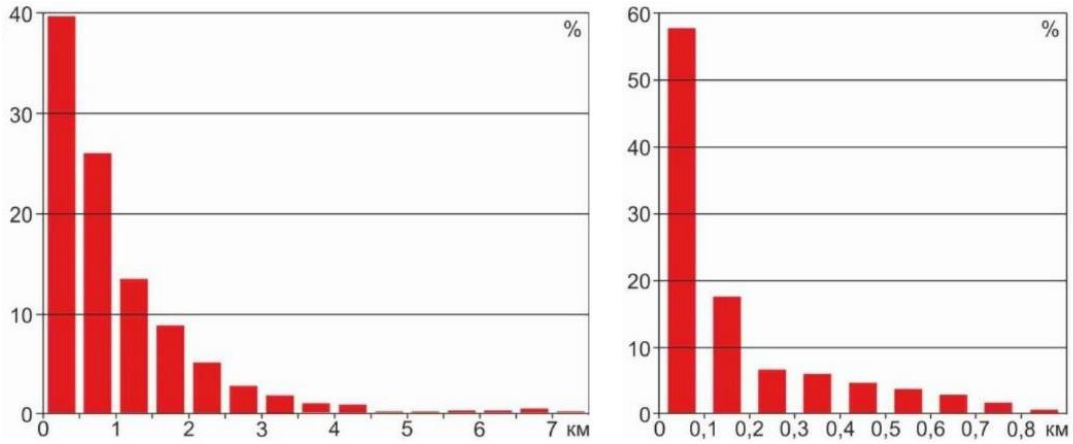


Рисунок 3.30 – Расположение прогнозируемых газонасыщенных объектов (2) на исследованных сейсмопрофилях МОГТ (1); 3 – скважины Klondike-1 (K-1), Popcorn-1 (P-1), Burger-1 (B-1), Burger-J (B-J), Crackerjack-1 (C-1) и Diamond-1 (D-1). Картографическая основа – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Для выявленных аномалий выполнен анализ их распределения в ВЧР. Полученные модели распределения аномалий по горизонтальным размерам и глубинам верхних границ потенциального газонасыщения показаны на диаграммах на рис. 3.31.



а) б)

Рисунок 3.31 – Распределение прогнозируемых газонасыщенных объектов в ВЧР Чукотского моря по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б)

Согласно полученным диаграммам, в Чукотском море большинство объектов имеет верхнюю границу газонасыщения на глубинах до 200 м от дна (74,9%), причем непосредственно у поверхности морского дна (на глубинах до 100 м) эта граница расположена у 57,5% от всех объектов. Большая часть объектов имеет протяженность вдоль профилей до 2 км (87,2%), а протяженностью до 500 м обладают 39,4% объектов.

Высокая газонасыщенность приповерхностной части шельфа Чукотского моря может объясняться наличием множества разрывных нарушений, основных путей вертикальной миграции газа, часть которых подходит близко к поверхности осадочного чехла. Разломы формировались на шельфе Чукотского моря на нескольких этапах геологической истории. Известно, что в северо-восточной области Чукотской платформы, в пределах грабенов, ограниченных разломами, участки максимальной мощности верхнебрукских (кайнозойских) отложений, в основном, совпадают с участками максимальной мощности более древних пород. Это обстоятельство может свидетельствовать об активизации разломов в кайнозое во время накопления верхнебрукского комплекса (Thurston, Theiss, 1987). Кроме того, в частности, известно, что в четвертичное время в Северо-Чукотском бассейне

происходило активное образование разломов (Grantz et al., 1982). Разломы, смещающие поверхность современного морского дна, присутствуют в юго-западной части акватории Чукотского моря, в районе свода Геральда и в пределах трога Ханна (Thurston, Theiss, 1987).

Как показано выше, в районе исследования обнаружены поднятия – бугры пучения типа PLF, которые предположительно обусловлены высоким давлением газа, скапливающегося у поверхности морского дна, на экранирующие его слабопроницаемые придонные отложения. Возможно, через некоторое время при накоплении критического количества газа, сила давления от него превысит предел прочности покрышек, и тогда на месте локальных поднятий произойдут газовые выбросы и образуются покмарки.

Аналитические исследования, выполненные в работе (Матвеева и др., 2017), показали, что зоны распространения гидратов метана на мелководном шельфе присутствуют только в прибрежных областях с наличием ММП. Однако при учете возможности содержания гомологов метана в гидратообразующем газе на мелководном шельфе прогнозируются локальные участки с термобарическими условиями, благоприятными для существования ГГ. При этом имеются результаты морских экспедиционных исследований, показавшие, что в придонных отложениях распространен не только метан, но и его гомологи. Состав смесей газов изменяется в широком диапазоне: метан – 60,6-99,9%, этан – 0,0-16,7%, пропан – 0,0-30,3%, бутан – 0,0-0,96% (Матвеева и др., 2017).

Необходимо отметить, что в Чукотском море нами при анализе данных временных разрезов ММП и ГГ не выявлены. Это во многом обусловлено сложностью выделения горизонта BSR при горизонтальной слоистости отложений и с невысоким (по современным стандартам) качеством архивных разрезов USGS. Документально подтвержденных данных о распространении субаквальных ММП в Чукотском море по опубликованным источникам не найдено. Вероятной причиной отсутствия ММП и ГГ является воздействие на придонные отложения теплого Тихоокеанского течения, вследствие которого в открытом море произошли

деградация ММП и диссоциация ГГ, при этом они могли сохраниться только в узких зонах вдоль северных берегов Аляски и Чукотки.

Вполне возможно существование ГГ в Чукотском море на глубинах свыше 290 м или даже меньших глубинах при наличии в гидратообразующем газе кроме метана его гомологов (Матвеева и др., 2017; Bogoyavlensky et al., 2018b), однако временные разрезы по континентальному склону Чукотского моря в базе данных USGS не доступны, в связи с чем в диссертации анализировались только разрезы по шельфовой части моря с небольшими глубинами дна. Существование ГГ на больших глубинах подтверждено в исследовании (Kim et al., 2020).

3.4. Море Бофорта

3.4.1. Анализ временных разрезов МОГТ

Для исследования по морю Бофорта были использованы архивные временные разрезы МОГТ, находящиеся в открытом доступе в базе данных USGS (Triezenberg et al., 2016; рисунок 2.10). Сейсмические профили отработаны с судна S.P. Lee в ходе рейсов L-9-77, W-17-77, W-18-77 и B-59-82. Суммарная длина проанализированных профилей составила 8440 км. Профили с рейсов W-17-77, W-18-77, B-59-82 (общая длина – 4050 км) охватывают мелководный шельф моря Бофорта, а профили с рейса L-9-77 (общая длина – 4390 км) – как шельф, так и континентальный склон.

Для поиска потенциальных залежей свободного газа анализировались разрезы, отработанные в рейсах W-17-77, W-18-77 и B-59-82, в связи с относительно более высоким качеством материалов соответствующих съёмок. На рисунке 3.32 показан фрагмент разреза WB-013. На пикете 2420 выделяется аномалия, доходящая близко к поверхности морского дна, с признаками газонасыщения 1, 3, 4 и 5. На пикете 2020 от поверхности осадочного чехла до времени 0,5 с прослеживается зона с нарушенной сейсмической записью,

указывающая на потенциальный канал миграции газа. Видимо, в данном месте на морском дне происходит эмиссия газа из ВЧР в водную толщу.

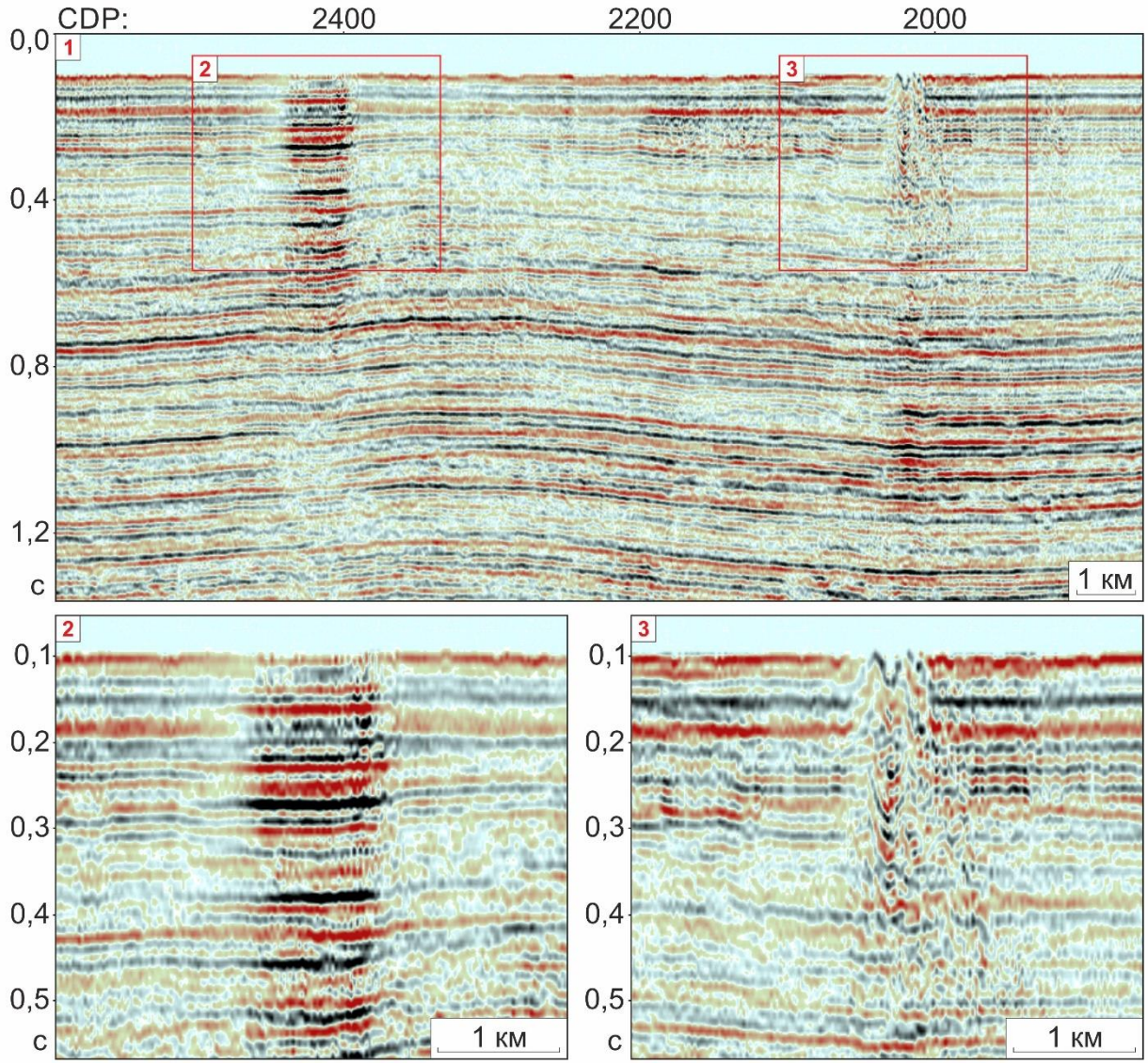


Рисунок 3.32 – Фрагмент временного разреза WB-013 USGS (Triezenberg et al., 2016) в море Бофорта с аномальными объектами (1), показанными в увеличенном масштабе (2, 3) (положение – см. рисунок 2.10-а)

Яркий аномальный объект с четкими признаками газонасыщения 1, 3, 4 и 5 выявлен на площади известного месторождения Хаммерхед (Hammerhead). На рисунке 3.33 показан разрез WB-088, проходящий через данное месторождение. Месторождение Хаммерхед открыто в 1985 году, является нефтяным, также содержит газ (Banet, 1991). На месторождении пробурено две скважины –

Hammerhead 1, 2. На рисунке 3.33 показано положение скважины Hammerhead 1, спроецированной на разрез WB-088. Скважина находится примерно в 580 м к северо-западу от разреза. Проявления нефти и газа в скважине известны в песчаных прослоях терригенной формации Сагаванирктоk (Sagavanirktok) верхнебрукского комплекса (см. рисунок 2.8), на глубинных интервалах 1603,5-1608,1 м и 1646,8-1661,5 м относительно уровня моря (Nelson et al., 1999) (на рисунке 3.33 глубины проявлений УВ переведены во временной масштаб с учетом примерной скорости 2 км/с в породах выше отметки 1 с и 2,2 км/с в нижележащих отложениях). На фрагменте разреза под сейсмической аномалией наблюдается антиклинальное поднятие, свод которого нарушен прогибанием сейсмических горизонтов, видимо, из-за присутствия газовой залежи над ним. Кроме того, четко видны два разлома, один из которых расположен рядом с предполагаемым сводом антиклинального поднятия. Исходя из обнаруженных на разрезе объектов, можно предположить, что газ мигрировал из залежей в антиклинальной ловушке через разлом к ВЧР, где произошло накопление новой залежи.

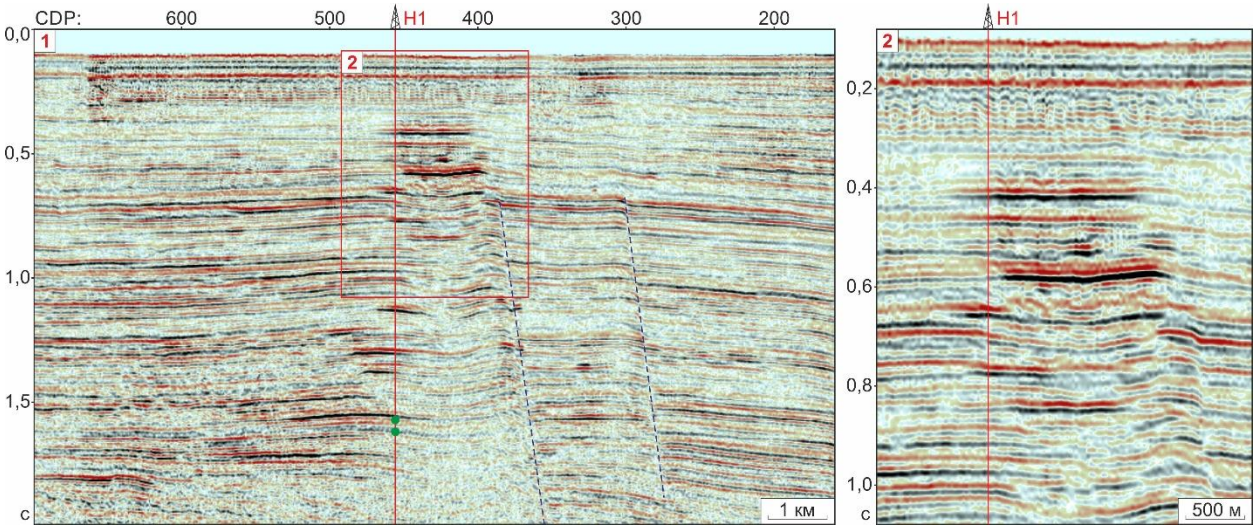


Рисунок 3.33 – Фрагмент временного разреза WB-088 USGS (Triezenberg et al., 2016, с дополнениями автора) в море Бофорта со спроецированной скважиной Hammerhead 1 (H1) и аномальным объектом (1), показанным в увеличенном масштабе (2) (положение – см. рисунок 2.10-b). Зеленые отметки на скважине – известные проявления жидких УВ

На разрезах, пересекающих континентальный склон, нами был выделен отражающий горизонт BSR. На рисунке 3.34 приведен фрагмент разреза L-9-77 714, где горизонт BSR прослеживается от бровки шельфа (пикет 3030, время 1,5 с) и до нижней части склона (пикет 2330, время 3,2 с). На фрагменте разреза видна субпараллельность горизонта поверхности морского дна. Также наблюдается обратная полярность отраженных волн на границе BSR. На увеличенном фрагменте разреза видно сечение горизонтом слоистости отложений ВЧР. Причем при прохождении через границу BSR в сторону морского дна на осях синфазности резко снижается интенсивность отражений.

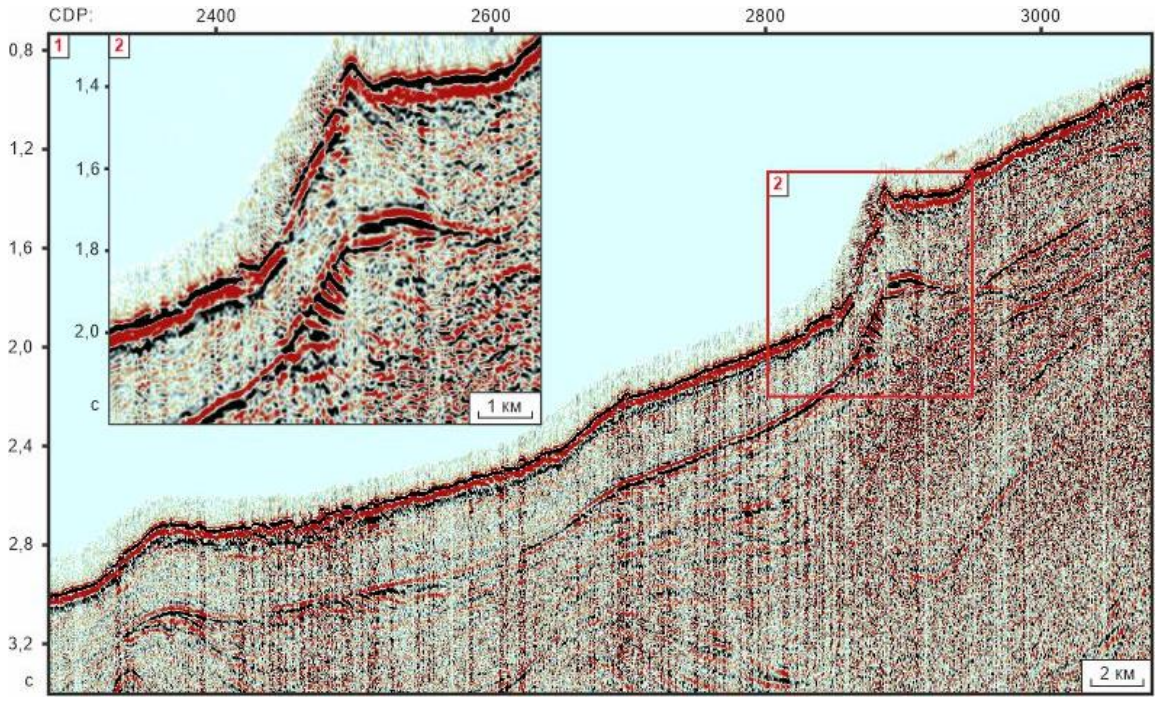


Рисунок 3.34 – Фрагмент временного разреза в море Бофорта L-9-77 714 USGS (Triezenberg et al., 2016) с горизонтом BSR (положение – см. рисунок 2.10-с)

3.4.2. Результаты и обсуждение

В результате анализа всех временных разрезов выделено 184 аномальных объекта (рисунок 3.35). Среднее расстояние между аномальными объектами составило около 22 км. Горизонт BSR выделен на 20 проанализированных нами

временных разрезах, охватывающих континентальный склон акватории моря Бофорта. Эти данные по возможному существованию ГГ согласуются с ранее полученными результатами (Andreassen et al., 1995; Kvenvolden, Grantz, 1990; рисунок 3.35).

