

Санкт-Петербургский государственный университет

Чазов Артём Олегович

Выпускная квалификационная работа

Геологический контроль газовых гидратов в море Лаптевых

Уровень образования:

Направление 05.03.01 «Геология»

Основная образовательная программа СВ.5018 «Геология»

Научный руководитель:

профессор кафедры геологии месторождений полезных
ископаемых СПбГУ, доктор геолого-минералогических наук

Черкашёв Георгий Александрович

Научный руководитель:

учёный секретарь ФГБУ «ВНИИОкеангеология»

кандидат геолого-минералогических наук

Матвеева Татьяна Валерьевна

Рецензент:

старший научный сотрудник ФГБУ «ВНИИОкеангеология»

кандидат геолого-минералогических наук

Логвина Елизавета Александровна

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

Введение	3
1 Район исследований	7
1.1 Геологическое строение региона	7
1.1.1 Тектоническое районирование акватории моря Лаптевых	7
1.1.2 Разрывная тектоника в акватории моря Лаптевых	8
1.1.3 Стратиграфия осадочного чехла моря Лаптевых	9
1.2 Нефтегазоносность акватории моря Лаптевых	13
1.3 Гидратоносность моря Лаптевых	15
2. Материалы и методы	17
2.1 Материалы	17
2.2 Методика геофизических работ	19
2.2.1 Возбуждение колебаний	19
2.2.2 Приём колебаний	20
2.2.3 Регистрация колебаний	21
2.2.4 Система наблюдений	21
2.3 Обработка данных	22
3. Методика работ	23
3.1 Первичное изучение сейсмических разрезов	23
3.2 Интерпретация сейсмических разрезов	24
3.3 Составление карты поддонных глубин BSR	26
3.4 Выявление факторов, контролирующих гидратообразование в море Лаптевых	26
4. Результаты	28
4.1 Результаты интерпретации сейсмических разрезов	28
4.2 Картирование BSR по площади и разрезу	36
4.3 Факторы геологического, контроля гидратообразования в море Лаптевых	37
4.3.1 Условия генерации углеводородных газов	37
4.3.2 Структурно-тектонический контроль гидратообразования	49
4.3.3 Геодинамический режим в пределах хребта Гаккеля, как фактор контроля гидратообразования	40
Заключение	44
Список литературы	46

Введение

Газовые гидраты (ГГ) – твёрдые кристаллические соединения, образующиеся из воды и газа при относительно низких температурах и высоких давлениях [Гинсбург, Соловьев, 1994]. В узлах кристаллической решётки газовых гидратов находятся молекулы воды, а в пустотах молекулы газа, общая формула газовых гидратов – $M \cdot nH_2O$. Газовые гидраты могут образовываться и сохраняться длительное время в зоне стабильности газовых гидратов (ЗСГГ), которая представляет собой часть литосферы и гидросферы, в условиях которой ГГ могут стабильно существовать [Матвеева, 2018]. Положение ЗСГГ и ее взаимосвязь с условиями гидратообразования в субаквальных условиях, продемонстрирована на рисунке 1.

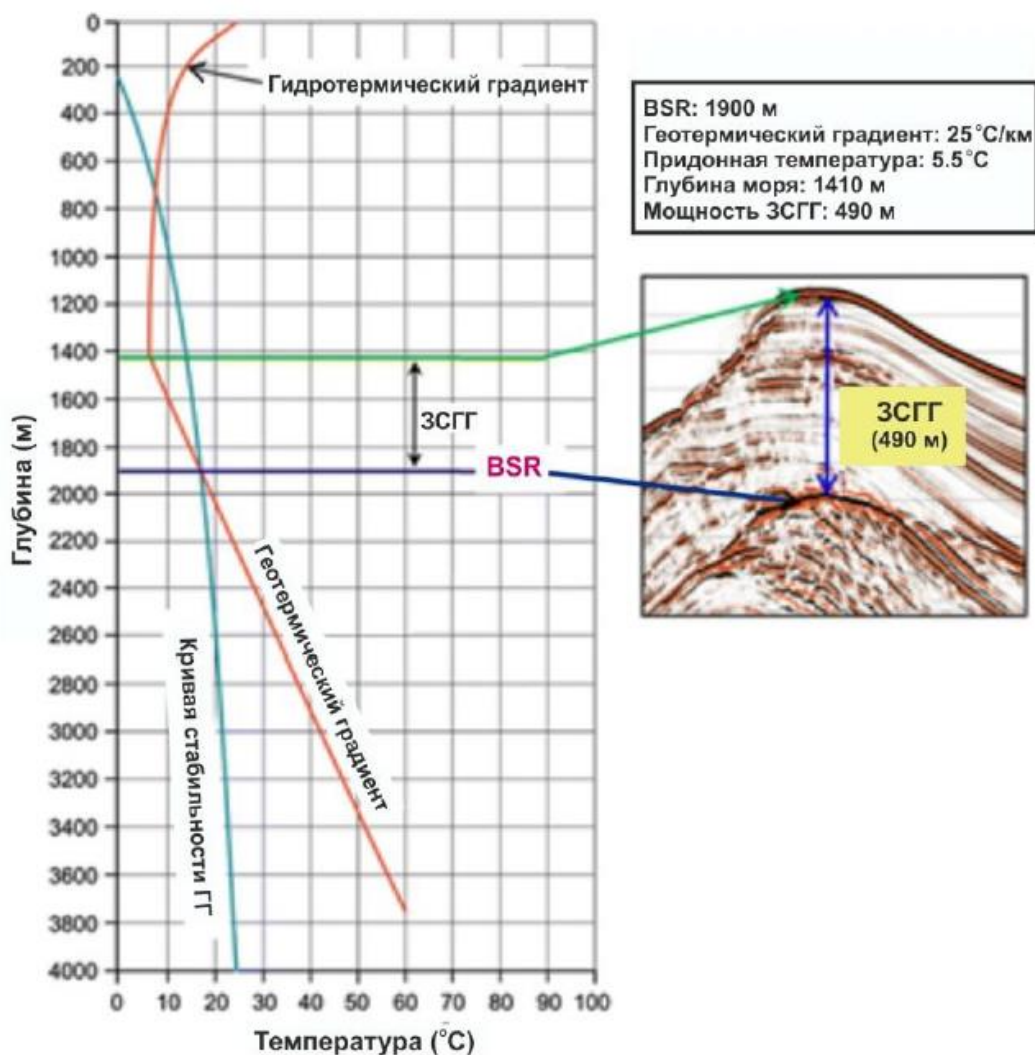


Рис. 1. Мощность зоны стабильности газовых гидратов, определяемой по пересечению кривых фазового равновесия и температурного градиента по сейсморазведочным данным; Андаманское море. Из: [Матвеева и др., 2018]; по: [Prakash et al., 2012].

Подошва зоны стабильности ГГ – фазовая граница, выше находятся морские отложения, которые могут быть частично цементированы газовыми гидратами; а ниже – отложения, которые содержат свободный газ в поровом пространстве. На сейсмических разрезах подошва зоны стабильности проявляется, как отражающая граница, имитирующая морское дно (bottom simulating reflector, BSR) [Кремлёв и др., 1997]. Появление BSR на сейсмических разрезах обусловлено перепадом акустического импеданса между отложениями с ГГ и отложениями, содержащими газ в поровом пространстве. Контраст акустического импеданса объясняется тем, что отложения, цементированные газовыми гидратами, имеют значительно большие скорости продольных волн в сравнении с окружающими морскими отложениями [Матвеева и др., 2018].

BSR – основной сейсморазведочный признак, используемый для выявления и изучения газовых гидратов, позволяющий оконтуривать гидратные скопления и получать информацию о гидратонасыщении осадочных толщ. BSR на сейсмических разрезах характеризуется специфическими, присущими только этой фазовой границе признаками [Кремлёв и др., 1997; Матвеева и др., 2018]:

1. BSR часто пересекает отражения от геологических границ, поскольку BSR – фазовая граница, не связанная с литологией;
2. BSR обычно субпараллелен рельефу морского дна, однако с ростом глубины морского дна растёт и его поддонная глубина (до сотен метров), а при приближении к шельфу BSR обычно выполаживается; в очагах разгрузки углеводородов BSR загибается вверх, в сторону морского дна;
3. полярность отражённого от BSR сигнала инверсирована относительно отражения от дна, что является следствием отрицательного значения коэффициента отражения;
4. BSR характеризуется высоким коэффициентом отражения, достигающим 30-100% коэффициента отражения от морского дна.

Косвенным признаком BSR является осветление волновой картины (blinking) в отложениях выше этого рефлектора из-за уменьшения контрастности акустического импеданса внутри гидратонасыщенных толщ [Матвеева и др., 2018]. Классический пример BSR, связанный со скоплением гидратов на хребте Блейк Аутер, показан на рисунке 2.