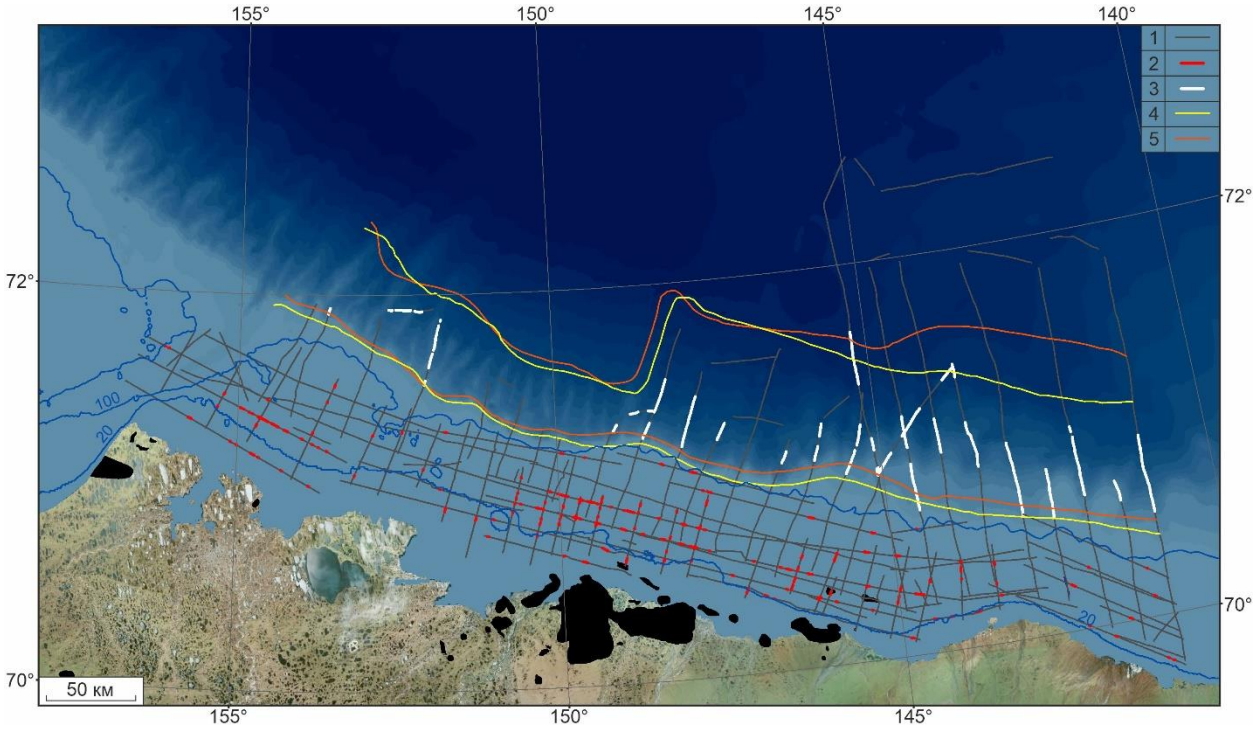
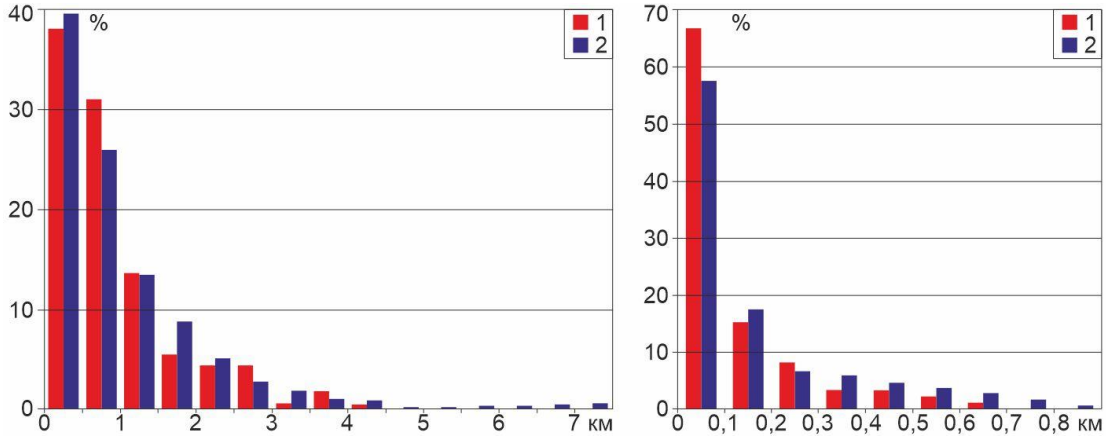


Рисунок 3.35 – Расположение прогнозируемых газонасыщенных объектов (2) и горизонта BSR (3) на исследованных сейсмопрофилях (1); 4 и 5 - зоны распространения горизонта BSR по данным Andreassen et al., 1995 (4) и Kvenvolden, Grantz, 1990 (5). Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Для потенциально газонасыщенных объектов был выполнен анализ их распределения в ВЧР по горизонтальным размерам и глубинам верхних границ газонасыщения. Полученные модели распределения объектов по морю Бофорта приведены на рисунке 3.36 в сопоставлении с результатами исследования ВЧР Чукотского моря (см. раздел 3.3.2).



(а) (б)

Рисунок 3.36 – Распределение прогнозируемых газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и по глубинам верхних границ газонасыщения (б) в морях Бофорта (1) и Чукотском (2)

Большая часть аномальных объектов в море Бофорта (82,6%) характеризуется протяженностью вдоль профилей до 1,5 км, что очень схоже с Чукотским морем (78,5%) (рисунок 3.36а). Для обоих регионов максимальное количество аномалий сосредоточено в интервале минимальных размеров до 500 м – 38% в море Бофорта и 39,4% в Чукотском море.

По глубине расположения верхних границ газонасыщения в обоих регионах аномалии, в основном, характеризуются отметками до 200 м (82,1% в море Бофорта, 74,9% в Чукотском море, рисунок 3.36б), причем максимальное количество сосредоточено в интервале 0-100 м (66,8% в море Бофорта и 57,5% в Чукотском море).

Качественная оценка потенциальной газонасыщенности ВЧР северо-восточной части Чукотского моря и западной части моря Бофорта приведена в отчете (Grantz et al., 1982). Согласно данному источнику, на внутреннем шельфе высокие концентрации газа в ВЧР, в основном, связаны с погребенными дельтой и каналами плейстоценового возраста, а также с действующими разломами, проходящими через источники приповерхностного газа. В нашем исследовании сделана попытка более детально рассмотреть вопрос газоносности ВЧР моря

Бофорта, чем в указанной работе, проанализировать распространение потенциально газонасыщенных объектов (см. рисунок 3.36).

Схожие диаграммы распределения потенциальных газонасыщенных объектов по линейным размерам, полученные для морей Бофорта и Чукотского, могут объясняться общими закономерностями генерации, миграции, аккумуляции углеводородов в ВЧР, а также близкими литологическими характеристиками природных резервуаров, что обуславливается единой историей геологического развития Северной Аляски и прилегающего шельфа. Приуроченность наибольшего количества аномалий к приповерхностным отложениям может объясняться новейшими тектоническими движениями, при которых разрывные нарушения смещают четвертичные отложения и поверхность морского дна. Кроме того, имеются данные о сейсмической активности в пределах региона (Grantz et al., 1982).

Наличие горизонта BSR в море Бофорта было рассмотрено ранее в исследованиях (Andreassen et al., 1995; Grantz et al., 1989; Kvenvolden, Grantz, 1990), и результаты анализа временных разрезов в настоящей диссертации согласуются с предшествующими работами (см. рисунок 3.35), при этом лучше всего результаты корреспондируются с данными (Andreassen et al., 1995). Стоит отметить, что по морю Бофорта имеются прямые доказательства существования ГГ (Hart et al., 2011; Paul et al., 2015).

3.5. Берингово море

3.5.1. Анализ временных разрезов МОГТ

Для исследования ВЧР северо-западной части Берингова моря, охватывающей Анадырский и Наваринский осадочные бассейны, а также, частично, зону континентального склона и глубоководной Алеутской котловины, были использованы временные разрезы, общей протяженностью около 5900 км, находящиеся в открытом доступе в базе данных USGS (Triezenberg et al., 2016;

рисунок 2.12). Сейсморазведка в данном регионе выполнялась в 1976, 1977, 1980, 1982 гг. в ходе рейсов L-5-76-BS, L-8-77-BS, L-6-80-BS, и L-9-82-BS.

На рисунке 3.37 приведен фрагмент временного разреза L-6-80-BS 15 по Анадырскому заливу. На пикетах 1455-1420, на временах 50-500 мс выделяется аномалия по признакам газонасыщения 1, 3, 4 и 5 длиной около 2 км. Аномальный объект доходит до поверхности морского дна, причем в месте аномалии на дне наблюдается поднятие, которое, вероятно, сформировалось за счет высокого давления скопившегося газа. К северо-востоку от аномалии, на пикетах 1400-1380, наблюдается небольшой объект, который также может характеризоваться газонасыщением.

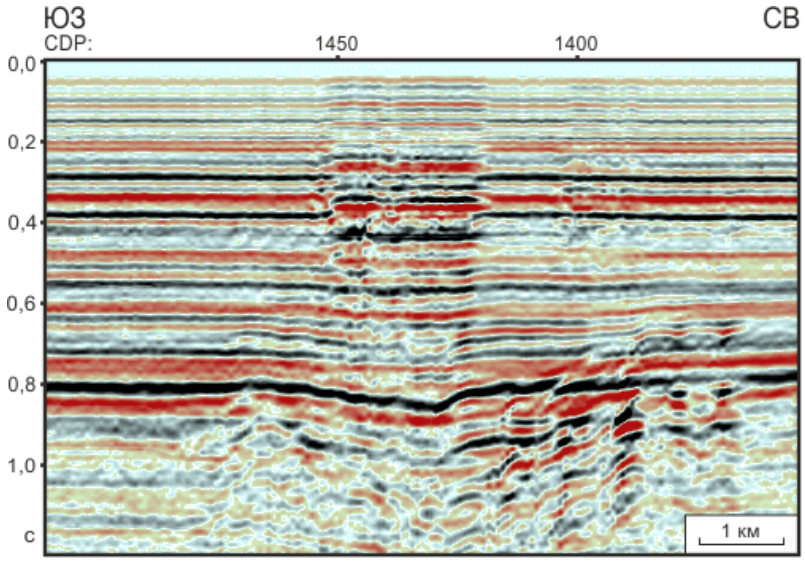


Рисунок 3.37 – Фрагмент временного разреза L-6-80-BS 15 USGS (Triezenberg et al., 2016) в Беринговом море с аномальным объектом (положение – см. рисунок 2.12-а)

На фрагменте временного разреза L-6-80-BS 15 (рисунок 3.38) наблюдается несколько аномалий, из которых наиболее ярко выделяются три объекта на временах 0,45-0,55 с (рисунок 3.38.2 и 3.38.3), характеризующиеся признаками газонасыщения 1, 3 и 4.

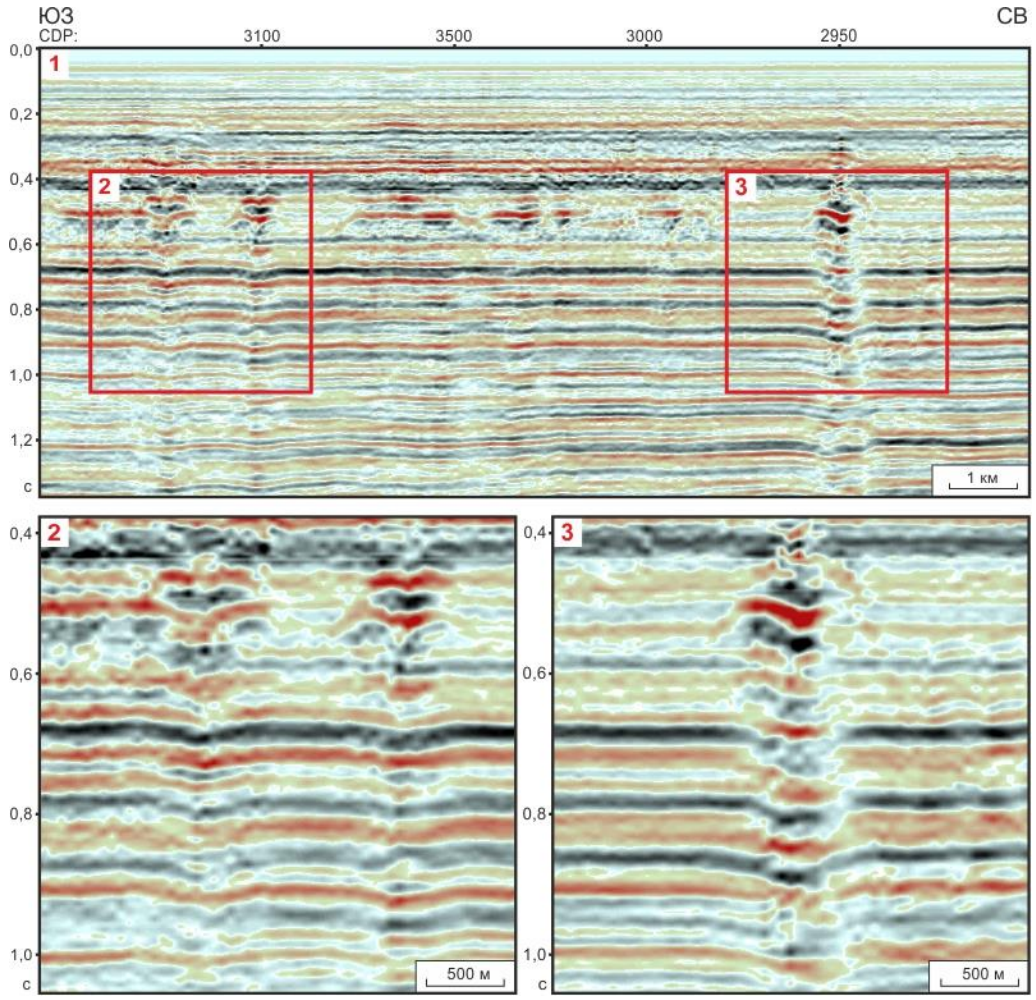


Рисунок 3.38 – Фрагмент временного разреза L-6-80-BS 15 (1) USGS (Triezenberg et al., 2016) в Беринговом море с аномальными объектами, показанными в увеличенном масштабе (2 и 3) (положение – см. рисунок 2.12-b)

На фрагменте разреза L-8-77-BS 7E по Наваринскому бассейну (рисунок 3.39) по признакам 1, 4 и 5 выделяются три потенциально газонасыщенные зоны – на временах 0,45 с (рисунок 3.39.1), 0,25 с (рисунок 3.39.2), 0,3 с (рисунок 3.39.3).

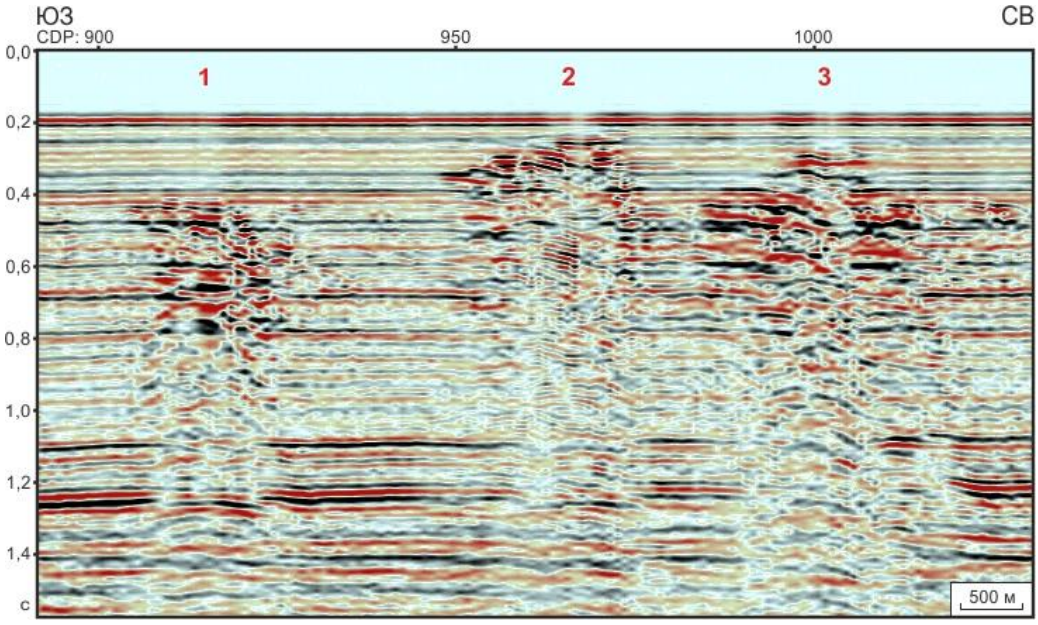


Рисунок 3.39 – Фрагмент временного разреза L-8-77-BS 7E USGS (Triezenberg et al., 2016) в Беринговом море с аномальными объектами (положение – см. рисунок 2.12-с)

На четырех разрезах, проходящих через континентальный склон и Алеутскую котловину, был выделен отражающий горизонт BSR. Он субпараллелен поверхности морского дна и местами сечет слоистость осадочной толщи (рисунок 3.40). Горизонт имеет обратную полярность, по сравнению с горизонтом, соответствующим морскому дну. На фрагменте разреза L-8-77 BS 13 в двух местах под горизонтом BSR отмечаются горизонтальные оси синфазности, которые являются признаком газоводяного контакта (см. рисунок 3.40, стрелки). Также горизонтальные оси синфазности отмечаются в приповерхностных отложениях в северо-восточной части разреза. Формирование выпуклых форм по горизонту BSR может быть обусловлено оползневыми процессами – сползанием отложений с расположенных выше областей континентального склона и образованием ими поднятий в рельефе дна.

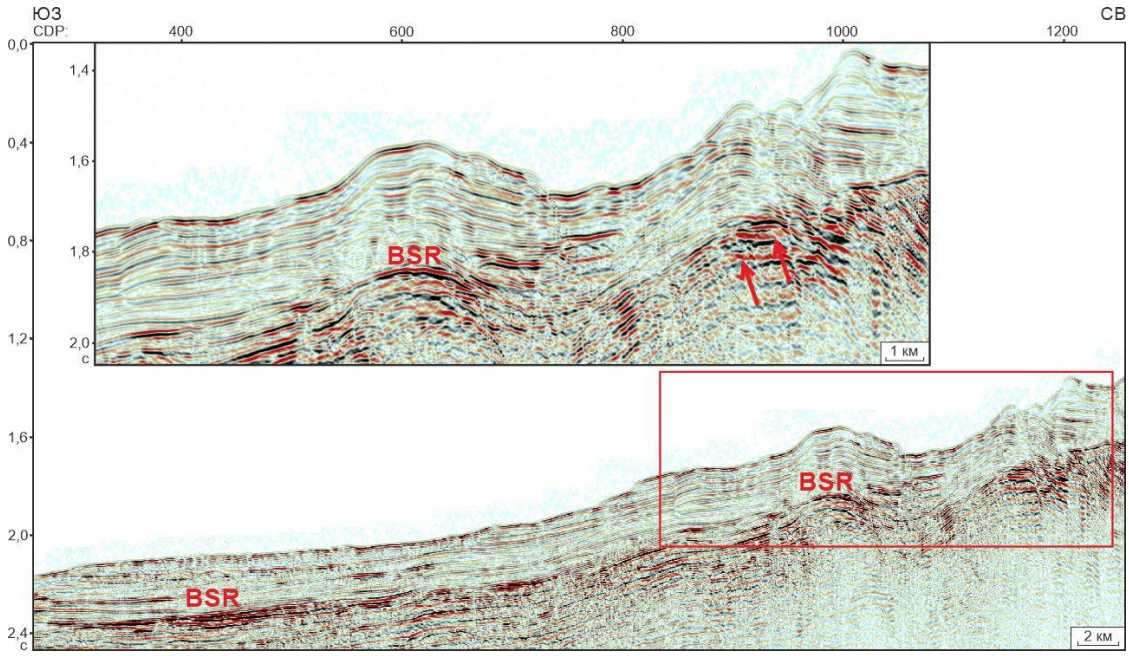


Рисунок 3.40 – Фрагмент временного разреза L-8-77-BS 13 USGS (Triezenberg et al., 2016, с дополнениями автора) в Беринговом море с отражающим горизонтом BSR. Стрелками показаны горизонтальные оси синфазности (положение – см. рисунок 2.12-d)

3.5.2. Результаты и обсуждение

В результате анализа всех доступных временных разрезов выделен 441 аномальный объект (Богоявленский, Кишанков, 2018; Кишанков, 2019), их расположение показано на рисунке 3.41. Среднее расстояние между аномалиями в Анадырском бассейне составило около 14,1 км, в Наваринском бассейне – 11,5 км, в целом, в акватории – 13,4 км.

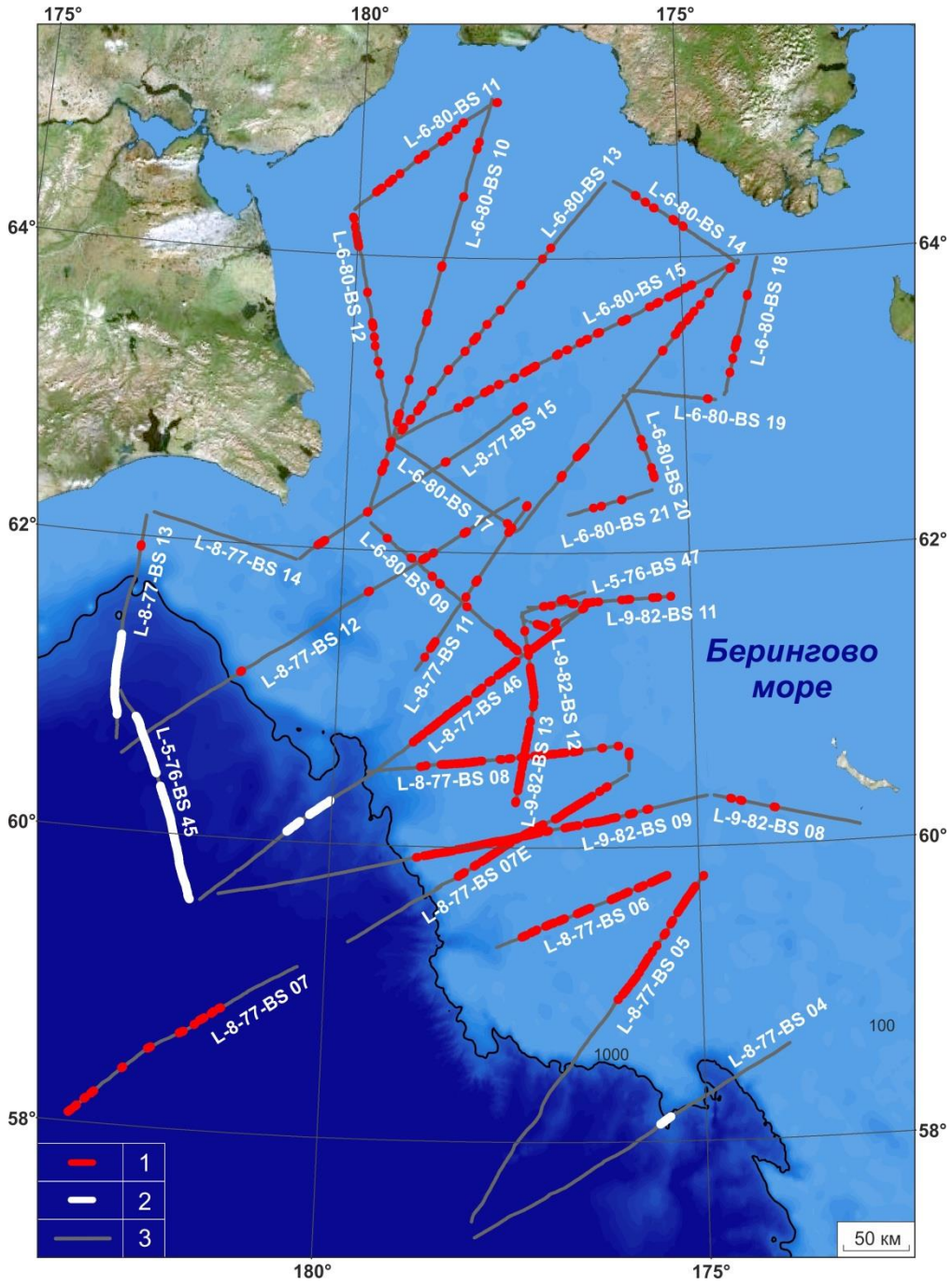
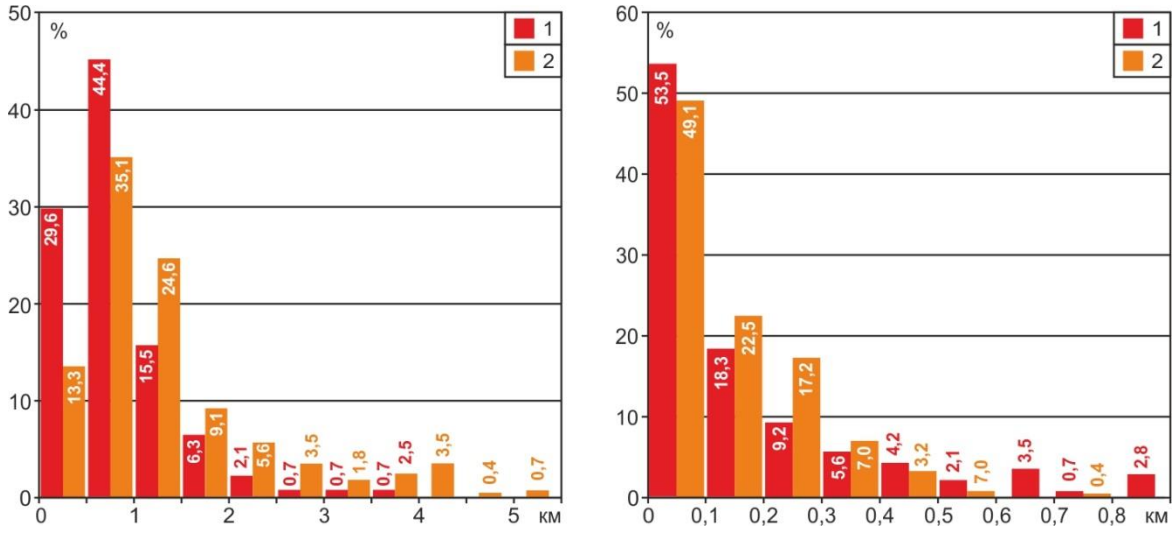


Рисунок 3.41 – Расположение прогнозируемых газонасыщенных объектов (1) и границ BSR (2) на исследованных сейсмопрофилях (3). Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Для потенциально газонасыщенных объектов выполнен анализ их распределения в ВЧР. Оценка проводилась раздельно по Анадырскому и Наваринскому бассейнам, в целом, по этим двум бассейнам, а также по прилегающей Алеутской котловине. Модели распределения аномалий по

горизонтальным размерам и глубинам верхних границ газонасыщения для Анадырского и Наваринского бассейнов показаны на рисунке 3.42.



а) б)

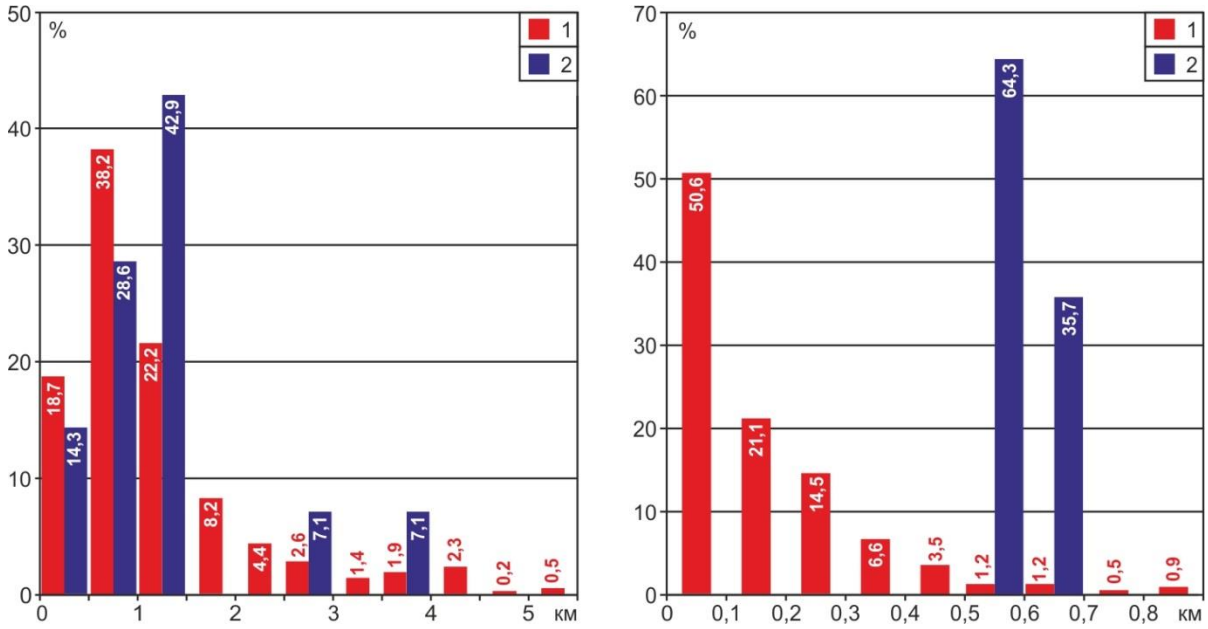
Рисунок 3.42 – Распределение прогнозируемых газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б) в Анадырском (1) и Наваринском (2) бассейнах

В Анадырском бассейне большая часть объектов характеризуется протяженностью вдоль профилей 500-1000 м (44,4 %) и 0-500 м (29,6 %). 95,8 % имеют размеры менее 2 км (рисунок 3.42а). В Наваринском бассейне большая часть объектов имеет размеры 500-1000 м (35,1 %) и 1000-1500 м (24,6 %). 82,1 % характеризуются размерами менее 2 км.

В Анадырском бассейне у большинства аномалий (81,2 %) верхние границы предполагаемого газонасыщения приурочены к глубинам до 300 м, у 53,5 % - к глубинам до 100 м (рисунок 3.42б). В Наваринском бассейне глубинами до 300 м характеризуются 88,8 % аномальных объектов, 49,1 % - глубинами до 100 м. Таким образом, закономерности распределения аномалий по двум бассейнам схожи.

В целом, по двум изученным бассейнам (рисунок 3.43) к глубинам верхних границ газонасыщения до 300 м относятся 86,2 % выделенных объектов, максимальное количество – к глубинам до 100 м (50,6 %). Большая часть аномалий

характеризуется размерами 500-1000 м (38,2 %), 1000-1500 м (22,2 %), 0-500 м (18,7 %). 87,3 % объектов имеют размеры менее 2 км.



а) б)

Рисунок 3.43 – Распределение потенциальных газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних верхних границ газонасыщения (б) общее по бассейнам Анадырскому и Наваринскому (1) и по Алеутской котловине (2)

Большинство газонасыщенных объектов в Анадырском и Наваринском бассейнах прогнозируется в приповерхностных отложениях. Причиной данному обстоятельство могут являться разломы, пересекающие ВЧР, проявившие активность во время ее накопления. Известно, что в северной части Анадырской впадины в среднем эоцене – олигоцене осадконакопление происходило в обстановке растяжения и рифтинга, что должно было привести к образованию разломов. В среднем миоцене в Анадырской впадине происходили сдвигообразование и рифтогенез, обеспечившие интенсивное накопление миоцен-четвертичных осадков (Антипов и др., 2009). В миоцене-плиоцене произошла активизация крупных разломов (Агапитов, 2004). Таким образом, разрывные нарушения, доходившие до ВЧР, могли служить проводниками газа из

нефтегазоматеринских толщ или глубоких залежей к приповерхностным отложениям.

В Алеутской котловине на временном разрезе L-8-77-BS 07 выявлено 14 аномальных объектов. Здесь потенциальные газонасыщенные объекты имеют большую глубину залегания (см. рисунок 3.43) – 64,3 % объектов имеют верхнюю границу газонасыщения на глубинах 500-600 м, 35,7 % - на глубинах 600-700 м. Большинство объектов (42,9 %) имеют протяженность от 1000 до 1500 м. Всего 85,8 % аномалий характеризуются размерами менее 1,5 км.

Наличие на шельфе Берингова моря ГГ, прогнозируемое на основе выделения горизонта BSR, является дискуссионным. Некоторые исследователи указывают, что данный горизонт может быть обусловлен изменениями физических свойств кремнистых пород, происходящими при диагенезе (Scholl, Creager, 1973). В кремнистых отложениях по изменению модификаций кремнезема известны две фазовые границы – A-CT – переход от аморфного опала к опалу-кристобалиту и CT-Q – дальнейший диагенетический переход к кварцу (Larsen, Chilingar, 1983). Аналогично подошве зоны стабильности ГГ, диагенетические границы прогнозируются на сейсмических разрезах выделением отражающего горизонта BSR (Berndt et al., 2004). Однако в случае указанных выше границ полярность сигнала является прямой, соответствующей таковой для морского дна, поскольку акустическая жесткость в ряду «опал А – опал СТ – кварц» возрастает, что связано с уплотнением отложений при диагенезе, изменением их структуры. Также важно понимать, что фазовые границы кремнезема обычно находятся глубже подошвы зоны стабильности ГГ.

Горизонты BSR, указывающие на изменение модификаций кремнезема, выделены в акватории Охотского моря, где изменение состава кремнистых пород на глубинах горизонта BSR подтверждается скважинными данными (Рыбак-Франко и др., 2011).

В трех скважинах, пробуренных в рамках проекта DSDP в Беринговом море, был отмечен BSR, связанный с диагенетическим изменением в кремнистых

отложениях (Scholl, Creager, 1973). Глубина данного BSR для отдельных скважин составляет 600 м при глубине моря 1910 м, 670 м при глубине моря 2120 м, 580 м при глубине моря 2649 м.

В настоящей работе на одном из разрезов (L-8-77-BS 04) выделен горизонт BSR, предположительно указывающий на диагенетическое преобразование кремнезема. Он находится в пределах континентального склона, на глубинах 1-1,2 км от дна моря, при временных отметках дна 1,3-1,55 с. В остальных зонах выявленный на временных разрезах горизонт BSR отождествляется с подошвой ГГ, в связи с тем, что он характеризуется обратной полярностью по сравнению с морским дном и находится на меньших глубинах.

Присутствие ГГ и связанных с ними залежей свободного газа в глубоководной части Берингова моря зарубежными исследователями прогнозируется по характерным амплитудно-скоростным аномалиям VAMP (velocity-amplitude). Данные аномалии выделяются на сейсмическом изображении высокими амплитудами и смещением отражающих горизонтов, обусловленным изменением скоростных характеристик отложений при их насыщении свободным газом или ГГ (Scholl, Hart, 1993). Аномалии VAMP имеют вертикальную вытянутую форму шириной от 2 до 8 км. В верхней части отдельной аномалии прослеживается локальное смещение отражающих горизонтов вверх, что выражается в виде кажущейся антиклинали (рисунок 3.44). Ниже находится горизонт, имеющий обратную полярность, по сравнению с отражающим горизонтом, соответствующим морскому дну. Ниже него прослеживается прогибание отражающих горизонтов.

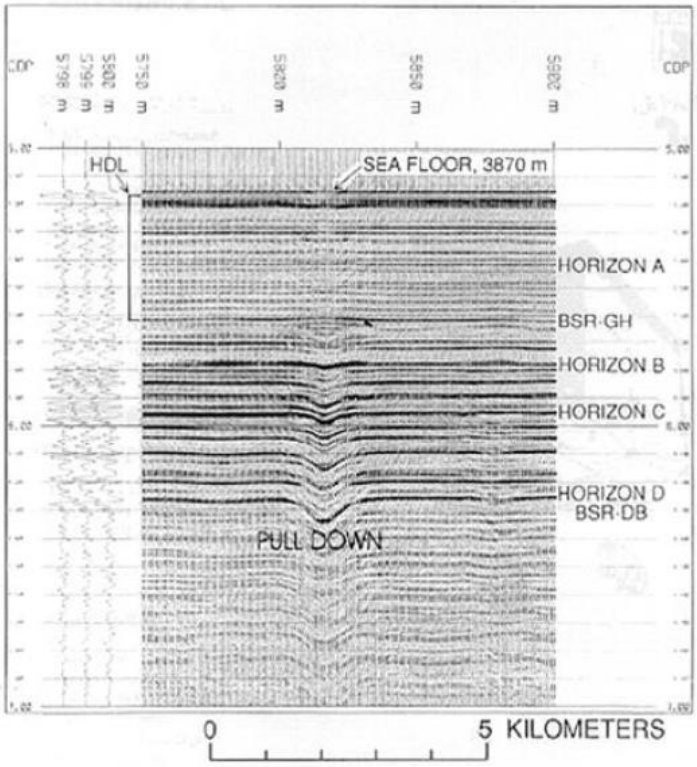


Рисунок 3.44 – Аномалия VAMP, выявленная в Беринговом море (Scholl, Hart, 1993)

Описанная аномалия интерпретируется как зона вертикальной миграции газа, перекрываемая толщей ГГ. Антиклинальная форма осей синфазности в верхней части аномалии обусловлена тем, что упругие волны имеют повышенную скорость распространения в гидратонасыщенных отложениях. Прогибание осей синфазности в нижней части связано с уменьшением значения скорости волн при их распространении в газонасыщенных коллекторах. Газ, формирующий структуры VAMP, вероятнее всего, является термогенным (Barth et al., 2006). Он генерируется в термально зрелых нефтегазоматеринских толщах и за счет вертикальной миграции попадает в ВЧР.

Аномалии VAMP впервые были выделены в конце 1960-х годов при проведении сейсморазведки USGS и ВМФ США (Scholl, Hart, 1993). В середине 1970-х годов аномалии VAMP были зарегистрированы при сейсморазведке компанией Exxon Exploration и USGS. Аномалии VAMP распространены в пределах Алеутской котловины, большая часть площади распространения

аномалий относится к исключительной экономической зоне США, однако на западе часть площади находится в российской зоне. Плотность распространения аномалий составляет от 0,3 до 9,7 на 100 км^2. Всего в структурах VAMP по Берингову морю прогнозируется примерно 31 трлн м^3 метана (Scholl, Hart, 1993). Из них объем метана в гидратном состоянии оценен в 25 трлн м3 (80,6%), объем метана в свободном состоянии – в 6 трлн м^3.

Аномалии, выявленные в настоящей работе в Алеутской котловине, имеют признаки VAMP. Этим объясняется их более глубокое положение, по сравнению с аномалиями на шельфе – в глубоководной впадине залежи свободного газа экранируются залежами ГГ.

3.6. Обобщение результатов по рассмотренным акваториям

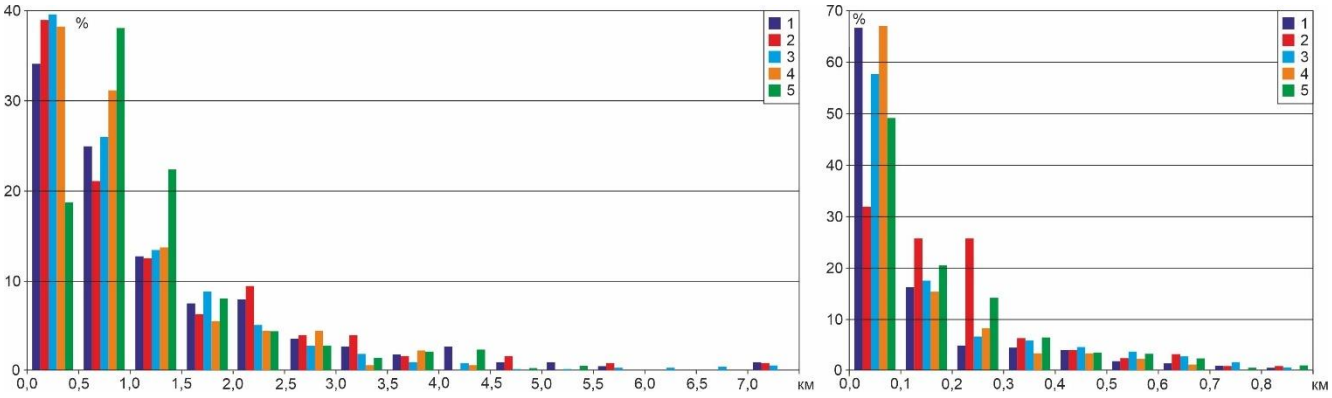
В результате интерпретации всех имевшихся временных разрезов, было выделено 2086 аномалий в ВЧР, указывающих на потенциальные зоны насыщения свободным газом. При этом плотность распространения возможных газонасыщенных объектов различается для рассмотренных морей, что отражено в таблице 1, показывающей средние расстояния между сейсмическими аномалиями. По данной таблице видно, что наиболее плотно потенциально газонасыщенные объекты расположены в Беринговом, Чукотском морях и в центральной части моря Лаптевых, наименее плотно – в Восточно-Сибирском.