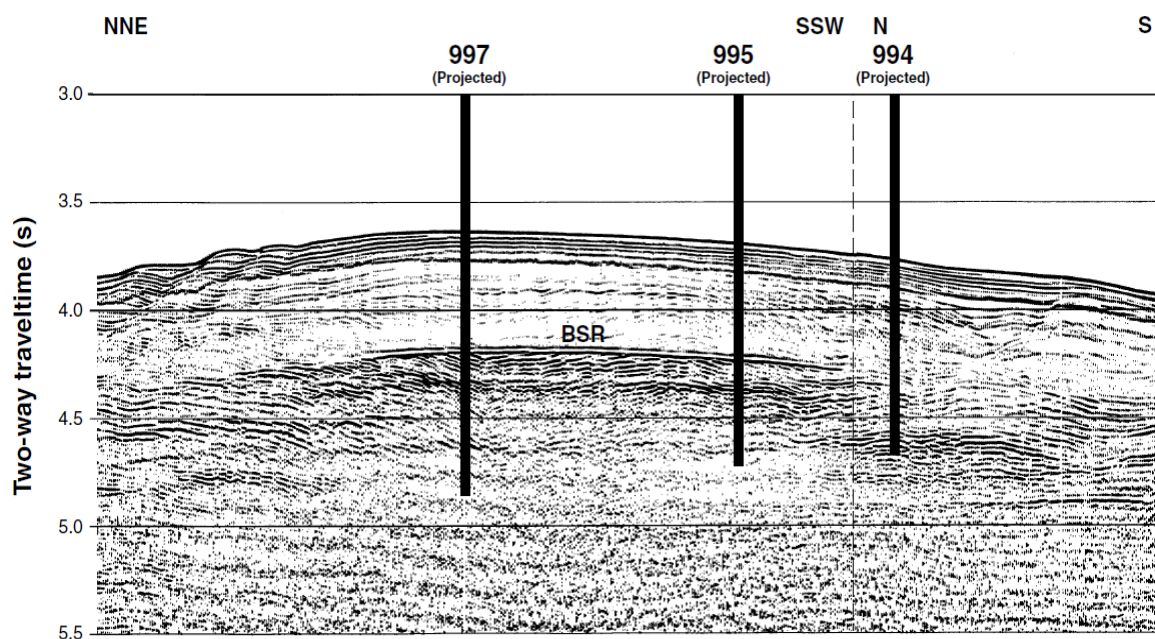


Рис. 2. BSR на сейсмическом разрезе; хребет Блейк Аутер, СВ Атлантика. Отчётливо видны следующие признаки BSR: отрицательная полярность, параллельность морскому дну, пересечение с осадочной слоистости, blanking, усиление отражений ниже BSR. Из: [Tinivella, Lodolo, 2000].

На сейсмических разрезах также можно наблюдать и псевдо-BSR – сейсмический горизонт, обусловленный фазовой границей перехода опала-А в опал-КТ Псевдо-BSR отличается от гидратообусловленного большими глубинами залегания и прямой полярностью [Матвеева, 2018].

Материалы: работа выполнялась в секторе нетрадиционных источников углеводородов ФГБУ «ВНИИОкеангеология». В основу работы положены материалы сейсморазведочных работ МОВ ОГТ 2D, предоставленных «ВНИИОкеангеология» в объёме 13120 км.

Объект исследования: Предполагаемое в пределах верхних 1000 м осадочного разреза акватории моря скопление газовых гидратов. Объект исследования расположен в пределах расчетной ЗСГГ на континентальном склоне и глубоководных котловинах моря Лаптевых.

Цель работы: определить факторы, контролирующие формирование скоплений газовых гидратов, выявляемых по данным сейсморазведки в акватории моря Лаптевых

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить сбор и анализ доступных цифровых сейсморазведочных материалов по морю Лаптевых;

- выполнить переинтерпретацию данных MOB ОГТ 2D в формате SEG-Y для выявления BSR;
- определить пространственные границы выявленных скоплений, построить карту глубины залегания BSR;
- изучить особенности геологии района исследований для выявления возможных структурно-тектонических факторов, контролирующих гидратообразование;
- изучить литературные материалы для определения иных возможных факторов газогидратообразования.

Личный вклад автора: Автором самостоятельно был переинтерпретирован 61 сейсмический разрез в глубоководной части моря Лаптевых в объеме 13120 погонных км. Выявлены многочисленные BSR и его атрибуты. Построены карты распространения глубины залегания BSR по площади и прослежена его связь с морфологией и геологическим строением хребта Гаккеля. Также автором самостоятельно выполнен анализ опубликованных и фондовых материалов по геологии района исследований для выявления геологических факторов, контролирующих гидратообразование.

Актуальность проблемы изучения газовых гидратов определяется:

- огромным ресурсным потенциалом субаквальных газовых гидратов – только в исключительной экономической зоне России объём зоны стабильности газовых гидратов составляет около 92 млрд м³, а прогнозируемые ресурсы газа газовых гидратов фильтрационного генезиса варьируют от 2,1 до 15,5 трлн м³ [Матвеева и др., 2021];
- техногенными рисками (взрывы, выбросы газа) при бурении на традиционные нефть и газ через гидратонасыщенные толщи;
- экологическими рисками, связанными с возможным выбросом большого объёма метана при диссоциации газовых гидратов (метан – значительно более сильный парниковый газ, в сравнении с углекислым газом).

1. Район исследований

Море Лаптевых – окраинное море Северного Ледовитого океана. Оно расположено между северным побережьем Сибири на юге, полуостровом Таймыр, островами Северная Земля на западе и Новосибирскими островами на востоке. Климат моря Лаптевых – арктический континентальный. Акватория перспективна на нефть, газ и газовые гидраты. В пределах исследуемого района известен единственный участок с выявленным гидратообусловленным горизонтом BSR [Богоявленский и др., 2018]. Расчетная ЗСГГ фильтрационного генезиса (вне субаквальной мерзлоты) занимает почти всю акваторию моря и простирается от изобаты 200 м в сторону океана [Матвеева и др., 2020].

1.1 Геологическое строение региона

1.1.1 Тектоническое районирование акватории моря Лаптевых

Главной тектонической особенностью моря Лаптевых является то, что в его континентальный шельф практически ортогонально упирается срединно-океанический хребет Евразийского бассейна. Таким образом происходит наложение тектонических структур переходной зоны материк-океан и структур, связанных с активным спредингом на хребте Гаккеля [Анохин, Гусев, 2003; Заварзина, Шкарубо, 2012]. С этой особенностью и связаны принципы тектонического районирования данной области.

Согласно Т.А. Кирилово-Покровской, [2017] изучаемая акватория включает в себя несколько тектонических структур первого порядка: Сибирская платформа, Западный бассейн, Восточный бассейн, Таймыро-Североземельская складчатая область (Рис. 3). Большая часть изученных в данной работе профилей расположена в пределах Западного бассейна, который делится на шельфовый Западно-Лаптевский суббассейн, хребет Гаккеля, прогибы Нансена и Амундсена. Профиль МОВ ОГТ 16 проходит часть Восточного бассейна – хребет Ломоносова [Кирилова-Покровская, 2017].

Е.А. Фомина и др., [2017], основываясь на иной выборке сейсмопрофилей (севернее полуострова Таймыр), составили собственную схему тектонического районирования. Авторы выделили следующие структуры первого порядка: Евразийский бассейн, Лаптевский бассейн и Таймыро-Североземельскую складчатую область [Фомина и др., 2017]. Лаптевский бассейн соответствует шельфовому Западно-Лаптевскому суббассейну на схеме Т.А. Кирилово-Покровской [2017].

В.С. Шеин с соавторами [2017] провели плитотектоническое районирование Арктического региона, согласно которому в море Лаптевых выделяются следующие крупные плитотектонические структуры: Северный Ледовитый океан (делится на хребет Гаккеля, котловины Амундсена и Нансена) и Арктиду (к которой относятся хребет Ломоносова, Лаптевская надрифтовая депрессия) [Шеин и др., 2017].