Таблица 1 – Характеристика потенциальной газонасыщенности ВЧР рассмотренных акваторий

Акватория	**Количество выделенных аномалий**	**Среднее расстояние между аномалиями, км**
Море Лаптевых	230	15,4
Море Лаптевых (центральная часть)	519	11,4
Восточно-Сибирское море	129	63,6
Чукотское море	782	12,1
Море Бофорта	184	22,0
Берингово море	441	13,4
Охотское море*	218	19,5

Примечание: * По данным работ (Богоявленский и др., 2016; Bogoyavlensky et al., 2018a)

Различия полученной плотности распространения потенциальных газонасыщенных объектов по рассмотренным морям (таблица 1) могут быть обусловлены литологическими неоднородностями отложений ВЧР соответствующих регионов, влияющими на распространение резервуаров и флюидоупоров. Общая для всех акваторий закономерность распределения объектов по линейным размерам (рисунок 3.45а) может указывать на преимущественно небольшие размеры природных резервуаров в ВЧР изученных морей.



а) б)

Рисунок 3.45 – Распределение прогнозируемых газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и по глубинам верхних границ газонасыщения (б) в морях Лаптевых (1), Восточно-Сибирском (2), Чукотском (3), Бофорта (4) и Беринговом (5)

Общая закономерность глубинного распределения потенциально газонасыщенных объектов для морей Лаптевых, Чукотского, Бофорта и Берингова – превалирование объектов с верхней границей газонасыщения на глубинах до 100 м от морского дна – может быть связана с интенсивными тектоническими движениями в соответствующих регионах на стадии накопления отложений ВЧР, при которых образовались многочисленные разломы, доходящие до прионных отложений (см. разделы 3.1.2, 3.3.2, 3.4.2, 3.5.2), а также с наличием в придонных отложениях глинистых флюидоупоров (Bogoyavlensky et al., 2019a; Bogoyavlensky, Kishankov, 2020; Кишанков, 2021). Скопления газа могли сформироваться в результате субвертикальной миграции по образовавшимся разломам или генерации микробиального газа in situ непосредственно в придонных отложениях.

В Восточно-Сибирском море более спокойный режим осадконакопления, начавшийся с позднего миоцена, обуславливает меньшее количество разломов, доходящих до придонных отложений, и, соответственно, меньшую концентрацию в них газа, мигрирующего по разломам (см. раздел 3.2.2). Тем не менее, субвертикальная миграция газа по разломам, наряду с генерацией биогенного газа in situ также является ключевым фактором распространения газонасыщенных

объектов в Восточно-Сибирском море, что выражается концентрацией большей части потенциальных газонасыщенных объектов в верхних 300 м ВЧР (рисунок 3.45б). Меньшее количество разломов, доходящих до приповерхностных отложений в Восточно-Сибирском море, также могло являться причиной низкой плотности распространения потенциально газонасыщенных объектов, по сравнению с другими акваториями (см. таблицу 1).

В Охотском море преимущественное распространение потенциально газонасыщенных объектов на глубинах от 100 до 600 м (рисунок 1.8) может свидетельствовать о более глубоком залегании флюидоупоров в ВЧР, по сравнению с рассмотренными выше акваториями. Также в этом регионе возможна миграция газа из придонных отложений по разрывным нарушениям в гидросферу.

В морях Бофорта и Беринговом существование потенциальных ГГ по наличию горизонта BSR зафиксировано в ряде исследований прошлых лет (Andreassen et al., 1995; Grantz et al., 1989; Kvenvolden, Grantz, 1990; Sakamoto et al., 2011). Кроме того, в результате донного опробования, на шельфе моря Бофорта подтверждено существование ГГ (Hart et al., 2011; Paull et al., 2015). В море Лаптевых в настоящем исследовании горизонт BSR выделен впервые.

На всех рассмотренных акваториях BSR был выявлен в пределах континентального склона, являющегося характерной обстановкой для существования ГГ. Кроме того, положение участков разрезов с выделенными горизонтами BSR согласуется с зоной, благоприятной для образования и существования ГГ, определенной для Северного Ледовитого океана и прилегающих акваторий в работе (Bogoyavlensky et al., 2018b, 2019b, c; рисунок 3.46), на основе анализа обширной базы данных по придонным температурам воды NOAA World Ocean Database 13 (WOD13), в которой автор диссертации принимал непосредственное участие.

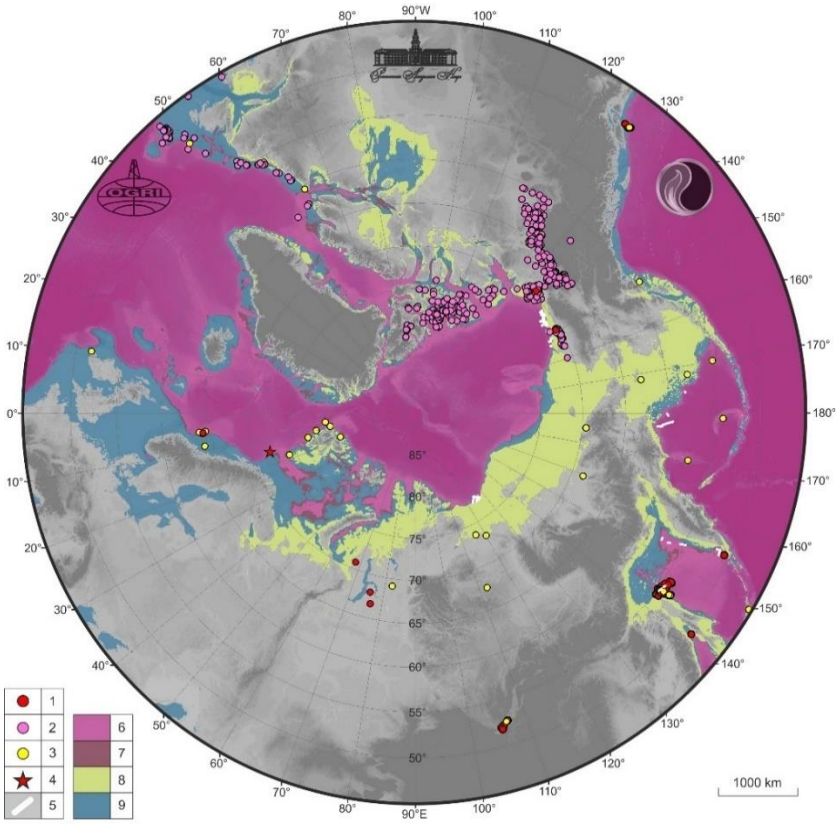


Рисунок 3.46 – Схема возможного распространения гидратов метана в Северном Ледовитом океане и на прилегающих акваториях, ограниченных широтой 45° (Bogoyavlensky et al., 2018b). 1 – подтверждено прямыми исследованиями, 2 – прогнозируются по каротажным данным, 3 – прогнозируются по сейсмическим данным и другим косвенным признакам, 4 – грязевой вулкан Хаакон Мосби с ГГ, 5 – выделенный горизонт BSR, 6 и 7 – зоны с благоприятными термобарическими условиями для существования гидратов метана для соленых и пресных пластовых вод соответственно, 8 – зона потенциального распространения ММП, 9 – отсутствие необходимых условий для существования гидратов метана на акваториях

Глава 4. Изучение распространения потенциальных многолетнемерзлых пород и газовых гидратов в Центрально-Лаптевском районе

Для части арктического шельфа, не покрывавшейся ледником во время последнего оледенения, максимально возможное распространение ММП принимается до изобаты 120 м, являвшейся примерной береговой линией при последнем оледенении (см. раздел 1.1.2). Тем не менее, исследования показывают, что не везде на больших глубинах шельфа ММП до сих пор существуют. Например, известно, что в настоящее время на шельфе моря Бофорта распространены ММП, в частности, вблизи месторождения Прудо Бэй (Craig et al., 1985; Osterkamp, Harrison, 1982; Sellmann, Chamberlain, 1980). Однако согласно результатам анализа преломленных волн в ВЧР по сейсмограммам ОПВ (Brothers et al., 2012), сплошные ММП в море Бофорта распространены лишь до глубин морского дна 20 м. При этом в канадском секторе моря, в районе дельты реки Маккензи, ММП отмечены по каротажным данным в скважинах, пробуренных на глубинах моря более 70 м (Weaver, Stewart, 1982). В Чукотском море на большей части акватории ММП, видимо, уже деградировали, что обусловлено существенным согревающим воздействием относительно теплого течения из Берингова моря (Thurston, Theiss, 1987). Вполне вероятно, что теплые тихоокеанские воды также способствовали интенсивной деградации ММП в американском секторе моря Бофорта. Однако они оказали значительно меньшее воздействие на ММП в пределах канадского сектора – видимо, их согревающий эффект постепенно снижался в направлении с запада на восток. Распространение ММП на шельфе арктических морей является благоприятным фактором существования ГГ в стабильном состоянии, а также, возможно, и в метастабильном состоянии за счет эффекта самоконсервации (см. раздел 1.1.3). В связи с этим, изучение современного распространения ММП необходимо для определения возможности существования на шельфе ГГ и прогноза объемов эмиссии газа в гидросферу и атмосферу.

В данной главе описывается изучение распространения потенциальных ММП и ГГ в Центрально-Лаптевском районе, где они, по аналогии с морем

Бофорта, могут не доходить до изобаты 120 м. Данное исследование имеет большое значение для анализа генезиса интенсивной эмиссии газа в ЦЛЗСГ, описанной в разделе 2.1. Присутствие ММП и ГГ в зоне сипов газа может свидетельствовать о том, что газ, выделяющийся через морское дно, выходит из ГГ, которые разлагаются в настоящее время за счет глобального потепления и деградации ММП, как предполагается в работах (Сергиенко и др., 2012; Shakhova et al., 2015, 2019 и др.). Отсутствие ММП и ГГ в пределах ЦЛЗСГ, напротив, должно показать, что ГГ не могут в данном случае являться источником выделяющегося газа, и последний мигрирует по системам разломов и субвертикальных трещин из традиционных залежей газа в свободном состоянии, сформировавшихся в ходе геологической истории на различных стратиграфических уровнях.

4.1. Анализ сейсмограмм общего пункта взрыва

Для исследования распространения преломленных волн в ВЧР с повышенными скоростями было использовано 3950 сейсмограмм ОПВ, зарегистрированных МАГЭ в Центрально-Лаптевском районе в 2009 г. по 28 сейсмопрофилям МОГТ (рисунок 3.18). Анализ скоростей осуществлялся с использованием ПО RadExPro компании «Деко-геофизика» по методике, описанной в разделе 1.3.2.

На рисунке 4.1 показаны крайние сейсмограммы ОПВ по профилю LS0907 (положение показано на рисунке 3.18), в юго-восточной части которого прогнозируется наличие ММП и/или ГГ (Богоявленский и др., 2021б, в). В этой части профиля у поверхности дна имеется горизонт (глубина от дна около 20 м), от которого в первых вступлениях на удалениях пунктов приема (ПП) от пунктов взрыва (ПВ) всего 330 м прослеживаются головные и многократные преломленные волны со скоростью около 3,3 км/с (рисунок 4.1А, годограф - красный пунктир), наиболее вероятно обусловленные наличием слоя ММП и/или ГГ. Также наблюдаются прямые волны, распространяющиеся в водной толще со скоростью около 1,43 км/с (годограф - зеленый пунктир) и отраженные волны от границ в

осадочном чехле. На рисунке 4.1А желтым пунктиром отмечен один из годографов отраженных волн, соответствующий горизонту на временном разрезе на времени двойного пробега около 2,3 с). Этот горизонт, по результатам интерпретации МАГЭ, маркирует окончание первой фазы рифтогенеза, происходившей в позднем мелу – палеоцене (Drachev et al., 2010).

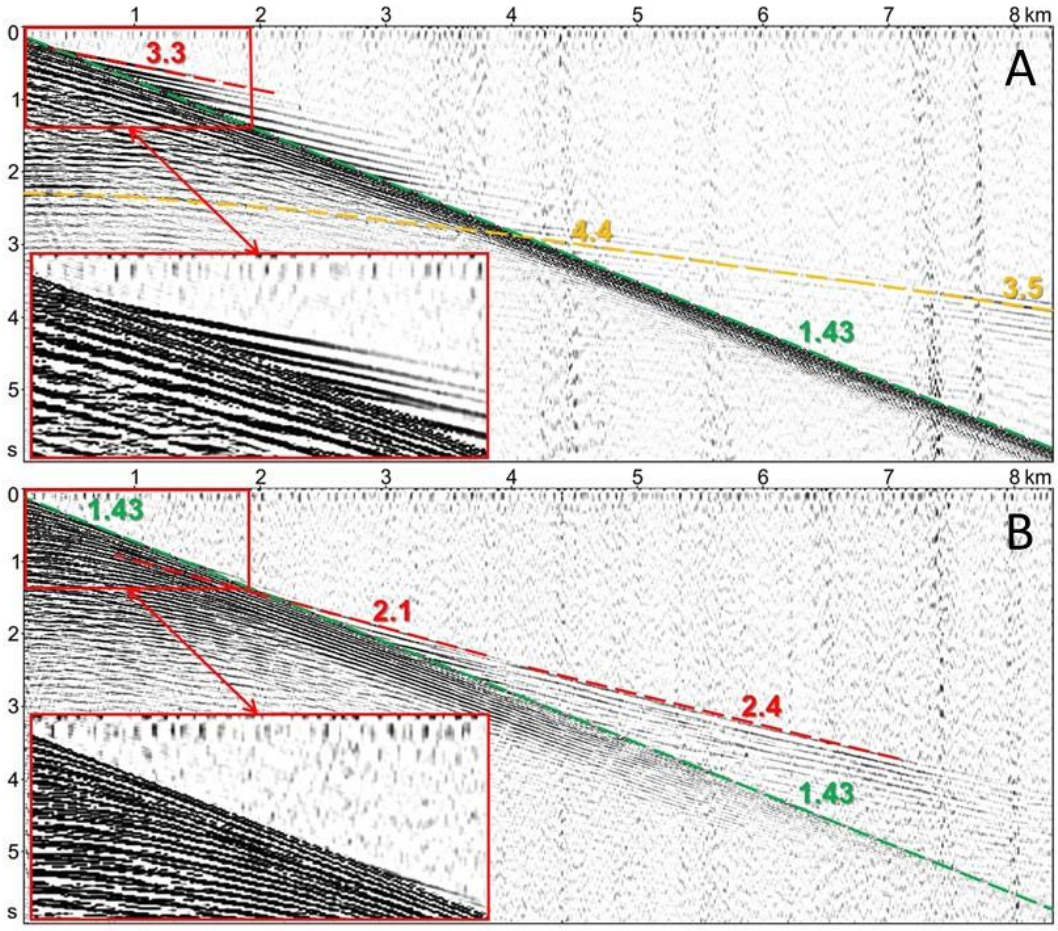


Рисунок 4.1 – Сейсмограммы ОПВ в юго-восточной (А) и северо-западной (В) частях профиля LS0907 МАГЭ (с дополнениями автора) по морю Лаптевых. Примечания: горизонтальная шкала – удаления пунктов приема (ПП) от пункта взрыва (ПВ). Положения ПВ сейсмограмм А и В – см. рисунок 3.18, F7A, F7B

На сейсмограммах ОПВ в северо-западной части профиля LS0907 (рисунок 4.1В) высокоскоростные преломленные волны от границ у морского дна не наблюдаются. Однако на удалениях ПВ-ПП более 2 км прослеживаются годографы

преломленных волн от двух границ со скоростями около 2,1 и 2,4 км/с. Эти границы находятся на глубинах около 600 и 800 м, верхний горизонт интерпретируется как кровля отложений верхнего миоцена – нижнего плейстоцена, находящихся в талом состоянии (Отчет…, 2011б).

Также в ходе работы формировались выборки записей отдельных каналов регистрации и их монтажи с сейсмограммами ОПВ. В качестве примера, на рисунке 4.2 показан монтаж записей 50-го канала по сейсмопрофилю LS0907 длиной 265 км (положение – см. рисунок 3.18, F8) с фрагментами крайних сейсмограмм ОПВ (каналы 1-50, база регистрации 612,5 м), рассмотренных выше (рисунки 4.1A и 4.1B).

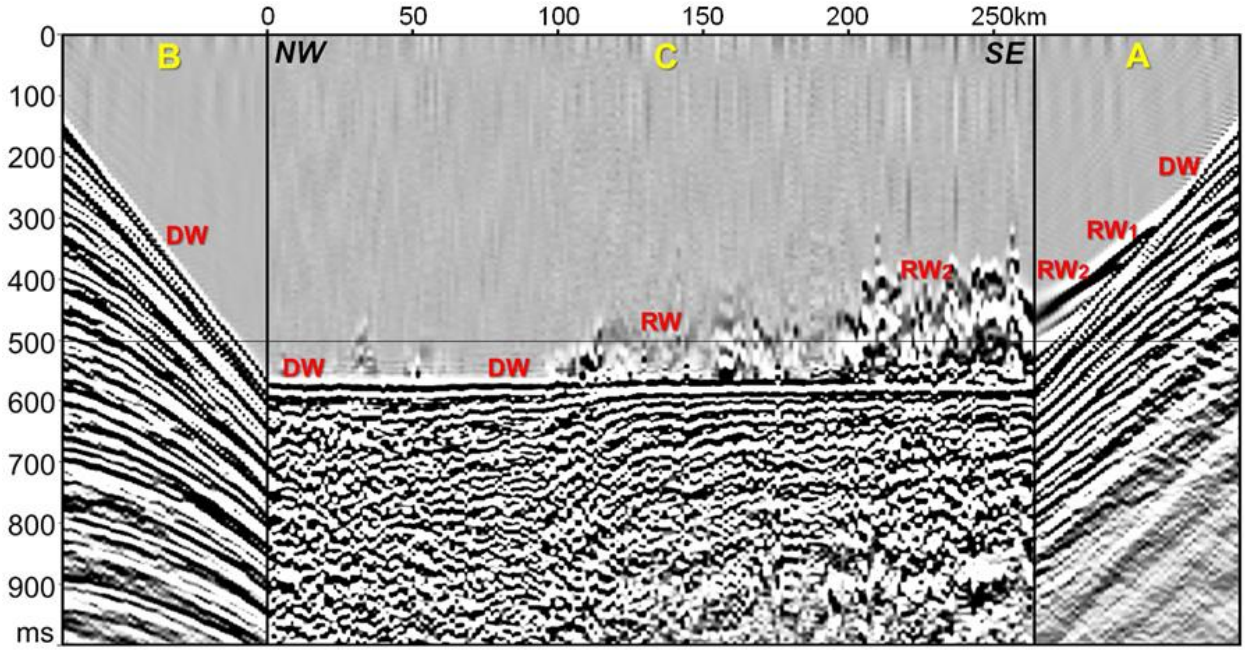


Рисунок 4.2 – Монтаж сейсмограмм ОПВ (A, B) и записей 50-го канала (C) сейсмопрофиля LS0907 МАГЭ (с дополнениями автора, положение – см. рисунок 3.18-F8)

На рисунке 4.2B в первых вступлениях наблюдаются прямые волны (DW), распространяющиеся в водной толще (скорость около 1,43 км/с), а преломленные волны отсутствуют. На рисунке 4.2A прослеживаются две интерферирующие преломленные волны RW1 и RW2 с кажущимися скоростями 2,4 и 3,2 км/с

соответственно. Они могли образоваться от поверхностей двух слоев в ММП. В ходе анализа скоростей по всем сейсмограммам ОПВ отдавалось предпочтение более высокоскоростным волнам.

Анализ кажущихся скоростей по отдельным сейсмограммам ОПВ выполнялся с шагом по профилям 1500 м (рассматривалась каждая 40-я сейсмограмма). Преломленные волны на сейсмограммах прослеживались на разных удалениях каналов регистрации: минимально – до 30-50 каналов (до 505-755 м, с учетом выноса первого канала от источника взрыва), максимально – до 100-150 каналов (до 1380-2005 м). На больших удалениях преломленные волны не прослеживались в связи с поглощающим эффектом.