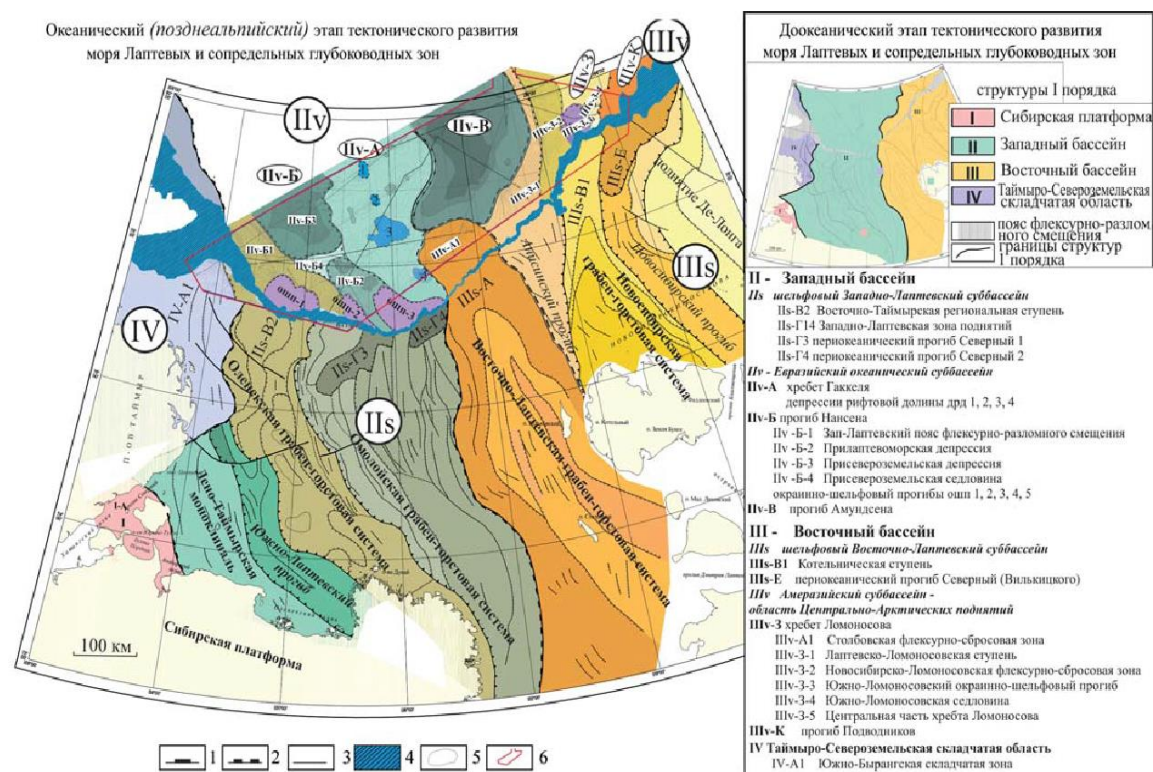


Рис. 3. Схема тектонического районирования акватории моря Лаптевых. Из: [Кирилова-Покровская, 2017].

Для данной работы наибольший интерес представляет то, что авторы рассмотренных выше схем районирования выделили следующие структуры: котловины Амундсена и Нансена, хребет Гаккеля, континентальный блок (соответствующий Лаптевоморскому шельфу) значительно осложнённый структурами меньших порядков (рифты, прогибы). С котловинами и рифтовыми долинами связан мощный осадочный чехол – важный фактор генерации углеводородов. А с хребтом Гаккеля и рифтами ослабленные зоны – пути миграции флюидов.

1.1.2 Разрывная тектоника в акватории моря Лаптевых

В море Лаптевых широко проявлена разрывная тектоника, во многом обусловленная геологическим строением района работ, представляющего собой переходную зону материк-океан, и условиями растяжения, связанными с процессами рифтообразования [Андиева, 2008; Анохин, Гусев, 2003; Заварзина, Шкарубо, 2012;

Кирилова-Покровская, 2017]. В разрезе осадочного чехла выявлены несколько типов разрывных нарушений: 1) разломы со сбросо-сдвиговой кинематикой (трансформные разломы, направленные в северо-восточном направлении); 2) листрические разломы до границы МОХО, сместитель которых направлен на северо-восток (от континента к акватории); 3) надвиги и взбросы, простирающиеся на северо-северо-запад (аналогично Верхоянской системе складок); 4) многоступенчатые сбросы различной амплитуды, образующие переходную зону от материка к океану 5) сбросы, простирающиеся в северо-западном направлении (связанные с процессами рифтообразования). Региональные зоны разрывных нарушений формируют серии грабенообразных и горстообразных структур на шельфе и на абиссали моря Лаптевых [Анохин, Гусев, 2003; Кирилова-Покровская, 2017]. Как будет показано ниже, дизъюнктивные нарушения 1, 4, 5 типов секут BSR, либо расположены ниже BSR, то есть могут выступать в роли флюидопроводящих зон.

1.1.3 Стратиграфия осадочного чехла моря Лаптевых

Осадочный чехол изучаемого района сложен меловыми и кайнозойскими породами. Регион характеризуется крайне низкой стратиграфической изученностью. На данный момент в глубоководной части моря Лаптевых нет ни одной скважины, с чем связано полное отсутствие прямых данных о строении осадочного чехла. Состав пород в исследуемой области предполагается по результатам колонкового бурения в полярной части хребта Ломоносова и по данным интерпретации многочисленных сейсмических профилей МОВ ОГТ 2D [Kim, Glezer, 2007; Кирилова-Покровская, 2017; Фомина и др., 2017].

По данным бурения на хребте Ломоносова выделяют несколько литостратиграфических подразделений (Рис. 4): плиоцен-четвертичные; миоценовые; олигоценовые; эоценовые; палеоценовые; турон-кампанские. Разрез сложен преимущественно глинами с редкими прослоями песчаников, включениями галек, карбонатов и конкреций пирита. Эоценовые и палеоценовые отложения предположительно являются нефтематеринскими [Kim, Glezer, 2007].

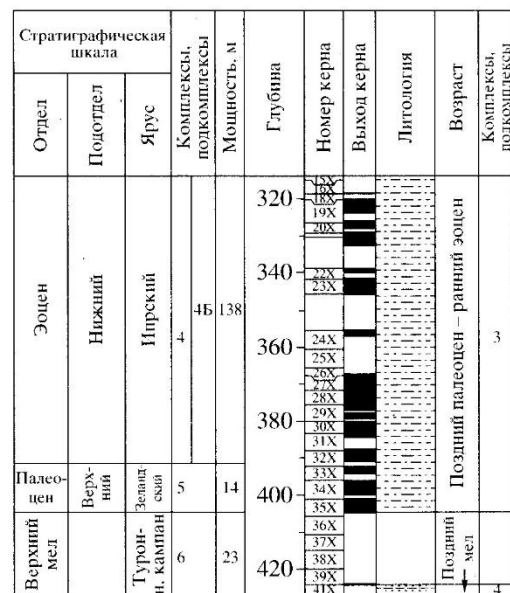
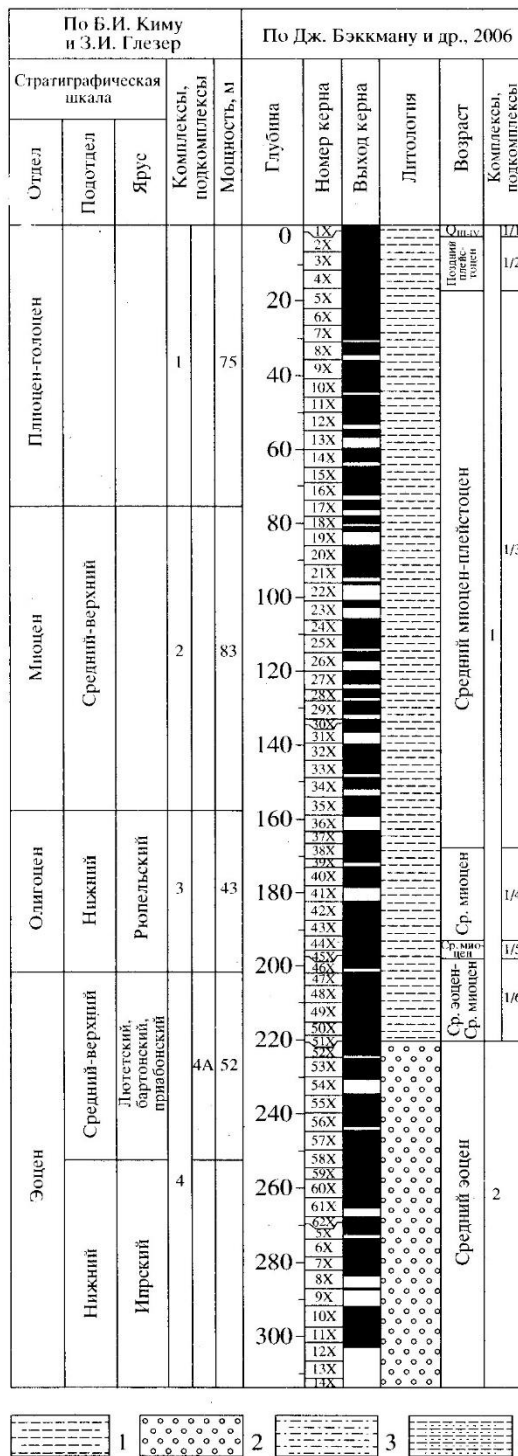


Рис. 4. Композитная стратиграфическая схема хребта Ломоносова по скважинам М0002А и М0004А. 1) илстые и глинистые отложения с линзами песка и единичными галками; 2) диатомовый ил с единичными гальками и включениями пирита; 3) глины и илстые глины с прослоями и конкрециями пирита; 4) глина, глинистый песок, песчаник, редкие конкреции пирита. Из: [Kim, Glezer, 2007].