Минимальным значением скорости распространения преломленных волн, указывающим на наличие ММП, было принято 2,3 км/с. Кроме этого, было использовано второе граничное значение скорости 2,8 км/с – для разделения ММП на более и менее акустически жесткие. Указанные пороговые значения применялись в исследовании специалистов USGS по морю Бофорта (Brothers et al., 2012). Стоит отметить, что данные значения скоростей справедливы для песчаных пород, в глинистых отложениях они ниже. На рисунке 4.3 показана итоговая схема распределения скоростей преломленных волн в ВЧР для Центрально-Лаптевского района, построенная в ПО ArcGIS.

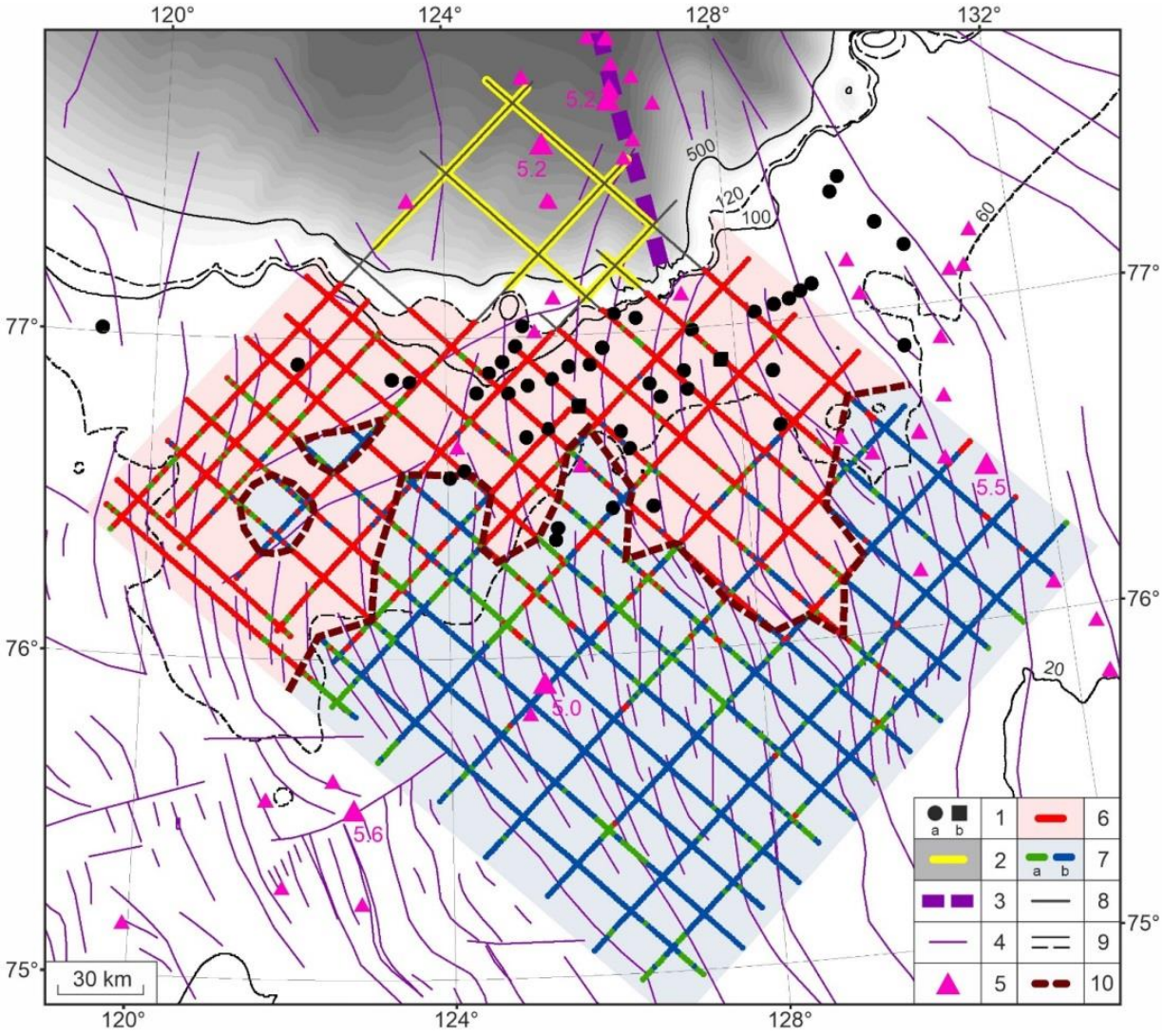


Рисунок 4.3 – Расположение сипов газа и результаты анализа состояния придонных отложений в Центрально-Лаптевском районе. Обозначения: 1 a, b – сипы газа (b – участки с высокой концентрацией сипов); 2 – признаки наличия ГГ на континентальном склоне (горизонт BSR); 3 – ось хребта Гаккеля; 4 – глубинные 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 – прогнозируемая граница между зоной присутствия ММП и/или ГГ и преимущественного их отсутствия

Как видно на схеме (рисунок 4.3), в результате работы выявлены две существенно различающиеся зоны: северная и южная. Северная зона

характеризуется преимущественным отсутствием преломленных волн от неглубоких (до 400-500 м) горизонтов или их присутствием со скоростями ниже 2,3 км/с, что ассоциируется с отсутствием или крайне низким содержанием ММП. Однако в западной части северной зоны имеются два небольших полигона (около 25х25 и 30х20 км) с повышенными скоростями, видимо, свидетельствующие об островной мерзлоте. В южной зоне на сейсмограммах ОПВ наблюдаются преломленные волны от пластов с повышенными скоростями (2,3-4,0 км/с) в ВЧР, которые с большой вероятностью указывают на отложения с наличием ММП и/или ГГ, имеющих близкие физические свойства. Более низкие скорости (2,3-2,8 км/с) интерпретируются как участки с более интенсивной деградацией ММП. Также в южной зоне присутствуют небольшие участки (до 2-9 км), где преломленные волны не наблюдаются, что может указывать на сквозные талики.

Северная зона условно ограничена на севере изобатой 120 м, которая являлась приблизительной береговой линией во время последнего оледенения (Collett, Dallimore, 2000). Граница между северной и южной зонами удалена от берега в районе дельты Лены на 250-330 км и проходит примерно на уровне изобаты 60 м, местами отклоняясь, максимально до изобат 85 и 45 м. Отклонения границы могут быть связаны с литологическими неоднородностями отложений ВЧР и различиями в тепловых потоках. В юго-восточном направлении граница доходит до изобаты 45 м по простиранию грабен-рифтов, которые продолжают хребет Гаккеля на шельфе в сторону материка. Переход из южной зоны в северную почти везде характеризуется постепенным снижением скоростей преломленных волн в ВЧР, что объясняется увеличением степени деградации ММП в северном направлении, связанным с наступлением моря при трансгрессии с севера на юг. ЦЛЗСГ находится в пределах северной зоны, соответственно, результаты настоящей работы свидетельствуют об отсутствии ММП и ГГ в зоне эмиссии газа.

4.2. Анализ придонных температур воды

Кроме анализа распространения скоростей преломленных волн в ВЧР, по Центрально-Лаптевскому району были рассмотрены придонные температуры воды. Целью данного исследования являлось установить, изменяются ли придонные температуры при потеплении климата, начавшемся примерно в начале 1980-х годов и продолжающимся до настоящего времени.

Потенциальное потепление придонных вод должно повышать температуру в ВЧР и, следовательно, ускорять процессы деградации ММП и диссоциации ГГ, если считать, что они существуют в районе исследования, и в таком случае, данными процессами может объясняться эмиссия газа в ЦЛЗСГ. Если потепления придонной воды не происходит, то напротив, современное изменение климата, деградация ММП и диссоциация ГГ не могут объяснять газовую эмиссию в районе исследования.

Для анализа придонных температур воды были выгружены данные из базы данных NOAA WOD, находящейся в открытом доступе (Boyer et al., 2018). База WOD содержит информацию о физико-химических характеристиках воды, таких как температура, соленость, показатель pH, измеренных в различных точках Мирового океана. Совокупность значений температур по морю Лаптевых была загружена в ПО Ocean Data View и затем фильтровалась следующим образом. Для каждой точки измерения выбиралось значение, соответствующее наибольшей глубине. Затем были оставлены только те значения, которые относились к глубинам, отличающимся от глубин морского дна в соответствующих точках измерения не более чем на 10%. Глубины дна определялись по базе данных Общей батиметрической карты океанов GEBCO (General Bathimetric Chart of the Oceans; General…, 2020)

На рисунке 4.4 показана картографическая схема распределения значений придонных температур воды, построенная в ПО ArcGIS. На схеме прослеживается превалирование отрицательных температур, положительные значения присутствуют у побережья континента и островов, что объясняется летним

прогревом воды и активным привносом прогретой пресной воды реками (Лена, Анабар, Оленек и др.). Положительные значения (до 2 °С) наблюдаются и у бровки шельфа над континентальным склоном, что может быть связано с адвекцией вод Северо-Атлантического течения. В Центрально-Лаптевском районе 96,2% замеров выполнено в летнее время, в связи с чем значения температур воды на этой площади выше среднегодовых, как и в других частях моря Лаптевых, особенно на мелководье вблизи берегов, где они самые высокие.

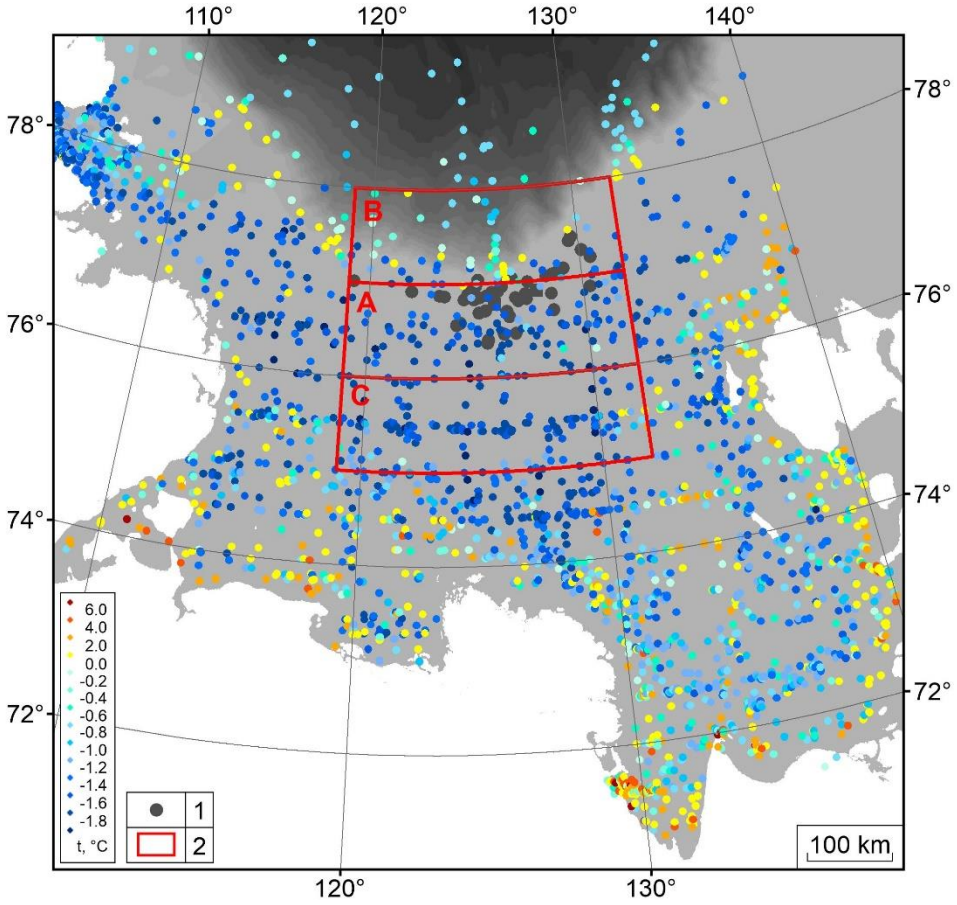


Рисунок 4.4 – Картографическая схема придонных температур воды в море Лаптевых. Обозначения: 1 – сипы газа (Баранов и др., 2019; Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Steinbach et al., 2021), 2 – полигоны анализа придонных температур воды

Для оценки влияния современного глобального потепления на придонные воды в пределах Центрально-Лаптевского участка рассмотрена история изменения

придонных температур в трех отдельных полигонах района исследования (A, B и C на рисунке 4.4). Первый полигон (76-77°N, 119-132°E – рисунок 4.4A) находится в зоне шельфа и включает основную часть газовых сипов. Второй полигон (77-78°N, 119-132°E – рисунок 4.4B) включает как шельф, так и континентальный склон. Третий полигон (75-76°N, 119-132°E – рисунок 4.4C), как и первый, занимает только зону шельфа, однако находится ближе к берегу. Данные полигоны выбраны в связи с тем, что они отличаются глубинами дна и, соответственно, термобарическими условиями для существования стабильных ГГ.

На рисунке 4.5 показаны графики изменения придонных температур в зависимости от года измерений, построенные для трех полигонов, указанных выше. В результате фильтрации массива значений температур, описанной выше, в анализ данных вошли значения, измеренные с 1932 по 2016 гг. Аппроксимирующая линия температуры, измеренной в безледовые периоды, для первого полигона (рисунок 4.5A), в котором сосредоточена основная часть сипов, показывает отсутствие прогрева придонной воды в XX-XXI вв., ее средние температуры составляют около -1,5 °C. Ограниченное количество значений (5), измеренных в ледовые периоды, находится в тренде безледовых замеров. Однако тренд изменения температур на втором полигоне (рисунок 4.5B), включающем область континентального склона, показывает прогрев придонных вод в XX-XXI вв. (с 1948 по 2016 гг.) на 0,8 °C. Температурный тренд для третьего полигона (рисунок 4.5C) показывает охлаждение придонных вод в 1932-2008 гг. примерно на 0,5 °C.

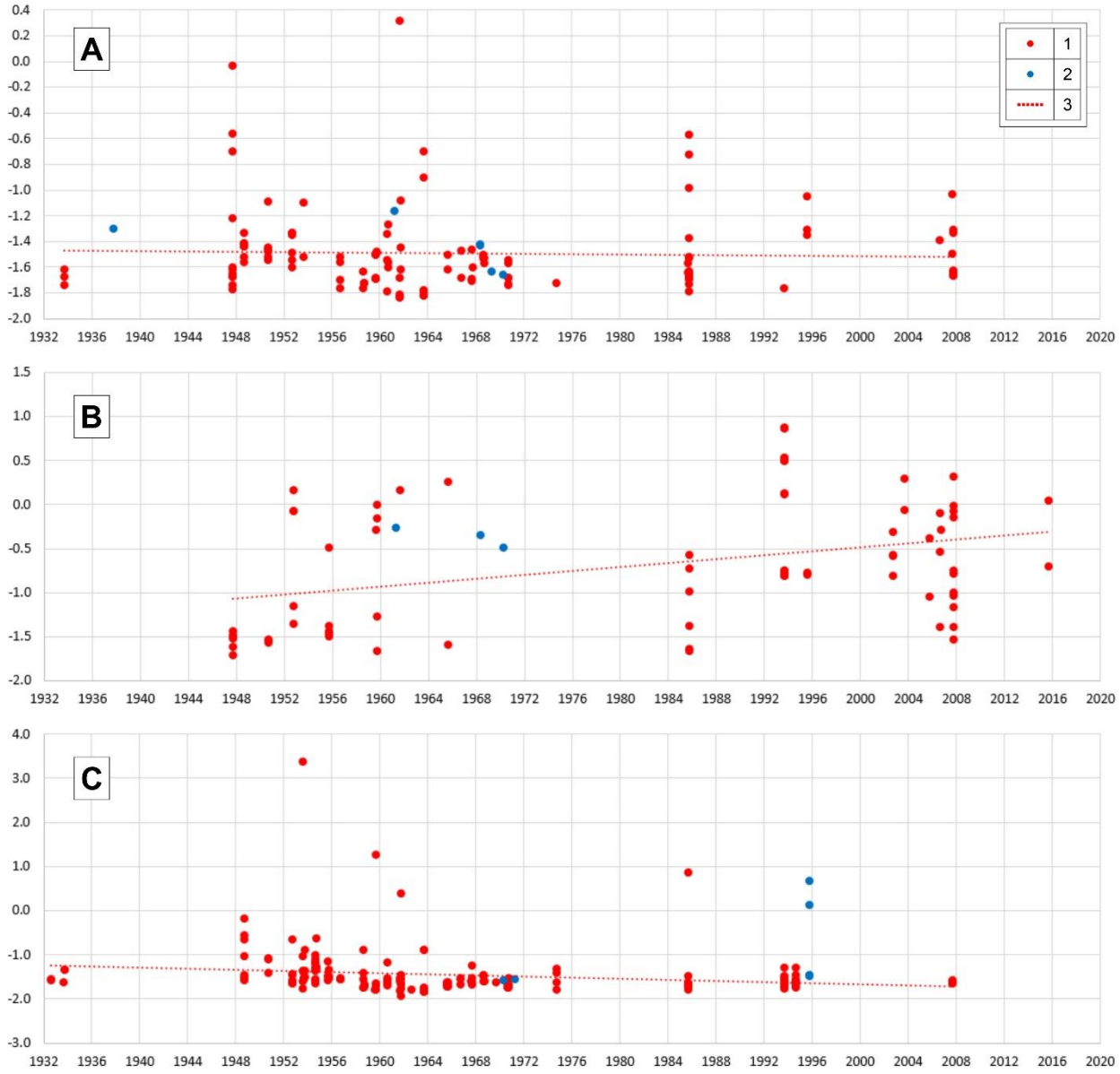


Рисунок 4.5 – Мониторинг изменений придонных температур воды в пределах полигонов 76-77°N, 119-132°E (A), 77-78°N, 119-132°E (B) и 75-76°N, 119-132°E (C) в 1932-2020 гг. Обозначения: 1 и 2 – температуры в безледовые (1) и ледовые (2) периоды замеров, 3 – тренды изменения температуры в безледовые периоды замеров

4.3. Комплексный анализ

В результате постледниковой трансгрессии затопленные ММП оказались в значительно более теплых условиях (до -1,8 °C), по сравнению с сопредельными материковыми ММП (ниже -10 °C), что стало причиной постепенной деградации

ММП сверху. Кроме этого, конвективные тепловые потоки из недр Земли в рифтовых зонах способствовали усиленному прогреву ММП снизу и, таким образом, могли ускорить общий процесс их оттаивания. Анализ придонных температур воды на полигоне, включающем большинство газовых сипов, не показал их увеличения (рисунок 4.5А), что не согласуется с теорией о современном потеплении климата как факторе деградации потенциальных ММП в пределах ЦЛЗСГ. Важно отметить, что в зоне, расположенной южнее ЦЛЗГС (рисунок 4.5С), в XX-XXI вв. даже произошло общее снижение придонных температур воды. Это обстоятельство указывает на то, что, если ММП существуют южнее ЦЛЗСГ, их современная деградация не имеет связи с возникшей аномалией глобального потепления.

Результаты анализа волновых полей сейсмограмм ОПВ продемонстрировали, что в северной части Центрально-Лаптевского района на глубинах морского дна свыше 60 м ММП и ГГ в основном отсутствуют (рисунок 4.3). Это обусловлено тем, что при постледниковой трансгрессии море наступало с севера на юг. Выделенная в настоящей работе граница распространения сплошных ММП согласуется с результатами математического моделирования, выполненного ранее в работах (Matveeva et al., 2020; Romanovskii et al., 2005), согласно которым ММП имеют сплошное распространение от побережья до изобат 60 м (Romanovskii et al., 2005) и 50 или 100 м (Matveeva et al., 2020), в зависимости от принимаемых условий по температурам и временным рамкам образования и оттаивания ММП.