Основываясь на стратиграфических материалах, полученных на островах Анжу, российскими авторами была составлена литолого-стратиграфическая характеристика Лаптевоморского шельфа. Верхняя часть осадочного шельфа (мел-кайнозой) сложена преимущественно алеврито-песчаными отложениями, в меньшей степени глинами. В

подчинённом количестве встречаются прослой грубозернистых отложений (больше всего в верхней части разреза) и линзы бурого угля. Палеоцен-эоценовые породы также считаются перспективными на нефть и газ [Алексеева и др., 2017]. Согласно схеме (Рис. 5) неоген-четвертичные породы на шельфе представлены в основном песчаниками с небольшим количеством конгломератов и алеврито-пелитовых отложений. Наличие в разрезе обломочных пород, сложенных крупнозернистой фракцией, является благоприятным фактором гидратообразования [Matveeva, Soloviev, 2002]. Ниже ЗСГГ (в диапазоне глубин от 500 м до нескольких километров) разрез сложен терригенными породами пелитовой, алевритовой и псаммитовой размерностей, что может обеспечивать вертикальную миграцию флюидов в осадочном разрезе и в первом приближении рассматриваться в качестве фактора литологического контроля гидратообразования.

Система	Отдел	Ярус	Литология	Содержание РОВ, %	Элементы нефтегазоносной системы			Структурные этажи
					Нефтегазо-материнские отложения	Резервуары	Флюидоупоры	
Неогеновая	Q							мел-кайнозойский структурный этаж
	Плиоцен							
	N ₁ ²							
	Миоцен							
Палеогеновая								
	Олигоцен							
	Эоцен				●			
Меловая	Верхний			1,63 (1 проба)				
	Нижний			0,1-2,16	●			
Юрская	Верхний				●			
	Средний			0,02-1,32	●			
	Нижний							
Триасовая	Верхний	норийский-		0,23-7,92				
	Средний	индский		0,7-10,04	●			
	Нижний			0,05-9,52				
Камекутольская-пермская	Р							
	Верхний			0,02-0,86 до 3,7 (P)				
	Средний	московский						
Девонская	Верхний	фрамский		0,03-0,76				
	Средний	живетский		0,01-0,9 до 7,0 (D ₂ sl)	●			
	Нижний	эйфельский-эмский-дохковский		0,2-4,7 (D ₁ sl) 0,07-11 (D ₁ bk) 0,1-0,7 до 1,5 (D ₁ ps)				
Силурийская	Верхний	пярвадольск-горстийский		0,03-1,27	●			
	Нижний	гомсрский-руданский						
Ордовикская	Верхний							
	Средний	харнаатский-тремдовский		0,02-1,32	●			
	Нижний							

Рис. 5. Литолого-стратиграфическая схема шельфа моря Лаптевых. Из: [Алексеева и др., 2017].

С другой стороны, интерпретация сейсморазведочных данных непосредственно в районе исследований позволила некоторым исследователям выдвинуть предположения о составе отложений на шельфе, материковом склоне моря Лаптевых [Васильева и др., 2019; Петрушина и др., 2020]. Предполагается, что осадочный разрез, вероятно, сложен терригенной толщей пород, накопление которой связано с турбидитовой седиментацией и выносом большого количества обломочного материала крупными реками Евразийского континента (Лена, Хатанга, Анабар, Оленёк, Яна). Наличие в осадочном разрезе глубоководной части моря Лаптевых проницаемых пород-коллекторов предполагается в связи с выявленными геофизическими аномалиями, связанными с присутствием свободного газа [Васильева и др., 2019; Петрушина и др., 2020].

Присутствие в разрезе нефтегазоматеринских пород является важным условием генерации больших объёмов природного газа, необходимых для образования газовых гидратов. А наличие в чехле проницаемых пород – один из факторов рассредоточенной фильтрации газа от материнских толщ и скоплений углеводородов в зону стабильности газовых гидратов.

1.2 Нефтегазоносность акватории моря Лаптевых

Акватория моря Лаптевых считается перспективной на нефть и газ по ряду причин. С одной стороны, осадочный чехол имеет мощность более 2 км, необходимых для генерации значительного количества углеводородов [Троцюк, 1982] (Рис. 26). С другой стороны, по результатам сейсморазведочных работ в глубоководье моря Лаптевых выявлено множество структурных и литологических ловушек углеводородов [Васильева и др., 2019; Кирилова-Покровская, 2017; Петрушина и др., 2020], а также на сейсмических разрезах были идентифицированы многочисленные свидетельства присутствия свободного газа типа «яркое пятно» [Васильева и др., 2019; Петрушина и др., 2020].

Опираясь на материалы колонкового бурения, сейсмостратиграфии, палеомагнитологии и данных о палеоклиматических условиях региона в периоды осадконакопления Т.Е. Мур и Ж.К. Питман, [2015] провели численное одномерное бассейновое моделирование в Евразийском бассейне, включающее две локации, расположенные в разных структурно-тектонических позициях в море Лаптевых – котловина Амундсена и хребет Гаккеля (Рис. 6) [Moore, Pitman, 2015].

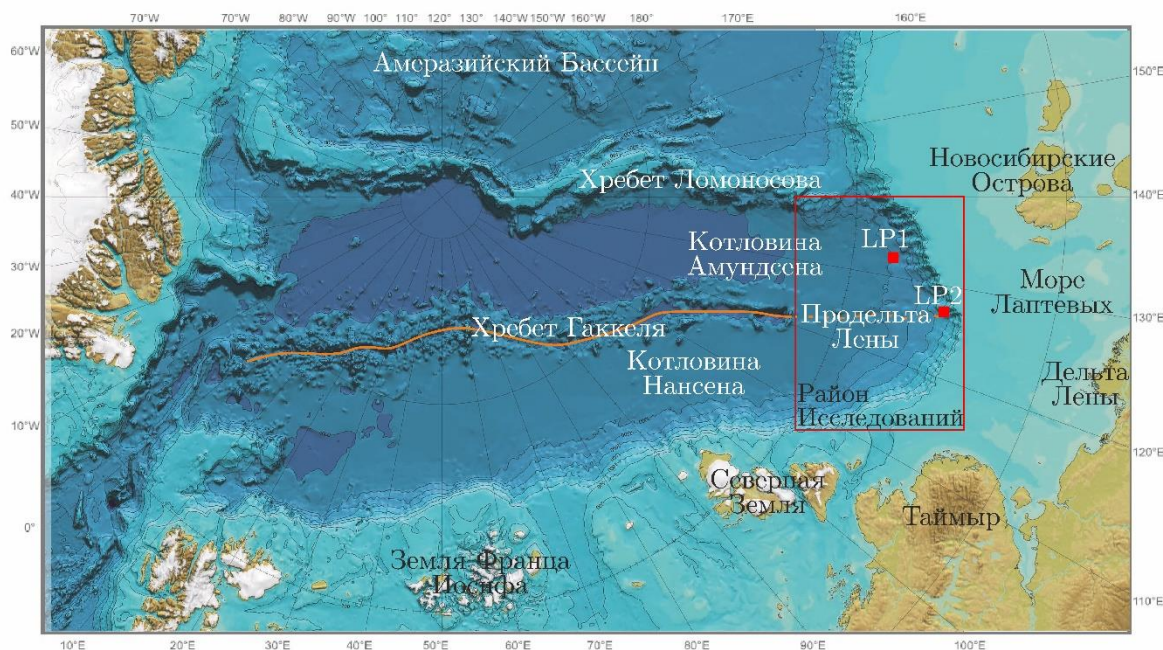


Рис. 6. Расположение локаций, в которых проводилось бассейновое моделирование (красные точки); исследуемая в данной работе область отмечена красной рамкой.
Из: [Moore, Pitman, 2015].

Первый объект численного моделирования расположен в котловине Амундсена. На данном участке в осадочном разрезе предполагаются наиболее перспективные нефтематеринские толщи эоценового возраста на глубине около 9 км. По результатам проведённого моделирования для котловины Амундсена (Рис. 7) предполагается, что органическое вещество эоценовых пород было подвержено достаточной для генерации газа степени катагенетических преобразований. По результатам моделирования для материкового склона моря Лаптевых над хребтом Гаккеля (Рис. 8) видно, что породы, находящиеся на глубине 2 км под поверхностью морского дна, уже прошли стадию «газового» окна. Аналогичные результаты опубликованы и в работах других авторов [Алексеева и др., 2017; Керимов и др., 2020].

Таким образом, можно говорить, что в море Лаптевых, присутствуют как предпосылки генерации газа, связанные с катагенетическим преобразованием органического вещества, так и геофизические свидетельства присутствия свободного газа в поровом пространстве, такие как «яркие пятна».

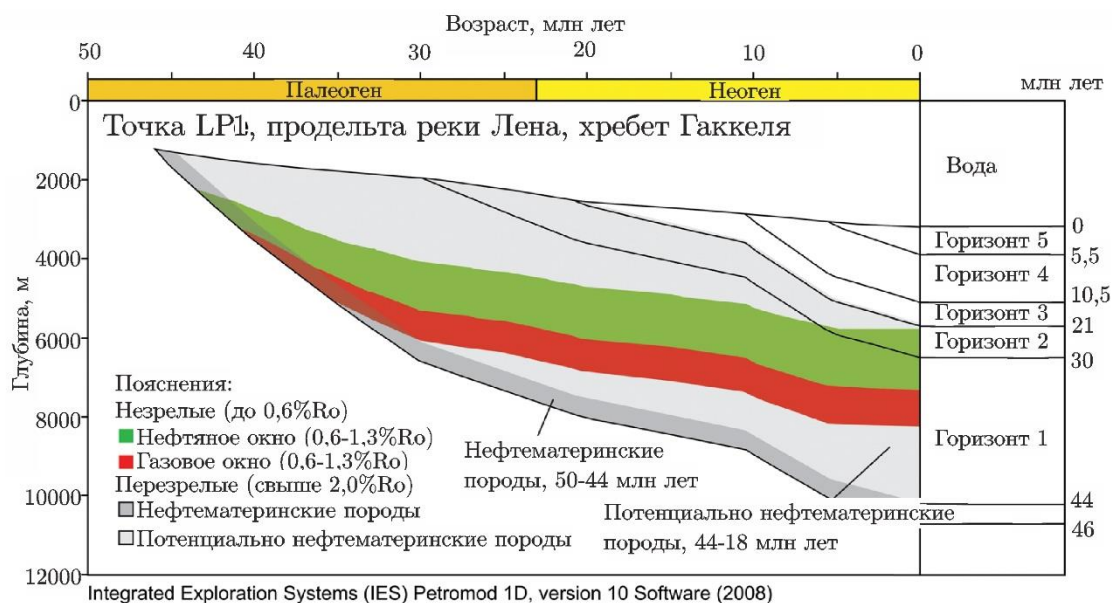


Рис. 7. Визуализация результатов численного моделирования в котловине Амундсена в пределах исследуемой территории; серым показаны потенциальные нефтематеринские породы, красным – положение «газового окна», зелёным положение «нефтяного окна».
Из: [Moore, Pitman, 2015].

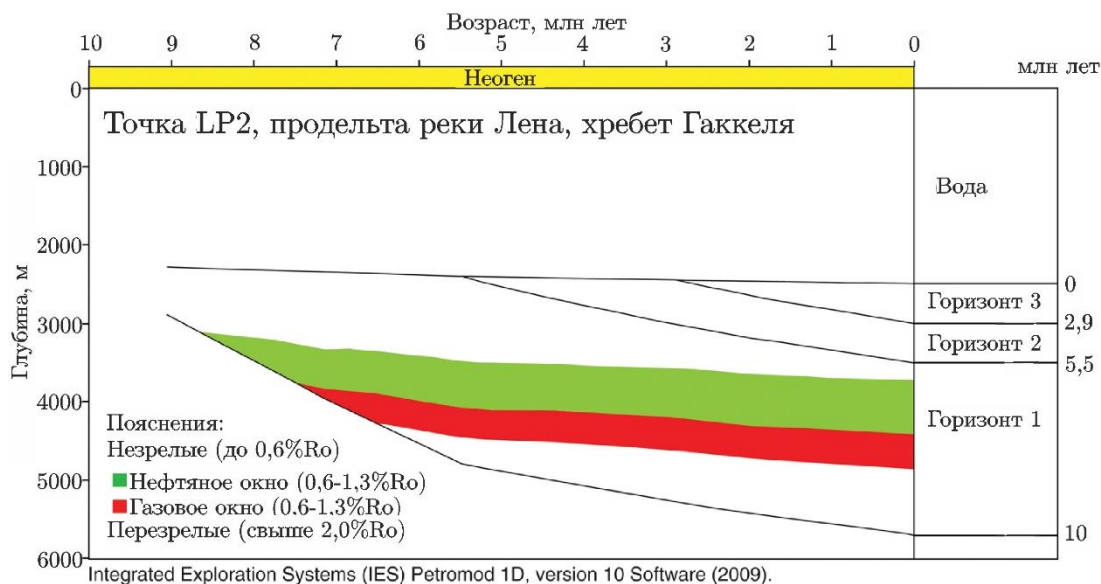


Рис. 8. Визуализация результатов численного моделирования на континентальном склоне моря Лаптевых над хребтом Гаккеля; красным цветом показано положение «газового окна», зелёным положение «нефтяного окна». Из: [Moore, Pitman, 2015].

1.3 Газогидратоносность моря Лаптевых

Материковый склон и абиссаль моря Лаптевых расположены в зоне стабильности газовых гидратов [Матвеева и др., 2020], что вкупе с вероятной нефтегазоносностью осадочного чехла являются предпосылками гидратообразования в акватории. На момент выполнения работы по опубликованным материалам известен всего один участок акватории моря Лаптевых с горизонтом BSR, его положение показано на карте (Рис. 9). В.И. Богоявленским с соавторами [2018] были проанализированы 28 временных сейсмических разреза МОВ ОГТ 2D, предоставленных ОАО «МАГЭ». На четырёх профилях (LS 0914, LS 0921, LS 0923, LS 094, LS 0927) был выявлен гидратообусловленный BSR (Рис. 10), приуроченный к континентальному склону моря Лаптевых – прогибу в южной части котловины Нансена. BSR прослеживается от бровки шельфа, начиная с глубин моря 700 м, до конца сейсмических профилей на подножии континентального склона при глубинах морского дна более 2 км. Поддонные глубины выявленного BSR варьируют от 150 м у бровки шельфа до 600 м на подножии склона (скорость упругих волн в гидратонасыщенных породах была принята авторами равной 3,5 км/с) [Bogoyavlensky et al., 2021; Богоявленский и др., 2018].