Отсутствие современных термобарических условий существования стабильных гидратов метана в ЦЛЗСГ подтверждается выполненным моделированием. На рисунке 4.6 показаны кривые стабильности гидратов метана, рассчитанные в ПО CSMHYD (Sloan, 1998) для двух значений солености пластовых вод. Первое значение отражает среднюю соленость придонных вод в пределах полигона А (рисунок 4.4А), включающего большинство газовых сипов, которая была определена по значениям из базы данных WOD18 (33,7 ‰). Второе значение солености равняется нулю, для учета возможной ситуации, при которой пресные

приповерхностные пластовые воды изолированы от водной толщи акватории слабо проницаемыми отложениями.

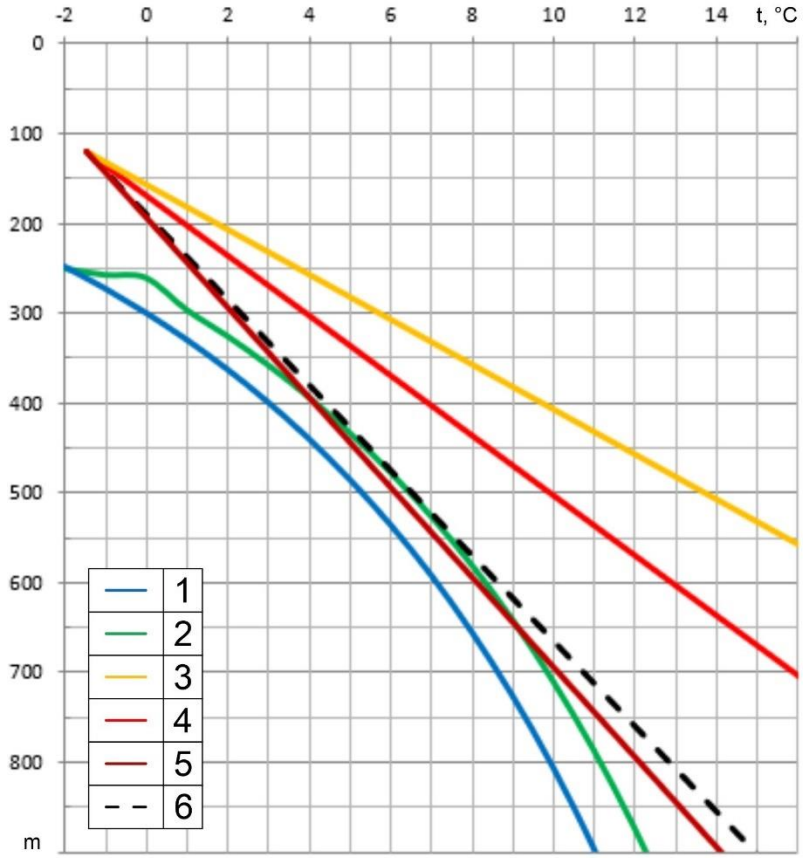


Рисунок 4.6 – Сопоставление кривых стабильности гидратов метана для соленостей 33,7 ‰ (1) и 0 ‰ (2) и геотермических градиентов (°С/км): 40 (3), 30 (4), 20 (5), 21,1 (6)

На рисунке 4.6 показаны графики для трех теоретических значений геотермических градиентов – 20, 30, 40 °С/км. В качестве начальной точки графиков установлена максимальная глубина дна в местах нахождения сипов газа (120 м) и средняя температура воды на дне полигона А (-1,5 °С) (рисунок 4.5А). При сопоставлении кривых стабильности гидратов метана с линиями градиентов становится ясно, что потенциальное существование гидратов метана возможно только при очень низких значениях геотермического градиента – до 21,1°С/км, что в реальности практически невозможно, в связи с высоким тепловым потоком, прогнозируемым в ЦЛЗСГ по фактическим данным. Согласно Глобальной базе

данных теплового потока GHFD Международной комиссии по тепловому потоку IHFC (The Global…, 2022), в 80 км к северо-востоку от ЦЛЗСГ, на континентальном склоне моря Лаптевых значения теплового потока достигают 70-100 мВт/м^2 (глубины дна около 500 и 1500 м). При этом для рифтовых зон шельфа моря Лаптевых прогнозируется тепловой поток более 100 мВт/м^2 (Matveeva et al., 2020).

Важно понимать, что ряд параметров, включающих состав гидратообразующего газа, литологический состав приповерхностных пород, способен увеличить диапазон глубин, на которых могут формироваться стабильные ГГ. Однако ввиду недостатка имеющихся фактических данных, на данном этапе работы анализ влияния указанных факторов для ЦЛЗСГ не представляется в достаточной мере обоснованным.

Обобщая вышесказанное можно сформулировать следующие выводы. Совокупность геолого-геофизических и криологических условий, в которых находится ЦЛЗСГ, включая большую мощность осадочного чехла, наличие многочисленных глубинных разломов, современную сейсмичность, отсутствие ММП и ГГ, делает данную зону одной из самых уникальных областей дегазации Земли на мелководном шельфе Арктики. В данной зоне сформировалось крупное (возможно, более чем 80х220 км) окно длительной интенсивной газовой эмиссии с прямой миграцией глубинного термогенного газа через системы разрывных нарушений. В будущем при последующих сейсмических событиях в регионе прогнозируется дополнительная активизация сипов газа.

Присутствие ГГ на континентальном склоне моря Лаптевых прогнозируется на основе выделения горизонта BSR, что описано в разделе 3.1. В пределах полигона В (77-78°, рисунок 4.4В), охватывающего континентальный склон, средние придонные температуры воды в XX-XXI вв. увеличились с -1,1 °С до -0,3 °С. Положительные придонные температуры воды могут быть связаны с циркуляцией относительно теплого Северо-Атлантического течения, температура которого в последние десятилетия могла подняться вследствие потепления климата.

Согласно эмпирическим кривым стабильности ГГ (Sloan, 1998, рисунок 4.6), гидраты метана при температуре -0,3 °С могут диссоциировать при глубинах морского дна 260-290 м, в зависимости от солености приповерхностных пластовых вод. Следовательно, на указанных глубинах дна также возможно присутствие сипов газа. Согласно работе (Steinbach et al., 2021), на континентальном склоне отмечены места с повышенным содержанием метана в воде. Эти места находятся в районе начала прослеживания горизонта BSR (см. рисунок 3.18). Таким образом, вероятно, в настоящее происходит разложение ГГ в верхней части континентального склона в результате увеличения температуры придонной воды вследствие потепления климата. Стоит отметить, что во время экспедиции НИС «Академик Келдыш» в 2020 г. сипы газа обнаружены на глубине около 300 м (Bubbling …, 2020), они приурочены к континентальному склону моря Лаптевых.

Известным аналогичным регионом с современной эмиссией газа у выклинивания зоны стабильности ГГ, является западный шельф Шпицбергена (Bunz et al., 2012; Knies et al., 2018; Wallman et al., 2018 и др.).

На данном этапе исследования остается неясным, в каких объемах выделяющийся газ достигает атмосферу, поскольку указанные глубины предполагаемой диссоциации ГГ в верхней части континентального склона моря Лаптевых достаточно велики, и газ может практически в полной мере подвергаться процессам окисления и растворения в водной толще.

Заключение

В ходе диссертационной работы исследован вопрос потенциальной газоносности ВЧР акваторий северных морей Восточной Сибири и Дальнего Востока России и соседнего моря Бофорта на шельфе Аляски (США).

В результате интерпретации временных разрезов МОГТ общей протяженностью около 40 тыс. км по морям Лаптевых, Восточно-Сибирскому, Чукотскому, Бофорта и Берингову, суммарно выявлено 2086 аномалий сейсмической записи, указывающих на потенциально газонасыщенные объекты в ВЧР.

Построенные модели распространения объектов в ВЧР показали, что выделенные объекты преимущественно имеют верхнюю границу предполагаемого газонасыщения на глубинах до 100-300 м от морского дна и характеризуются линейными размерами до 2-2,5 км. Преимущественное распространение потенциально газонасыщенных объектов в приповерхностных отложениях ВЧР объясняется как генерацией микробиального газа in situ, так и субвертикальной миграцией газа по разломам из отложений, расположенных ниже по разрезу. Связь распределения газонасыщенных объектов в ВЧР с миграцией по разломам свидетельствует о высоковероятном наличии УВ в отложениях, которые в настоящее время на основе накопленной геолого-геофизической информации прогнозируются как высоко нефтегазоперспективные. Установлено, что газонасыщенность придонных отложений в рассмотренных регионах зависит от их тектонической активности на поздних стадиях осадконакопления.

Построенные картографические схемы распространения потенциально газонасыщенных объектов в ВЧР могут служить важной информацией для повышения эффективности и безопасности бурения глубоких нефтегазопоисковых скважин на рассмотренных акваториях. С другой стороны, возможно, в будущем некоторые из выделенных объектов будут представлять самостоятельный интерес для обеспечения потребностей в энергетических ресурсах близлежащих населенных пунктов и промышленных объектов на побережье.

Детальные работы по Центрально-Лаптевскому району, включавшие комплексный анализ материалов сейсморазведки МОГТ МАГЭ, выполненной в 2009 г., и данных по придонным температурам воды NOAA позволили сделать вывод об отсутствии ММП и ГГ в ЦЛЗСГ и высоковероятном термогенном источнике газа, выходящего через морское дно. Термогенный генезис газа подтверждается известными данными изотопных анализов (Steinbach et al., 2021). Эмиссия газа через сипы в данном районе является результатом процесса миграции газа из существующих залежей в свободном состоянии в гидросферу по разломам, доходящим до морского дна вследствие активных сейсмических событий и неотектонических движений.

На континентальном склоне акваторий морей Лаптевых, Бофорта, Берингова по временным разрезам МОГТ выявлен отражающий горизонт BSR, указывающий на потенциальное наличие ГГ, причем в море Лаптевых данный горизонт выявлен впервые. Область распространения горизонта BSR согласуется с зоной благоприятных термобарических условий для стабильного существования гидратов метана, определенной в работе (Bogoyavlensky et al., 2018b) при участии автора диссертации.

Установлено, что в ВЧР континентального склона моря Лаптевых в районе границы области распространения горизонта BSR у бровки шельфа в настоящее время высоко вероятна диссоциация ГГ, обусловленная потеплением за последние десятилетия придонных вод.

Представляется важным продолжение выполненных исследований и для других арктических и субарктических морей – для установления новых закономерностей распределения потенциальных газовых залежей и сравнения их с установленными в настоящей работе. Такие исследования имеют высокое значение при анализе особенностей геологического развития различных акваторий, поиске традиционных месторождений УВ, повышении безопасности бурения глубоких скважин и рассмотрении вопросов глобального изменения климата.

Выполнению данной работы способствовали: многолетнее сотрудничество с АО «МАГЭ»; открытый доступ к базам данных USGS и WOD18 NOAA и к программному обеспечению CSMHYD Центра изучения гидратов Горной школы Колорадо (Colorado School of Mines).

Список литературы

1. Аветисов Г. П. Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 3. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. – С. 104-114.
2. Аветисов Г. П. О границе литосферных плит на шельфе моря Лаптевых // Доклады академии наук. Геология. – 2002. – Т. 385. - № 6. – С. 793-796.
3. Агапитов Д. Д. Геологическое строение и нефтегазоносность Анадырского бассейна. Автореф. дисс. канд. – М.: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2004. – 24 с.
4. Агапитов Д. Д., Арюпин П. Н. Нефтегазовый потенциал Чукотки и прилегающего шельфа // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2001. - № 3. – С. 20-28.
5. Анисимов О. А., Борзенкова И. И., Лавров С. А., Стрельченко Ю. Г. Современная динамика подводной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и снег. – 2012. – № 2. – С. 97-105.
6. Анисимов О. А., Забойкина Ю. Г., Кокорев В. А., Юрганов Л. Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и снег. – 2014. – № 2. – С. 69-81.
7. Антипов М. П., Бондаренко Г. Е., Бордовская Т. О., Шипилов Э. В. Анадырский бассейн северо-восток Евразии, Беринговоморское побережье, геологическое строение, тектоническая эволюция и нефтегазоносность. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2008. – 53 с.
8. Антипов М. П., Бондаренко Г. Е., Бордовская Т. О., Шипилов, Э. В. Тектоническая эволюция Анадырской впадины в связи с перспективами ее нефтегазоносности (Северо-Восток Евразии) // Геотектоника. – 2009. – № 5. – С. 74-96.
9. Архипов А. Я., Корчагина Ю. И., Файер М. М. Генерация и первичная миграция углеводородов в условиях катагенеза // Условия образования нефти и газа в осадочных бассейнах. – М.: Наука. – 1977. – С. 35-46.

10. Атлас Арктики / Под ред. А. Ф. Трешникова. – М.: Гл. упр. геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1985. – 203 с.
11. Атлас нефтяной геологии российского сектора Чукотского моря. – Южно-Сахалинск: ФГУП "Дальморнефтегеофизика", 2002. – 160 с.
12. Ахманов Г. Г., Хлыстов О. М., Соловьева М. А. и др. Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз. Байкал // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2018. – № 5.
13. Баранов Б. В., Лобковский Л. И., Дозорова К. А., Цуканов Н. В. Система разломов, контролирующих метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // Докл. Акад. наук. – 2019. – Т. 486. – № 3. – С. 354-358.
14. Богданов Н. А., Хаин В. Е., Розен О. М. и др. Объяснительная записка к тектонической карте морей Карского и Лаптевых и севера Сибири (масштаб 1 : 2 500 000). – М.: Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН, 1998. – 127 с.
15. Богоявленский В. И. Обработка данных МПВ на ЭВМ // Сейсморазведка. Справочник геофизика. Книга вторая, гл. 2. – М.: Недра, 1990. – С. 90-115.
16. Богоявленский В. И. Изучение неоднородностей в верхней части разреза и расчет статических поправок по записям преломленных волн // Бюллетень ассоциации Нефтегазгеофизика. – М.: ВНИИОЭНГ, 1992. - № 2. – С. 16-21.
17. Богоявленский В. И. Сейсморазведка неоднородных и анизотропных сред методом преломленных волн. Автореф. дисс. доктора технических наук. – М.: ГАНГ имени И.М. Губкина, 1996. – 46 с.
18. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография. – М.: ВЭО, 2014а. – С. 11-175.
19. Богоявленский В. И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане // Арктика: экология и экономика. – 2014б. – № 4. – С. 16.

20. Богоявленский В. И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. – 2015. - № 6. – С. 4-9.
21. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. – 2020. – № 1 (149). – С. 97–118.
22. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. – 2021. – Т. 11. - № 1. – С. 51-66.
23. Богоявленский В. И., Керимов В. Ю., Ольховская О. О. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Охотское море // Нефтяное хоз-во. – 2016. - № 6. – С. 43-47.
24. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы. – 2018. - № 2. – С. 60-70.
25. Богоявленский В. И., Казанин Г. С., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых // Бурение и нефть. – 2018а. - № 5. – С. 20-29.
26. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Берингово море // Бурение и нефть. – 2018. - № 9. – С. 4-12.
27. Богоявленский В. И., Янчевская А. С., Богоявленский И. В., Кишанков А. В. Газовые гидраты на акваториях Циркумарктического региона // Арктика: экология и экономика. – 2018б. - № 3 (31). – С. 42-55.
28. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. – 2019. – Т. 34. – № 2. – С. 31-47.

29. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Чукотское море (Россия и США) // Арктика: экология и экономика. – 2020. - № 2 (38). – С. 45-58.
30. Богоявленский В. И., Казанин А. Г., Кишанков А. В., Казанин Г. А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. – 2021а. – Т. 11. - № 2. – С. 178-194.
31. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021б. – Т. 500. – № 1. – С. 70-76.
32. Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Субаквальная криолитозона и сипы газа на шельфе моря Лаптевых // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике / Под ред. В. П. Мельникова и М. Р. Садуртдинова. – Салехард, 2021в. – С. 59-62.
33. Бородкин В. Н., Курчиков А. Р., Недосекин А. С. и др. Характеристика геологической природы инверсионных кольцевых структур в пределах арктических районов Западной Сибири как критерия нефтегазоносности // Геология нефти и газа. – 2017. – № 3. – С. 69-75.
34. Бородкин В. Н., Смирнов О. А., Курчиков А. Р. и др. К вопросу прогноза зон аномально высоких пластовых давлений в разрезе Баренцево-Карского шельфа с учетом данных бурения и сейсморазведки // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 4. – С. 12-19.
35. Бофорта море // Большая российская энциклопедия. Том 4. – 2006. – С. 104-105.
36. Васильчук Ю. К. Рубеж плейстоцена и голоцена-около 10 тысяч лет назад-время коренной смены типичных геокриологических образований // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16. – № 3. – С. 29-38.
37. Вассоевич Н. Б. Принципиальная схема вертикальной зональности в генерации углеводородных газов и нефти // Изв. АН СССР. – 1974. – С. 17-29.

38. Вассоевич Н. Б. Корчагина Ю. И., Лопатин Н. В., Чернышев В. В. Главная фаза нефтеобразования // Вестник МГУ. – 1969. – Т. 4. – С. 3-27.
39. Вержбицкий В. Е., Соколов С. Д., Франтцен Э. М. и др. Тектоническая структура, осадочные бассейны и перспективы нефтегазоносности шельфа Чукотского моря (Российская Арктика) // Газовая промышленность. – 2010. – Т. 14. – С. 32-37.
40. Виноградов В. А., Драчев С. С. К вопросу о тектонической природе фундамента юго-западной части шельфа моря Лаптевых // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2000. – Т. 372. – № 1. – С. 72-74.
41. Гамбурцев Г. А., Ризниченко Ю. В., Берзон И. С. и др. Корреляционный метод преломленных волн. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – Т. 239. – С. 14.
42. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Субмаринные газовые гидраты. – СПб: ВНИИОкеанология, 1994. – 199 с.
43. ГОСТ Р 57123-2016. Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Проектирование с учетом сейсмических условий. – 2016.
44. Грамберг И. С., Деменицкая Р. М., Секретов С. Б. Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающего звена рифтового пояса хребта Гаккеля – Момского рифта // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 311. - № 3. – С. 689-694.
45. Грамберг И. С. Супруненко О. И., Вискунова К. Г. и др. Нефтегазоносность Арктического супербассейна // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 12. – С. 24-30.
46. Грамберг И. С., Пискарев А. Л. Этапы осадконакопления и тектогенез Лаптевоморского бассейна // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2002. – Т. 382. – № 1. – С. 82-86.

47. Гулиев И. С., Фейзуллаев А. А., Алиев А. А., Мовсумова У. А. Состав газов и органического вещества пород-выбросов грязевых вулканов Азербайджана // Геология нефти и газа. – 2005. – № 3. – С. 27-31.
48. Гулиев И. С., Керимов В. Ю. Углеводородная дегазация Земли: мониторинг, масштабы и геоэкологические последствия // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 4 (23). – С. 79.
49. Гулиев И. С., Юсубов Н. П., Гусейнова Ш. М. О механизме образования грязевых вулканов в Южно-каспийской впадине по данным 2D- и 3D-сейсморазведки // Физика Земли. – 2020. – № 5. – С. 131-138.
50. Дараган-Сущова Л. А., Петров О. В., Дараган-Сущов Ю. И., Рукавишникова Д. Д. Новый взгляд на геологическое строение осадочного чехла моря Лаптевых // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 41. – С. 5-16.
51. Деев М. Г. Берингово море // Большая российская энциклопедия. Том 3. – 2005. – С. 367-369.
52. Деев М. Г. Лаптевых море // Большая российская энциклопедия. Том 16. – 2010. – С. 712.
53. Деев М. Г., Мирлин Е. Г. Чукотское море // Большая российская энциклопедия. Том 34. – 2017. – С. 649-650.
54. Дзюбло А. Д., Сторожева А. Е., Зонн М. С., Агаджанянц И. Г. Ресурсы углеводородов дальневосточного шельфа и результаты их освоения // Вести газовой науки. – 2019. – № 2 (39). – С. 3-16.
55. Дзюбло А. Д., Алтухов Е. Е., Бенько Г. А. Поверхностный газ как риск при освоении нефтегазовых месторождений в Обской и Тазовской губах Карского моря // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2021а. – № 6. – С. 52-58.
56. Дзюбло А. Д., Перекрестов В. Е., Алексеева К. В. Проблемы промышленной безопасности при бурении скважин и обустройстве нефтегазовых

месторождений на шельфе арктических и субарктических морей // Известия вузов. Горный журнал. – 2021б. - № 8. – С. 24-33.