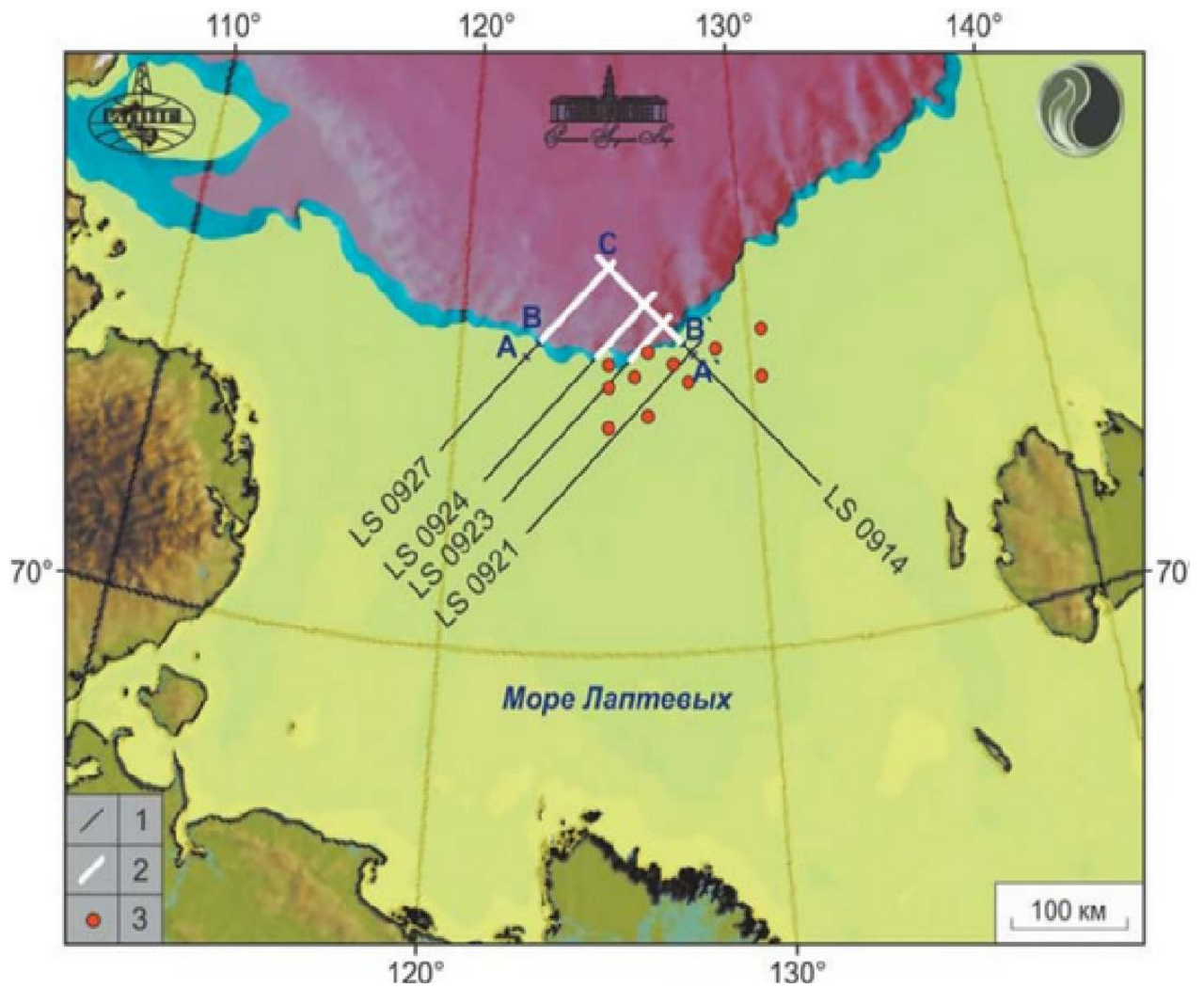


Рис. 9. На карте отмечено положение участка, где был выявлен горизонт BSR (белые линии), черные линии – положение сейсморазведочных профилей, красные точки – места эмиссии газа, жёлтая заливка – область благоприятная для существования многолетнемёрзлых пород, синяя – область бесперспективная на ГГ, красная – ЗСГ [Богоявленский и др., 2018].

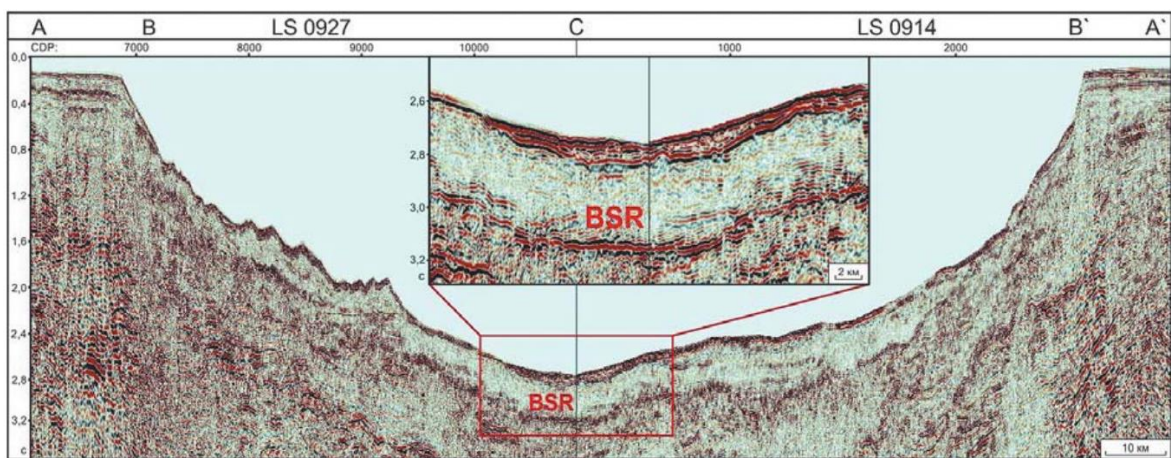


Рис. 10. Пример выявленного горизонта BSR [Богоявленский и др., 2018].

2. Материалы и методы

2.1 Материалы

В основу данной работы положены сейсморазведочные материалы, предоставленные ФГБУ «ВНИИОкеангеология», где выполнялась работа. Материалы включали в себя 62 глубинных сейсмических разреза МОВ ОГТ 2 (Рис. 11, Таб. 1) в формате SEG Y, полученных геологическими организациями в ходе четырех экспедиций в 2012, 2016, 2019 и 2020 гг.. Каталог сейсмических профилей представлен в Таблице 2.

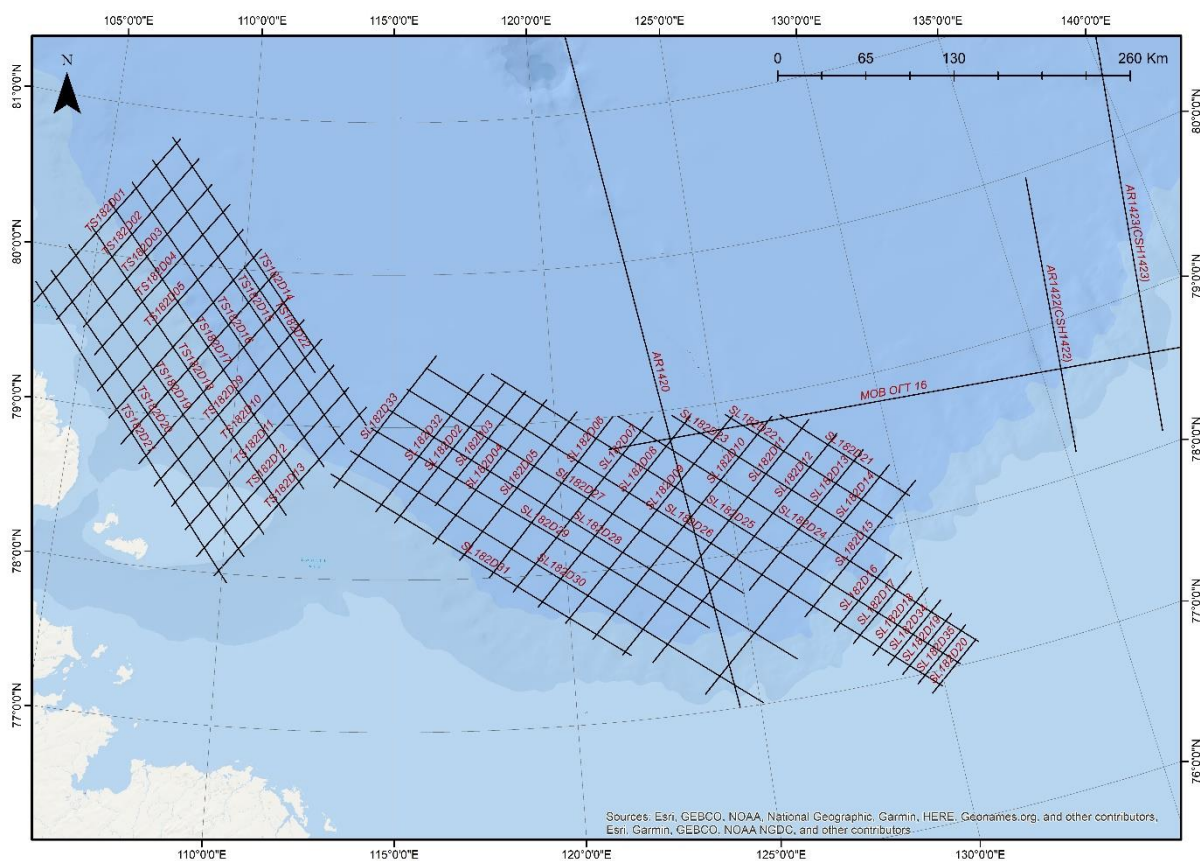


Рис. 11. Положение сейсмических профилей, datum координатной сетки WGS 84.

Таб. 1. Перечень сейсмических профилей формата SEG Y по морю Лаптевых

№ п/п	Сейсмические работы МОВ ОГТ, выполненные за счет средств федерального бюджета	Организация, год сдачи отчета, автор	Наименование профилей	Количество профилей	Представление данных
1	ГК № 15/08/20-14 от 08/11/2012 г.	ОАО «СЕВМОРГЕО» 2013 Винокуров И.Ю. Дергунов Н.Т.	МОВ ОГТ 16	1	Глубина
2	ГК № 37/03/82-20	ОАО «МАГЭ» 2016	AR1405 AR1420 AR1422	4	Глубина

№ п/п	Сейсмические работы МОВ ОГТ, выполненные за счет средств федерального бюджета	Организация, год сдачи отчета, автор	Наименование профилей	Количество профилей	Представление данных
		Фомина Е.А.	AR1423		
3	ГК №15/18/520-2 ОТ 31.07.2017 г	АО «РОСГЕО» 2019 Васильева Е.А.	SL182D01-SL182D35	35	Глубина
4	ГК № К.2018.004 от 29.06.2018 г.	АО «РОСГЕО» 2020 Петрушина Е.П. Аксенов И.В.	TS182D01-TS182D22	22	Глубина

Таб. 2. Каталог изученных сейсмических разрезов в море Лаптевых.

№ п.п.	№ профиля	Географические координаты WGS-84				Длина профиля км
		начало		конец		
		широта	долгота	широта	долгота	
1	МОВ ОГТ 16	78.786288	121.548546	74.465046	172.858127	1459
2	AR1405	81.58699	115.649948	81.119923	145.769805	593
3	AR1420	81.720013	121.261804	77.002523	124.437253	531
4	AR1422	78.143572	135.270513	79.961152	136.404287	204
5	AR1423	78.094424	137.863058	81.911508	141.916996	435
6	SL182D01	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
7	SL182D02	79.27548611	118.4914306	78.37435556	115.0054472	435
8	SL182D03	79.21479444	119.1492333	78.48190833	116.2128361	131
9	SL182D04	79.14993056	119.7988889	78.23296111	116.13875	108
10	SL182D05	79.05556389	120.7108417	78.12175	116.9058778	136
11	SL182D06	78.99857778	121.794425	78.00153056	117.7593667	140
12	SL182D07	78.97028889	123.0234972	77.89877222	118.4188611	165
13	SL182D08	78.944075	124.19665	77.79257222	119.113225	180
14	SL182D09	78.90518056	125.4934972	77.67481389	119.8618028	196
15	SL182D10	78.85655278	126.6709056	77.55358333	120.5898222	211
16	SL182D11	78.79170833	127.7695444	77.43430556	121.3808722	221
17	SL182D12	78.66489722	128.5216083	77.36455833	122.1991194	216
18	SL182D13	78.52581111	129.1990333	77.75262778	125.1566833	134
19	SL182D14	78.38945556	129.8591806	77.11666986	123.5340298	217
20	SL182D15	78.251925	130.5128889	77.5194	126.5862556	130
21	SL182D16	77.8012	129.4479972	77.39257222	127.3167667	72
22	SL182D17	77.67438889	129.8024778	77.28908889	127.7830056	68
23	SL182D18	77.54865	130.1466083	77.18625556	128.2426778	65
24	SL182D19	77.34600833	130.6391444	77.02577778	128.9419111	58
25	SL182D20	77.14443889	131.126475	76.861775	129.6193056	52
26	SL182D21	78.85783333	126.9047889	78.15927222	130.235325	113
27	SL182D22	78.91984167	125.2344194	78.040325	129.5862083	145
28	SL182D23	78.96201389	123.6090278	77.76958056	129.6120611	200
29	SL182D24	79.00026667	121.9425167	77.12177222	131.1697389	314
30	SL182D25	79.33943459	118.090921	77.00967778	130.5449861	406
31	SL182D26	79.39163611	116.0067917	76.89248333	129.9452917	447
32	SL182D27	79.25313056	115.3949972	77.73666944	125.0133694	290
33	SL182D28	79.12134991	114.79943	77.25545	126.1962556	353
34	SL182D29	78.99622778	114.2736917	77.54498333	123.9059361	290
35	SL182D30	78.84623056	113.6538778	77.00868056	125.0849556	356
36	SL182D31	78.69175812	113.0617845	77.42563889	121.6389306	259
37	SL182D32	79.33937778	117.840525	78.44714167	114.4433556	128
38	SL182D33	78.59985278	113.1667417	79.47	116.3575667	123
39	SL182D34	77.44921389	130.4232194	77.10415278	128.5990778	62

№ п.п.	№ профиля	Географические координаты WGS-84				Длина профиля км
		начало		конец		
		широта	долгота	широта	долгота	
40	SL182D35	77.25146111	130.9345639	76.94193333	129.2872083	56
41	TS182D01	80.81326389	107.3705278	79.60912222	103.2299028	162
42	TS182D02	80.69970278	108.1064722	79.52319444	104.0501333	158
43	TS182D03	80.54025278	108.6442944	79.50337222	104.9468556	142
44	TS182D04	80.41866111	109.3222806	79.33314444	105.4276417	149
45	TS182D05	80.26290278	109.8469306	79.10244444	105.6841111	160
46	TS182D06	80.14438333	110.5142944	78.93751944	106.1502556	168
47	TS182D07	80.00300833	111.0736778	78.77578889	106.6164917	171
48	TS182D08	79.83909722	111.5272472	78.66447222	107.2314	165
49	TS182D09	79.69565278	112.0594694	78.52905278	107.7633194	165
50	TS182D10	79.57338889	112.6651083	78.40968889	108.3467611	165
51	TS182D11	79.40726667	113.0771639	78.26501111	108.8190583	163
52	TS182D12	79.26203056	113.567625	78.09564444	109.2111667	168
53	TS182D13	79.13677778	114.1337806	77.97907222	109.7681444	168
54	TS182D14	80.82123611	107.0660194	79.01218056	114.1347889	256
55	TS182D15	80.65506111	106.4666861	78.88444819	113.4619672	252
56	TS182D16	80.49373333	105.8582556	78.73551111	112.860675	252
57	TS182D17	80.35229444	105.1672833	78.58313333	112.2766472	256
58	TS182D18	80.16836111	104.70075	78.40696111	111.7811528	256
59	TS182D19	80.0244	104.0484472	78.27454167	111.15245	257
60	TS182D20	79.83913611	103.6158194	78.11834167	110.6120083	254
61	TS182D21	79.74939507	103.1837143	77.93940833	110.1579833	262
62	TS182D22	80.02301111	109.9563139	79.34981389	112.4812056	94

2.2 Методика геофизических работ

Метод отражённых волн основывается на изучении упругих волн, отразившихся от границ двух сред с различной акустической жёсткостью. На данный момент метод отражённых волн в варианте общей глубинной точки является основным методом сейсморазведки. Метод позволяет изучать осадочный разрез, включая верхнюю часть осадочного чехла, где локализуется подошва зоны стабильности газовых гидратов.

Автором были использованы геофизические материалы, полученные в ходе нескольких экспедиций, то есть в разные годы с использованием разных судов, оснащённых различным набором технических средств. Ниже приведена краткая характеристика технических средств, использованных для получения сейсмических данных.

2.2.1 Возбуждение колебаний

Возбуждение колебаний во всех случаях производилось одной группой пневматических источников. В группе находилось от 4 до 10 источников. Суммарный объём рабочей камеры составлял от 2 до 8 тыс. куб. дюймов.

Таб. 3. Параметры групп источников сейсмических колебаний, использованных при сейсморазведочных работах в разные годы

Год	2012	2014	2018	2019
Тип источника колебаний	BOLT APG	BOLT 1500 LL, BOLT 1900 LLX	BOLT 1500 LL, BOLT 1900 LLX	G-GUN
Количество групп источников	1	1	1	1
Количество источников в линиях	8	10	4	4
Рабочее давление, psi	2000	2000	2000±200	2000
Суммарный объём рабочей камеры, in ³	2050	8000	4202	4300
Заглубление источника колебаний, м	5	n/a	7±1	7

2.2.2 Приём колебаний

Во всех случаях использовалась буксируемая сейсморазведочная коса с шагом между приёмниками 12,5 м, с 8 приёмниками в группе и базой группирования 12,5 м, канальностью от 360 до 960. Подробнее параметры приёмных устройств приведены в Таблице 4.

Таб. 4. Параметры приёмных устройств сейсмических колебаний, использованных при сейсморазведочных работах в разные годы

Год	2012	2014	2018	2019
Тип приёмного устройства	Sercel SEAL Streamer	Sercel SEAL Sentinel Solid 24 bit	Sercel Seal Solid 24 bit	Sercel Seal Solid 24 bit
Тип косы	твердотельная	твердотельная	твердотельная	твердотельная
Активная длина косы, м	4500	12000	6000	6000
Вынос приёмного устройства, м	n/a	n/a	n/a	161
Количество каналов приёма	360	960	480	480
Расстояние между каналами, м	12,5	12,5	12,5	12,5
База группирования сейсмоприёмников, м	12,5	12,5	12,5	12,5

Количество гидрофонов в группе	8	8	8	8
Глубина буксировки косы, м	n/a	n/a	8-10	8-9

2.2.3 Регистрация колебаний

Регистрация колебаний производилась сейсмической станцией в цифровом формате SEG D с шагом дискретизации 2 мс. Подробнее параметры регистрации колебаний приведены в Таблице 5.