57. Драчев С. С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. – 2000. – № 6. – С. 43-58.
58. Драчев С. С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. – 2002. – № 6. – С. 60-76.
59. Драчев С. С., Елистратов А. В., Савостин Л. А. Структура и сейсмостратиграфия шельфа Восточно-Сибирского моря вдоль сейсмического профиля “Индигирский залив – остров Жаннетты” // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2001. – Т. 377. – № 4. – С. 521-525.
60. Евдокимова Н. К., Яшин Д. С., Ким Б. И. Углеводородный потенциал отложений осадочного чехла шельфов восточно-арктических морей России (Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского) // Геология нефти и газа. – 2008. – № 2. – С. 3-12.
61. Епинатьева А. М., Голобушин Г. М., Левин А. Л. и др. Метод преломленных волн. – М.: Недра, 1990. – 290 с.
62. Захаренко В. С., Казанин Г. С., Павлов С. П. Предпосылки и условия формирования газогидратов на Штокмановской площади Баренцева моря // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 2 – С. 394-402.
63. Истомин В. А., Якушев В. С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
64. Истомин В. А., Якушев В. С., Махонина Н. А. и др. Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовые гидраты, спецвыпуск приложения к журналу «Газовая промышленность». – 2006. – С. 36-46.
65. Казанин А. Г., Казанин Г. С., Иванов Г. И., Саркисян М. В. Инновационные инженерно-геологические технологии на арктическом шельфе России // NefteGaz.RU. – 2017а. - № 1. – С. 120-124.

66. Казанин Г. С., Барабанова Ю. Б., Кириллова-Покровская Т. А. и др. Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности //Разведка и охрана недр. – 2017б. – Т. 10. – С. 51-55.
67. Казанин Г. С., Казанин А. Г., Базилевич С. О. Основные результаты геофизического изучения акваторий Арктики ОАО «МАГЭ», проблемы разработки и применения отечественных геофизических комплексов морской сейсморазведки // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 3. – С. 99-111.
68. Керимов В. Ю., Серикова У. С., Мустаев Р. Н., Гулиев, И. С. Нефтегазоносность глубокозалегающих отложений Южно-Каспийской впадины // Нефтяное хозяйство. – 2014. – Т. 5. – С. 50-54.
69. Керимов В. Ю., Гулиев И. С., Осипов А. В. и др. Грязевой вулканизм и сверхглубокие углеводородные системы // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 4 (23). – С. 59.
70. Ким Б. И., Верба В. В., Харитонова Л. Я. Особенности структуры и мощность осадочного чехла Евразийского бассейна // Геодинамика и Геоэкология. Материалы международной конференции. – Архангельск, 1999. – С. 158.
71. Ким Б. И., Евдокимова Н. К., Харитонова Л. Я. и др. Осадочный чехол шельфа моря Лаптевых и его нефтегазовый потенциал // Геология нефти и газа. – 2011. – № 6. – С. 116-131.
72. Кириллова-Покровская Т. А. Актуализированная модель строения моря Лаптевых и основные ловушки УВ структурного класса // Инновационный вектор развития ОАО «МАГЭ»: Сб. статей ОАО «МАГЭ». – СПб., 2017. – С. 228-251.
73. Кишанков А. В. Перспективы газоносности верхней части разреза северо-западного сектора акватории Берингова моря на основе интерпретации сейсмических данных // Геология на окраине континента: I молодежная научная конференция-школа, приуроченная к 60-летнему юбилею ДВГИ ДВО РАН,

Владивосток, 14–19 сентября 2019 г.: материалы. – Владивосток: Издательство Дальневосточного федерального университета, 2019. – С. 18-19.

74. Кишанков А.В. Распространение потенциальных газонасыщенных объектов в верхней части разреза арктических акваторий // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 18-24 апреля 2021 г. – М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021. – С. 419-420.
75. Козлов Е. А., Гогоненков Г. Н., Лернер Б. Л и др. Цифровая обработка сейсмических данных. – М.: Недра, 1973. – 297 с.
76. Козырев В. С., Жуков А. П., Коротков И. П., Жуков А.А., Шнеерсон М. Б. Учет неоднородностей в верхней части разреза в сейсморазведке. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 227 с.
77. Колюбакин А. А., Миронюк С. Г., Росляков А. Г., Рыбалко А. Е., Терехина Я. Е., Токарев М. Ю. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инженерные изыскания. – 2016. - № 10-11. – С. 38-51.
78. Конторович А. Э. Осадочно-миграционная теория нафтидогенеза: состояние на рубеже XX и XXI вв., пути дальнейшего развития // Геология нефти и газа. – 1998. – № 10. – С. 8-16.
79. Конторович А. Э., Рогозина Е. А. Масштабы образования углеводородных газов в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности // Геология и нефтегазоносность юго-востока Западно-Сибирской плиты. – Новосибирск, 1967. – № 65. – С. 13-25.
80. Косько М. К., Соболев Н. Н., Кораго Е. А. и др. Геология Новосибирских островов – основа интерпретации геофизических данных по Восточно-Арктическому шельфу России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8. – № 2. – С. 1-36.
81. Кошурников А. В., Тумской В. Е., Шахова Н. Е. и др. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной

мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2016. – Т. 469. – № 5. – С. 616-620.

82. Крайчик М. С., Челышев С. С., Кудрявцева Е. И. и др. Состояние, методические предпосылки и качественная оценка возможной гидратоностности недр СССР // Ресурсы нетрадиционного газового сырья и проблемы его освоения. – Л.: ВНИГРИ, 1990. – с. 223-228.
83. Лобковский Л. И., Вержбицкий В. Е., Кононов М. В. и др. Геодинамическая модель эволюции арктического региона в позднем мезозое-кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России //Арктика: Экология и экономика. – 2011. – № 1. – С. 104-115.
84. Лобковский Л. И., Никифоров С. Л., Ананьев Р. А. и др. Современные геолого-геоморфологические процессы на Восточно-Арктическом шельфе по результатам экспедиции на ледоколе «Оден» в 2014 г. // Океанология. – 2015. – Т. 55. - № 6. – С. 1023-1027.
85. Лобусев М. А. Концепция формирования Арктической газоносной провинции Западной Сибири. Афтореф. дисс. докт. геол.-мин. наук. – Москва. – 2020. – 46 с.
86. Лобусев М. А., Лобусев А. В., Бочкарев А. В., Антипова Ю. А. Состояние и геолого-ресурсные предпосылки укрепления сырьевой базы Арктической газоносной провинции Западной Сибири // Территория Нефтегаз. – 2020. – № 5-6. – С. 42-51.
87. Логвина Е. А., Матвеева Т. В., Гладыш В. А., Крылов, А. А. Комплексные исследования покмарков на Чукотском плато // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2011. – № 2. – С. 45-54.
88. Мазарович А. О. Реальные и потенциальные геологические опасности на ложе, склонах и шельфе мирового океана // Вестник РАН. – 2012. – Т. 82. – № 8. – С. 719.

89. Мазарович А. О., Добролюбова К. О., Зарайская Ю. А. и др. Рельеф и опасные геологические процессы на севере Атлантического океана // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. – 2020. – С. 689-694.
90. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Рос. хим. журн. – 2003. – Т. 47. - № 3. – С. 70-79.
91. Матвеева Т. В., Семёнова А. А., Щур Н. А. и др. Перспективы газогидратоносности Чукотского моря // Записки горного института. – 2017. – Т. 226. – С. 387-396.
92. Мельников В. П., Федоров К. М., Вольф А. А., Спесивцев В. И. Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // Криосфера Земли. – 1998. – Т. 2. – № 4. – С. 51-57.
93. Миронюк С. Г. Геологические опасности осваиваемых месторождений восточного шельфа о. Сахалин: идентификация и принципы картографирования // Вести газовой науки. – 2015. – № 2. – С. 113-117.
94. Миронюк С. Г., Семёнова А. А. Региональные особенности распространения геологических опасностей на шельфе Баренцева моря // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения. – 2017. – С. 152-160.
95. Миронюк С. Г., Росляков А. Г. Типы, активность и закономерности распространения покмарок в арктических морях // Морские исследования и образование (MARESEDU-2018). – 2019. – С. 70-76.
96. Национальный атлас Арктики. Ред.: Касимов Н. С. – М.: АО «Роскартография», 2017. – 496 с.
97. Неручев С. Г. К изучению главной фазы нефтеобразования // Современные проблемы геологии и геохимии горючих ископаемых. – М.: Наука, 1973. – С. 43-49.
98. Никишин А. М., Петров Е. И., Малышев Н. А., Ершова В. П. Рифтовые системы шельфа Российской Восточной Арктики и арктического глубоководного

бассейна: связь геологической истории и геодинамики // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – №. 1. – С. 11-43.

99. Обжиров А. И. История открытия газогидратов в Охотском море //Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 2. – С. 72-82.
100. Обжиров А. И., Коровицкая Е. В., Пестрикова Н. Л., Телегин Ю. А. Нефтегазоносность и газогидраты в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2. – С. 55-62.
101. Отчет по объекту: «Изучение геологического строения и оценка перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов континентальной окраины Восточно-Сибирского моря». Государственный контракт № 23/03/70-52 от 25 июля 2011 г. Отв. исполнитель Кириллова Т. А. – Мурманск: ОАО «МАГЭ», 2011а.
102. Отчет по объекту «Региональные комплексные геофизические исследования с целью оценки перспектив нефтегазоносности Центрально-Лаптевского района и осадочных бассейнов Лаптевоморской континентальной окраины». Государственный контракт № 15/03/70-20 от 6 июля 2009 г. Отв. исполнитель Кириллова Т. А. – Мурманск: ОАО «МАГЭ», 2011б.
103. Отчет по объекту: «Изучение региональных особенностей геологического строения Восточно-Сибирской континентальной окраины». Государственный контракт № 34/03/82-4 от 24.07.2014. Отв. исполнитель Барабанова Ю.Б. – Мурманск: ОАО «МАГЭ», 2016.
104. Пискарев А. Л., Поселов В. А., Аветисов Г. П. и др. Арктический бассейн (геология и морфология). – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2016. – 291 с.
105. Полудеткина Е. Н. Геохимические предпосылки нефтегазоносности Анадырского бассейна. Автореф. дисс. канд. – 2007. – 23 с.
106. Поселов В. А., Аветисов Г. П., Андреева И. А. и др. Российские арктические геотраверсы. – СПб: ВНИИОкеангеология, 2011. – 172 с.
107. Рекант П. В., Гусев Е. А. Признаки новейших тектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине по данным сейсмоакустического профилирования // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2009. - № 2. – С. 85-94.

108. Рокос С. И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // Инженерная геология. – 2008. – № 4. – С. 22-28.

109. Рыбак-Франко Ю. В., Войкова С. И., Литвинова А. В. Изучение особенностей строения кремнисто-терригенных толщ Охотоморского региона по сейсмическим данным // Геология нефти и газа. – 2011. – № 6. – С. 150-156.

110. Сакулина Т. С., Епинатьева А.М. Морская сейсморазведка методом преломленных волн. – М.: Недра, 1984. – 183 с.

111. Сакулина Т. С., Рослов Ю. В., Иванова Н. М. Глубинные сейсмические исследования в Баренцевом и Карском морях // Физика Земли. – 2003. – № 6. – С. 5-20.

112. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 446. – № 3. – С. 330-335.

113. Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 352 с.

114. Соколов С. Ю., Мазарович А. О. Газогидраты в осадочном чехле пассивных океанических окраин: возможности прогноза по данным спутниковой альтиметрии в Атлантике и Арктике // Литология и полезные ископаемые. – 2009. – № 5. – С. 483-492.

115. Соколов С. Ю., Мороз Е. А., Абрамова А. С. и др. Картирование звукорассеивающих объектов в северной части Баренцева моря и их геологическая интерпретация // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 4. – С. 655-662.

116. Соколов С. Ю., Мазарович А. О., Турко Н. Н. и др. Связь деформаций и проявлений дегазации в осадочном чехле экваториального сегмента Западной Атлантики с геодинамикой литосферы // Геотектоника. – 2018. – № 4. – С. 3-24.

117. Соколов С. Ю., Мороз Е. А., Агранов Г. Д. и др. Проявления дегазации в верхней части осадочного разреза Печорского моря и ее связь с тектоникой // Доклады российской академии наук. – 2021. – Т. 499. – № 2. – С. 91-96.

118. Соловьев В. А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Рос. хим. журн. – 2003. – Т. 157. - № 3. – С. 59-69.

119. 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.

120. Спасский Б. А., Нурсубин М. А., Урупов А. К. Учет скоростных неоднородностей верхней части разреза по временным полям прямых и преломленных волн в МОГТ // Прикладная геофизика. – 1985. - № 111. – С. 35-44.

121. Спасский Б.А., Митюнина И.Ю., Орлов Л.К. и др. Возможности временных полей первых волн для исключения влияния ВЧР // Современное состояние и перспективы развития математического обеспечения обработки и интерпретации сейсмической информации. – М.: ВНИИОЭНГ, 1987. – С. 77-84.

122. Старобинец А.Е., Старобинец М.Е. Цифровая обработка и интерпретация данных метода преломленных волн. – М.: Недра, 1983. – 207 с.

123. Ступакова А. В. Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий // Геология нефти и газа. – 2011. – № 6. – С. 99-115.

124. Ступакова А. В., Бордунов С. И., Сауткин Р. С и др. Нефтегазоносные бассейны российской Арктики // Геология нефти и газа. – 2013. – № 3. – С. 30-47.

125. Ступакова А. В., Суслова А. А., Сауткин Р. С. и др. Перспективы открытия новых месторождений в пределах арктического шельфа // Вести газовой науки. – 2016. – № 4 (28). – С. 154-164.

126. Супруненко О. И., Суслова В. В., Медведева Т. Ю. Состояние изучения и освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России // Геология нефти и газа. – 2012. – № 5. – С. 99-107.

127. Токарев М. Ю., Локтев А. С., Росляков А. Г. и др. Инновационные технологии выявления и оценки геологических рисков при бурении и возведении объектов нефтегазового комплекса на арктическом шельфе // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021. – № 2. – С. 20-33.

128. Трофимук А. А., Черский Н. В., Царев В. П. Особенности накопления природных газов в зонах гидратообразования Мирового океана // Докл. АН СССР. – 1973. – Т. 212. – № 4. – С. 931-934.

129. Трофимук А. А., Черский Н. В., Царев В. П. Газогидраты-новые источники углеводородов // Природа. – 1979. – № 1. – С. 18-27.

130. Трофимук А. А., Макогон Ю. Ф., Чемакин Н. М. Природные гидраты газов севера Западной Сибири // Геология и геофизика. – 1980. – № 9. – С. 3-6.

131. Ульянцев А. С., Братская С. Ю., Романкевич Е. А. и др. О гранулометрическом составе голоцен-плейстоценовых отложений моря Лаптевых (залив Буор-Хая) // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 467. – № 2. – С. 206-206.

132. Хаин В. Е., Полякова И. Д., Филатова Н. И. Тектоника и нефтегазоносность восточной Арктики // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 443-460.

133. Харахинов В. В., Шленкин С. И., Вашкевич А. А. и др. Нефтегазоносные бассейны Беринговоморского региона (итоги нефтегазопоисковых работ 2000-2009 гг.). – М.: Научный мир, 2014. – 340 с.

134. Черных А. А. Глубинное строение и тектоника зоны перехода континент-океан в море Лаптевых по геофизическим данным. Автореф. дисс. канд. – СПб: Санкт-Петербургский государственный университет, 2005. – 27 с.

135. Чернякова А. М. Восточно-Сибирское море // Большая российская энциклопедия. Том 5. – 2006. – С. 763-764.

136. Шакиров Р. Б. Газогеохимические поля окраинных морей Дальневосточного региона: распределение, генезис, связь с геологическими структурами, газогидратами и сейсмотектоникой. Автореф. дисс. докт. геол.-минерал. наук. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2015. – 48 с.

137. Шакиров Р. Б., Обжиров А. И., Шакирова М. В., Мальцева Е. В. О газогидратах окраинных морей Восточной Азии: закономерности генезиса и распространения (обзор) // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3. – № 1. – С. 65-106.

138. Шахова Н. Е., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. Рос. акад. наук. – 2009. – Т. 79. - № 6. – С. 507-518.

139. Шипилов Э. В., Лобковский Л. И., Шкарубо С. И. Строение Хатангско-Ломоносовской зоны разломов по сейсмическим данным // Докл. Акад наук. – 2019. – Т. 487. - № 3. – С. 304-309.

140. Шипилов Э. В., Лобковский Л. И., Кириллова Т. А. О тектоно-геодинамических взаимоотношениях Евразийского бассейна и хребта Ломоносова с континентальной окраиной Сибири по новым сейсмическим данным // Арктика: экология и экономика. – 2020. - № 4 (40). – С. 34-42.

141. Шкарубо С. И., Заварзина Г. А. Стратиграфия и характеристика сейсмических комплексов осадочного чехла западной части шельфа моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6. – № 2. – С. 5.

142. Юсупов В. И., Салюк А.Н., Карнаух В.Н. и др. Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // Доклады Академии Наук. – 2010. – Т. 430. – № 6. – С. 820-823.

143. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. – М.: ВНИИГаз, 2009. – 192 с.

144. Якушев В. С., Перлова Е. В., Махонина Н. А. и др. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Рос. хим. журн. – 2003. – Т. 47. – № 3. – С. 80-90.

145. Andreassen K., Hogstad K., Berteussen K. A. Gas hydrate in the southern Barents Sea, indicated by a shallow seismic anomaly // First Break. – 1990. – V. 8 (6). – P. 235–245.

146. Andreassen K., Hart P. E., Grantz A. Seismic studies of a bottom simulating reflection related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1995. – V. 100. – No. B7. – P. 12659-12673.

147. Andreassen K., Nilssen E. G., Ødegaard C. M. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Plio-Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seismic data // Geo-Marine Letters. – 2007. – V. 27. – No. 2-4. – P. 155-171.

148. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor // Science. – 2017. – V. 356. – P. 948—953.

149. Backman J., Jakobsson M., Frank M. et al. Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge // Paleoceanography. – 2008. – V. 23. – No. 1.

150. Banet A. C. Oil and gas development of Alaska's North Slope: Past results and future prospects. – Anchorage, Alaska: Bureau of Land Management Alaska State office, 1991. – 42 p.

151. 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.

152. Barth G. A., Scholl D. W., Childs J. R. Possible deep-water gas hydrate accumulations in the Bering Sea // Fire in the Ice. – 2006. – V. 6. – No. 3. – P. 10-11.

153. Batchelor C. L., Margold M., Krapp M. et al. The configuration of Northern Hemisphere ice sheets through the Quaternary //Nature Communications. – 2019. – V. 10. – No. 1. – P. 1-10.

154. Berndt C., Bünz S., Clayton T. et al. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin // Marine and Petroleum Geology. – 2004. – V. 21. – No. 6. – P. 723-733.

155. Bird K. J., Houseknecht D. W., Pitman J. K. Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Hope Basin Province // The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824. Moore T. E., Gautier, D. L., eds., 2008. – 9 p.

156. Bogoyavlensky V. I., Kerimov V. Y., Bogoyavlensky I. V., Shayhullina A. A. The main guidelines of the efficiency and safety increasing of hydrocarbon deposits exploration and development on the arctic and other Russian offshore // Saint Petersburg 2018. European Association of Geoscientists and Engineers. – 2018a. – P. 1-5.

157. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // Geosciences. – 2018b. – V. 8. – No. 12, 453. – P. 1-17.

158. Bogoyavlensky V. I., Kazanin G. S., Kishankov A. V. Gas Saturation of Shallow Deposits of the Arctic and Subarctic Seas // Marine Technologies 2019. European Association of Geoscientists and Engineers. – 2019a. – P. 1-7.

159. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlensky I. V. Gas Hydrates Potential of the Arctic and Caspian Offshore Areas // Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas. European Association of Geoscientists and Engineers. – 2019b. – P. 1-5.

160. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlensky I. V. Gas Hydrates Potential of the Arctic, Northern Atlantic and Pacific Oceans // Geomodel 2019. European Association of Geoscientists and Engineers. – 2019c. – P. 1-5.

161. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kishankov A. Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic // Geosciences. – 2020. – V. 10. – No. 6, 215. – P. 1-22.

162. Bogoyavlensky V., Kishankov A. Features of Potential Free Gas Accumulations Distribution in the Upper Part of Sedimentary Cover of the Arctic and Subarctic Seas

// Saint Petersburg 2020. European Association of Geoscientists and Engineers. – 2020. – P. 1-5.

163. Bogoyavlensky V. Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: results of the expedition and data processing // Geosciences. – 2021a. – V. 11. – No. 2, 71. – P. 1-20.

164. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. Central Laptev Zone of Gas Seeps: Comprehensive Analysis of Seismic Data // Geomodel 2021. European Association of Geoscientists and Engineers. – 2021b. – P. 1-6.

165. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // Marine and Petroleum Geology. – 2022. – V. 138, 105527. – P. 1-15.

166. Boogaard M., Hoetz G. Seismic characterisation of shallow gas in the Netherlands // Abstract FORCE Seminar Stavanger 8-9 April 2015. – 2015.

167. Boyer T. P., Baranova O. K., Coleman C., et al. NOAA Atlas NESDIS 87. World Ocean Database. – 2018.

168. Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Beaufort Sea". – 2019. URL: https://www.britannica.com/place/Beaufort-Sea (дата обращения: 15.12.2021).

169. Brothers L. L., Hart P. E., Ruppel C. D. Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the US Beaufort Sea continental shelf // Geophysical Research Letters. – 2012. – V. 39. – No. 15. – P. 1-6.

170. Bubbling methane craters and super seeps - is this the worrying new face of the undersea Arctic? // The Siberian Times. By Valeria Sukhova, Olga Gertcyk. – 2020. URL: https://siberiantimes.com/other/others/news/bubbling-methane-craters-and-super-seeps-is-this-the-worrying-new-face-of-the-undersea-arctic/ (дата обращения: 15.12.2021).

171. Bünz S., Polyanov S., Vadakkepuliyambatta S. et al. Active gas venting through hydrate-bearing sediments on the Vestnesa Ridge, offshore W-Svalbard // Marine Geology. – 2012. – V. 332. – P. 189-197.

172. Cartwright J., Huuse M., Aplin A. Seal bypass systems // AAPG bull. – 2007. – V. 91. – No. 8. – P. 1141-1166.

173. Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D. et al. Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost // Geosciences. – 2018. – V. 8. – No. 12, 431.

174. Chuvilin E., Davletshina D., Ekimova V. et al. Role of warming in destabilization of intrapermafrost gas hydrates in the arctic shelf: Experimental modeling // Geosciences. – 2019. – V. 9. – No. 10, 407.

175. Collett T. S. Natural Gas Hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope Alaska // AAPG Bulletin 77. – 1993. – No. 5. – P. 793-812.

176. Collett T. S., Dallimore S. R. Permafrost-associated gas hydrate // Natural Gas Hydrate. – Springer, Dordrecht, 2000. – P. 43-60.

177. Craig J. D., Sherwood K. W., Johnson P. P. Geologic report for the Beaufort Sea planning area, Alaska: regional geology, petroleum geology, environmental geology. Final report. – Minerals Management Service, Anchorage, AK (USA). Alaska Outer Continental Shelf Region, 1985. – No. PB-86-218203/XAB; OCS/MMS-85/0111.

178. Cramer B., Franke D. Indications for an active petroleum system in the Laptev Sea, NE Siberia // J. of Petroleum Geology. – 2005. – V. 28. – No. 4. – P. 369-384.

179. Dallimore S. R., Collett T. S. Intrapermafrost gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada // Geology. – 1995. – V. 23. – No. 6. – P. 527-530.

180. Drachev S. S., Malyshev N. A., Nikishin A. M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview // Geological society, London, petroleum geology conference series. – 2010. – V. 7. – No. 1. – P. 591-619.

181. Drachev S. S., Shkarubo S. I. Tectonics of the Laptev Shelf, Siberian Arctic. Circum-Arctic Lithosphere Evolution // Geological Society, London, Special Publications. Pease V., Coakley B. (Eds.). – 2018. – V. 460. – No. 1. – P. 263-283.

182. Drumm D. T., Maslenikov K. P., Van Syoc R. et al. An annotated checklist of the marine macroinvertebrates of Alaska. NOAA professional paper NMFS 19, 2016. – 289 p.

183. Etiope G. Natural gas seepage. The Earth’s hydrocarbon degassing. Springer International Publishing, 2015 – 199 p.

184. Ferrín A., Durán R., Diez R. et al. Shallow gas features in the Galician Rías Baixas (NW Spain) // Geo-Marine Letters. – 2003. – V. 23. – No. 3-4. – P. 207-214.

185. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea rift // Marine and Petroleum Geology. – 2001. – V. 18. – No. 10. – P. 1083-1127.

186. Fugro. – 2022. URL: https://www.fugro.com/ (дата обращения: 25.01.2022).

187. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). – 2020. URL: https://www.gebco.net/ (дата обращения: 20.12.2021).

188. Geological assessment of petroleum resources in eastern parts of Barents Sea North. – Stavanger: Norwegian Petroleum Directorate, 2017. – 39 p.

189. Giustiniani M., Tinivella U., Jakobsson M., Rebesco M. Arctic Ocean gas hydrate stability in a changing climate // Journal of Geological Research. – 2013.

190. Grantz A., Dinter D. A., Hill E. R. et al. Geologic framework, hydrocarbon potential, and environmental conditions for exploration and development of proposed oil and gas lease sale 87 in Beaufort and northeast Chukchi Seas; a summary report. – US Geological Survey, 1982. – No. 82-482.

191. Grantz A., Hart P. E., Kvenvolden K. A. Seismic reflection character, distribution, estimated volume and stability of gas hydrate deposits beneath the Arctic Ocean north of Alaska // EOS, Am. Geophys. Union. – 1989. – V. 70. – No. 43. – P. 1152.

192. Grantz A., May S. D., Hart P. E. Geology of the Arctic continental margin of Alaska // The Geology of Alaska. Plafker G., Berg H. C. (eds.). – Geological Society of America, 1994. – P. 17-48.

193. Gurevich A. E., Chilingarian G. V. Subsidence over producing oil and gas fields, and gas leakage to the surface // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1993a. – V. 9. – No. 3. – P. 239-250.

194. Gurevich A. E., Endres B. L., Robertson Jr J. O., Chilingar G. V. Gas migration from oil and gas fields and associated hazards // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1993b. – V. 9. – No. 3. – P. 223-238.

195. Haimila N. E., Kirschner C. E., Nassichuk W. W. et al. Sedimentary basins and petroleum resource potential of the Arctic Ocean region // The Geology of North America. The Arctic Ocean Region. – Geological Survey of America, 1990. – V. 50. – P. 503-538.

196. Hart P. E., Pohlman J. W., Lorenson T. D., Edwards B. D. Beaufort Sea Deep-water gas hydrate recovery from a seafloor mound in a region of widespread BSR occurrence // Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), Edinburgh, Scotland, 2011. – P. 1-16.

197. Henriet J. P., Mienert J. Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. – Bath, UK: Geological Society of London, 1998. – V. 137. – 348 p.

198. Houseknecht D. W., Bird K. J. Oil and gas resources of the Arctic Alaska petroleum province. US Geological Survey Professional Paper 1732-A, 2005. – 11 p.

199. Huang B., Xiao X., Li X., Cai D. Spatial distribution and geochemistry of the nearshore gas seepages and their implications to natural gas migration in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea // Marine and Petroleum Geology. – 2009. – V. 26. – No. 6. – P. 928-935.

200. Hyndman R. D., Dallimore S. R. Natural gas hydrate studies in Canada // Recorder. – 2001. – V. 26. – No. 5. – P. 11-20.

201. Judd A. G., Hovland M., Dimitrov L. I. et al. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change // Geofluids. – 2002. - V. 2. – No. 2. – P. 109-126.

202. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. New York, USA: Cambridge University Press. – 2007. – 475 p.

203. Kassens H., Hubberten H. W., Pryamikov S. M., Stein R. Russian-German cooperation in the Siberian shelf seas: geo-system Laptev Sea // Berichte zur Polarforschung (Reports on Polar Research). – 1994. – V. 144.

204. Kassens H., Bauch H., Dmitrenko I. et al. Transdrift VIII: Drilling in the Laptev Sea // The Nansen Icebreaker. – 2001. – No. 12. – P. 8-9.

205. Kim D. C., Lee, G. H., Seo, Y. K. et al. Distribution and acoustic characteristics of shallow gas in the Korea Strait shelf mud off SE Korea // Marine Georesources and Geotechnology. – 2004. – V. 22. – No. 1-2. – P. 21-31.

206. Kim Y.-G., Kim S., Lee D.-H. et al. Occurrence of active gas hydrate mounds in the southwestern slope of the Chukchi Plateau, Arctic Ocean // Episodes. – 2020. – V. 43. – No. 2. – P. 811-823.

207. King L. H., MacLean B. Pockmarks on the Scotian shelf // Geological Society of America Bulletin. – 1970. – V. 81. – No. 10. – P. 3141-3148.

208. Kishankov A. Shallow Gas Potential of the South-Western Sector of the Laptev Sea Based on Seismic Data Interpretation // 10th International Youth Scientific and Practical Congress “Oil and Gas Horizons”. Abstract Book. – Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 2018. – P. 13.

209. Knies J., Daszinnies M., Plaza-Faverola A. et al. Modelling persistent methane seepage offshore western Svalbard since early Pleistocene // Marine and Petroleum Geology. – 2018. – V. 91. – P. 800-811.

210. Kraychik M. S., Chelyshev S. S., Kudryavtseva Y. I. Assessment of the gas-potential of zones of possible hydrate formation // International Geology Review. – 1991. – V. 33. – No. 1. – P. 103-105.

211. Kvenvolden K. A., Grantz A. Gas hydrates of the Arctic Ocean region // Grantz et al. (Editors). The Arctic Ocean Region (Geol. North Am., L). – Colo. Geol. Soc. Am., 1990. – P. 539-549.

212. Kvenvolden K. A., Ginsburg G. D., Soloviev V. A. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates // Geo-Marine Letters. – 1993. – V. 13 (1). – P. 32-40.

213. Larsen G., Chilingar G. V. Diagenesis in sediments and sedimentary rocks. – Elsevier, 1983. – V. 2. – 571 p.

214. Lee S. H., Chough S. K. Distribution and origin of shallow gas in deep-sea sediments of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan) // Geo-Marine Letters. – 2002. – V. 22. – No. 4. – P. 204-209.

215. Link W. K. Significance of oil and gas seeps in world oil exploration // AAPG bulletin. – 1952. – V. 36. – No. 8. – P. 1505-1540.

216. MacAulay H. A., Hunter J. A. Detailed seismic refraction analysis of ice-bonded permafrost layering in the Canadian Beaufort Sea // Proceedings, 4th Canadian Permafrost Conference: National Research Council Canada, The Roger JE Brown Memorial Volume. – 1982. – V. 256. – P. 267.

217. Mackay J. R. The growth of pingos, western Arctic coast, Canada // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1973. – V. 10. – No. 6. – P. 979-1004.

218. Mackay J. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, western Arctic coast, Canada: A long-term field study // Géographie physique et Quaternaire. – 1998. – V. 52. – No. 3. – P. 271-323.

219. Marine science atlas of the Beaufort Sea – Geology and geophysics. Pelletier B. R. (Ed.). – Geological Survey of Canada, 1987.

220. Matveeva T. V., Kaminsky V. D., Semenova A. A., Shchur N. A. Factors Affecting the Formation and Evolution of Permafrost and Stability Zone of Gas Hydrates: Case Study of the Laptev Sea // Geosciences. – 2020. – V. 10. – No. 12, 504.

221. Mazarovich A. O., Sokolov S. Y. Tectonic subdivision of the Chukchi and East Siberian seas // Russian Journal of Earth Sciences. – 2003. – V. 5. – No. 3.

222. Mienert J., Berndt C., Tréhu A. M. et al. World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins. – Springer Nature, 2022. – 515 p.

223. Mikalsen H. Reservoir structure and geological setting of the shallow PEON gas reservoir. EOM-3901 Master's Thesis in Energy. – UiT, The Arctic University of Norway, 2014. – 99 p.

224. Naudts L., Greinert J., Artemov Yu. et al. Geological and morphological setting of 2778 methane seeps in the Dnepr paleo-delta, northwestern Black Sea // Marine Geology. – 2006. – V. 227. – No. 3-4. – P. 177-199.

225. Nelson P. H., Kibler J. E., Giberson C. P. Well data and well plots. The Oil and Gas Resource Potential of the 1002 Area, Arctic National Wildlife Refuge, Alaska,

by ANWR assessment Team, U.S. Geological Survey Open File Report 98-34. – 1999. – 84 p.

226. Osterkamp T. E., Harrison W. D. Temperature measurements in subsea permafrost off the coast of Alaska // 4th Canadian Permafrost Conference. – 1982. – P. 238-248.

227. Overduin P. Russian–German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA: the Expedition COAST I. Ber Polarforsch Meeresforsch. – 2007. – 39 p.

228. Overduin P. P., Liebner S., Knoblauch C. et al. Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2015. – V. 120. – No. 5. – P. 965-978.

229. Paull C. K., Ussler W., Dallimore S. R. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // Geophysical Research Letters. – 2007. – V. 34. – No. 1.

230. Paull C. K., Dallimore, S. R., Caress, D. W. et al. Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2015. – V. 16. – No. 9. – P. 3160-3181.

231. Portnov A., Smith A. J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // Geophysical Research Letters. – 2013. – V. 40. – No. 15. – P. 3962-3967.

232. Portnov A., Mienert J., Serov P. Modeling the evolution of climate-sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf // Journal of geophysical research: Biogeosciences. – 2014. – V. 119. – No. 11. – P. 2082-2094.

233. Romanovskii N. N., Hubberten H.-V., Gavrilov, A.V. et al. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-marine letters. – 2005. – V. 25 (2-3). – P. 167-182.

234. Ruppel C. D., Kessler J. D. The interaction of climate change and methane hydrates // Reviews of Geophysics. – 2017. – V. 55. – No. 1. – P. 126-168.

235. Sakamoto T., Takahashi K., Iijima K. et al. Data report: site surveys in the Bering Sea for Integrated Ocean Drilling Program Expedition 323 (as part of IODP Proposal 477) // Proc. IODP. – 2011. – V. 323. – P. 2.

236. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I. et al. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis // Biogeosciences. – 2017. – V. 14. – No. 9. – P. 2283-2292.

237. Scholl D. W., Creager J. S. 37. Geologic Synthesis of Leg 19 (DSDP) Results; Far North Pacific, and Aleutian Ridge, and Bering Sea // DSDP – 1973. – V. XIX. – P. 897-913.

238. Scholl D. W., Hart P. E. Velocity and amplitude structures on seismic reflection profiles-possible massive gas-hydrate deposits and underlying gas accumulations in the Bering Sea Basin // The future of energy gases. – 1993. – P. 331-351.

239. Schroot B. M. Seismic Anomalies Indicating Leakage: examples from the Southern North Sea // AAPG Search and Discovery Article. – 2003. – V. 90013. – No. 2003. – P. 11-14.

240. Sellmann P. V., Chamberlain E. J. Permafrost beneath the Beaufort Sea: Near Prudhoe Bay, Alaska // J. Energy Resour. Technol. – 1980. – V. 102(1). – P. 35-48.

241. Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2015. – V. 120. – No. 8. – P. 1515-1529.

242. Serov P., Vadakkepuliyambatta S., Mienert J. et al. Postglacial response of Arctic Ocean gas hydrates to climatic amelioration // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – V. 114. – No. 24. – P. 6215-6220.

243. Shakhova N. E., Semiletov I. Methane hydrate feedbacks // Arctic Climate Feedbacks: Global Implications. – 2009. – P. 81-92.

244. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2015. – V. 373. – No. 2052, 20140451.

245. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature communications. – 2017. – V. 8. – No. 1. – P. 1-13.

246. 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. – No. 6, 251.

247. Sherwood K. W., Johnson P. P., Craig J. D. et al. Structure and stratigraphy of the Hanna trough, US Chukchi shelf, Alaska // Geological Society of America Special Papers. – 2002. – V. 360. – P. 39-66.

248. Shipley T. H., Houston M.H., Buffler R.T. et al. Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises // AAPG bulletin. – 1979. – V. 63. – No. 12. – P. 2204-2213.

249. Sloan E.D. Offshore Hydrate Engineering Handbook. – Golden, CO, USA: Center for Hydrate Research, Colorado School of Mines, 1998. – 255 p.

250. Smith S. L., Judge A. S. Estimates of methane hydrate volumes in the Beaufort-Mackenzie region, Northwest Territories // Current Research. GSC, 1995. – Part B. – P. 81-88.

251. Solheim A., Elverhøi A. Gas-related sea floor craters in the Barents Sea // Geo-Marine Letters. – 1993. – V. 13. – No. 4. – P. 235-243.

252. Sparrow K. J., Kessler J. D., Southon J. R. et al. Limited contribution of ancient methane to surface waters of the US Beaufort Sea shelf // Science advances. – 2018. – V. 4. – No. 1, eaao4842.

253. Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf // PNAS. – 2021. – V. 118. – No. 10, e2019672118. – P. 1–9.

254. Stoupakova A. V. Henriksen E., Burlin Y. K. et al. The geological evolution and hydrocarbon potential of the Barents and Kara shelves // Geological Society, London, Memoirs. – 2011. – V. 35. – No. 1. – P. 325-344.

255. Svendsen J. I., Alexanderson H., Astakhov V. I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. – 2004. – V. 23. – No. 11-13. – P. 1229-1271.

256. The Global Heat Flow Database. The International Heat Flow Commission (IHFC). – 2022. URL: http://ihfc-iugg.org/products/global-heat-flow-database (дата обращения 12.01.2022).

257. Thurston D. K., Theiss L. A. Geologic report for the Chukchi Sea planning area, Alaska. United States Department of the Interior Minerals Management Service. Outer Continental Shelf Report. – 1987. – 193 p.

258. Tissot B. P., Welte D. H. Petroleum formation and occurrence. – Springer-Verlag, 1984. – 699 p.

259. Triezenberg P. J., Hart P. E., Childs J. R. National Archive of Marine Seismic Surveys (NAMSS): A USGS data website of marine seismic reflection data within the U.S. Exclusive Economic Zone (EEZ): U.S. Geological Survey Data Release, 2016.

260. U.S. Geological Survey Gas Hydrates Project. – 2018. URL: https://www.usgs.gov/centers/whcmsc/science/us-geological-survey-gas-hydrates-project (дата обращения 15.01.2022).

261. Vadakkepuliyambatta S., Bunz S., Mienert J., Chand S. Distribution of subsurface fluid-flow systems in the SW Barents Sea. Marine and Petroleum Geology. – 2013. – V. 43. – P. 208-221.

262. Vadakkepuliyambatta S., Chand S., Bünz S. The history and future trends of ocean warming-induced gas hydrate dissociation in the SW Barents Sea // Geophysical Research Letters. – 2017. – V. 44 (2). – P. 835-844.

263. Vogt P. R., Cherkashev G., Ginsburg G. et al. Haakon Mosby mud volcano provides unusual example of venting // EOS, Transactions American Geophysical Union. – 1997. – V. 78. – No. 48. – P. 549-557.

264. Wallmann K., Riedel M., Hong W. L. et al. Gas hydrate dissociation off Svalbard induced by isostatic rebound rather than global warming // Nature Communucation. – 2018. – V. 9 (1). – P. 1-9.

265. Weaver J. S., Stewart J. M. In situ hydrates under the Beaufort Sea shelf // Proceedings, fourth Canadian permafrost conference. Ottawa, Ont., Natl. Res. Counc. of Canada, 1982. – P. 312-319.

266. Wiley T. J. Sedimentary basins of offshore Alaska and adjacent regions. U.S. Geological Survey Open-File Report 86-35, 1986. – 118 p.

267. Yakushev V. S., Semenov A. P., Bogoyavlensky V. I., Medvedev V. I., Bogoyavlensky I. V. Experimental modeling of methane release from intrapermafrost relic gas hydrates when sediment temperature change // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – V. 149. – P. 46-50.