Таб. 5. Параметры регистрации сейсмических колебаний при сейсморазведочных работах разных лет.

Год	2012	2014	2018	2019
Сеймостанция	n/a	Sercel Seal 428	Sercel Seal 428	Sercel Seal 428
Длина записи, с	15	n/a	8	8
Шаг дискретизации, мс	2	2	2	2
Формат записи	SEG-D rev.1, 32- IEEE	8036 SEG-D Demux	8036 SEG-D Demux	8058 SEG-D Demux
Фильтр низких частот, Гц/Дб/окт	n/a	n/a	200/370	200/370
Фильтр высоких частот, Гц/Дб/окт	n/a	n/a	3/6	3/6

2.2.4 Система наблюдений

Во всех сейсморазведочных рейсах использовалась фланговая система наблюдений с буксируемым приёмным устройством (Рис. 12). При движении судна с периодичностью 50 м возбуждались сейсмические колебания и записывался сейсмический сигнал одновременно на всех приёмниках. Записанный сигнал и данные спутниковой навигации передавались для регистрации геофизическим комплексом.

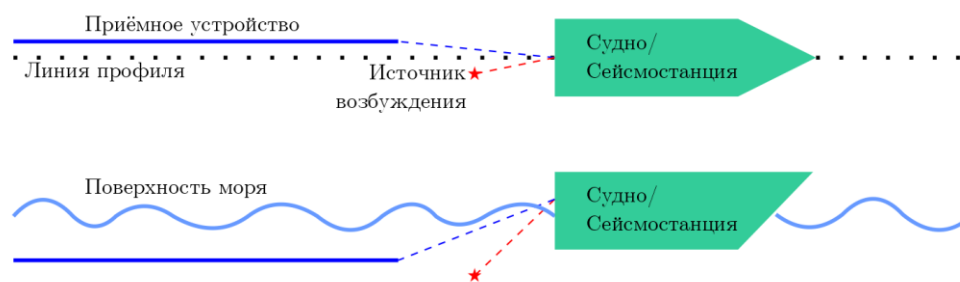


Рис. 12. Схематическая иллюстрация фланговой системы наблюдения в случае с буксируемым приёмным устройством; верхний рисунок – вид в плане, нижний – вид в профиль.

2.3 Обработка данных

Обработка сейсмических материалов проводилась в различных обрабатывающих пакетах. Материалы, полученные в ходе экспедиции «Арктика 2012» [Винокуров и др., 2013] были обработаны в ПО «FOCUS» (версия 5.4, компания Paradigm Geophysical). Материалы, полученные по профилям SL182D01-SL182D35 [Васильева и др., 2019] и TS182D01-TS182D22 [Петрушина и др., 2020] были обработаны в ПО «SeisSpace/ProMAX» (версия 5000.10.0.3). Автор работы не имел доступа к текстовым материалам отчёта по профилям AR1405, AR1420, AR1422, AR1423 [Фомина и др., 2016], в связи с чем данные о графе обработки этих профилей отсутствуют. Процедуры обработки всех материалов по своей сути аналогичны, таким образом графы обработки можно обобщить. Применённые процедуры перечислены ниже:

1. Загрузка сейсмических данных во внутренний формат обрабатывающей системы и формирование проекта;
2. Изменение шага дискретизации с 2 мс на 4 мс;
3. Интерактивная редакция сейсмограмм и трасс;
4. Ввод статических поправок;
5. Ввод поправки за сферическое расхождение;
6. Широкополосная фильтрация;
7. Предварительный анализ скоростей;
9. Интерполяция пропущенных сейсмограмм ОПВ;
10. Подавление кратных волн с использованием технологии SRME;
11. Подавление когерентных помех, нерегулярного шума по сейсмограммам ОПВ;
12. Предварительная предсказывающая деконволюция;
13. Деконволюция сжатия;
14. Получение окончательных суммарных временных разрезов;
15. Построение скоростной модели для миграции;
16. Переменная по времени и по профилю полосовая фильтрация;
17. Объединение соседних 4-х точек CDP;
18. Получение финальных мигрированных временных разрезов;
19. Построение скоростной модели для пересчета временных разрезов в глубинные;
20. Построение глубинных разрезов;
21. Вывод обработанных данных в формат SEG Y.

3. Методика работ

Работа выполнялась с использованием различных технических средств обработки и визуализации цифровой информации. Перечень использованного программного обеспечения представлен в Таблице. 6.

Таб. 6. Перечень использованного программного обеспечения

№	Название	Тип ПО	Выполняемые задачи
1	ArcGIS	Геоинформационная система	Отрисовка карт, обработка географической информации
2	SeiSee	Пакет визуализации сейсмической информации	Визуализация сейсмических разрезов, разбраковка разрезов по качеству, изучение заголовков
3	KINGDOM	Пакет интерпретации сейсмической информации	Визуализация сейсмической информации, пикировка, экспорт результатов интерпретации в растровой и табличной форме
4	Spyder	Интерактивная интегрированная среда разработки на языке Python	Обработка табличных результатов интерпретации
5	MS Excel	Средство интерактивной обработки и визуализации табличной информации	Создание и обработка таблиц

3.1 Первичное изучение сейсмических разрезов

На начальном этапе работы проводился анализ качества сейсмических разрезов в ПО «SeiSee», оценивалась их пригодность для дальнейшей интерпретации. В результате был отбракован разрез по профилю SL182D01, так как массивы данных всех трасс копировали друг друга.

Из заголовков трасс в ПО «SeiSee» извлекались координаты положения крайних точек сейсмических разрезов. На основе извлечённой информации, в ПО «Excel» формировались таблицы с координатами крайних точек и названиями профилей. Таблицы импортировались в ГИС-проект и визуализировались в виде линий профилей, наложенных на контуры теоретической зоны стабильности газовых гидратов (контуры ЗСГГ получены в секторе нетрадиционных углеводородов ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в формате шейп-файла). В результате анализа были отбракованы профили, не попадающие в ЗСГГ: SL182D18, SL182D19, SL182D20, SL182D34, SL182D35, TS182D21. Иллюстрация наложения линий профилей на контуры ЗСГГ представлена на рисунке 13.

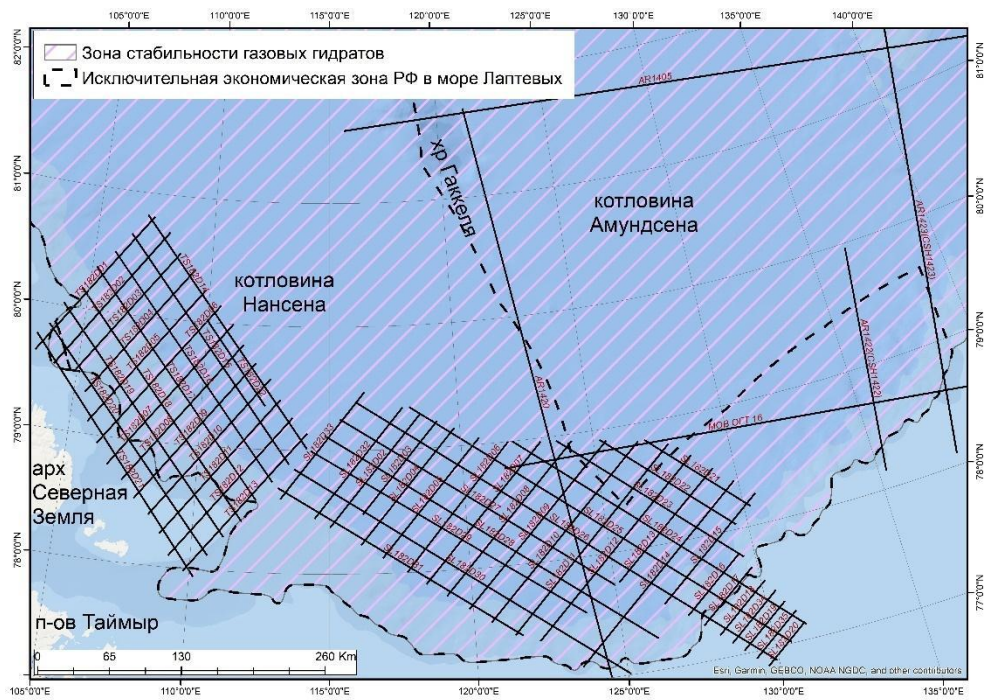


Рис. 13. Расположение профилей и зоны стабильности газовых гидратов.

3.2 Интерпретация сейсмических разрезов

В ПО «KINGDOM» создавался рабочий проект. Геофизические данные (файлы SEG Y) импортировались во внутренний формат обрабатывающей системы. Внешний вид рабочего окна проекта после импорта данных проиллюстрирован на рисунке 14.

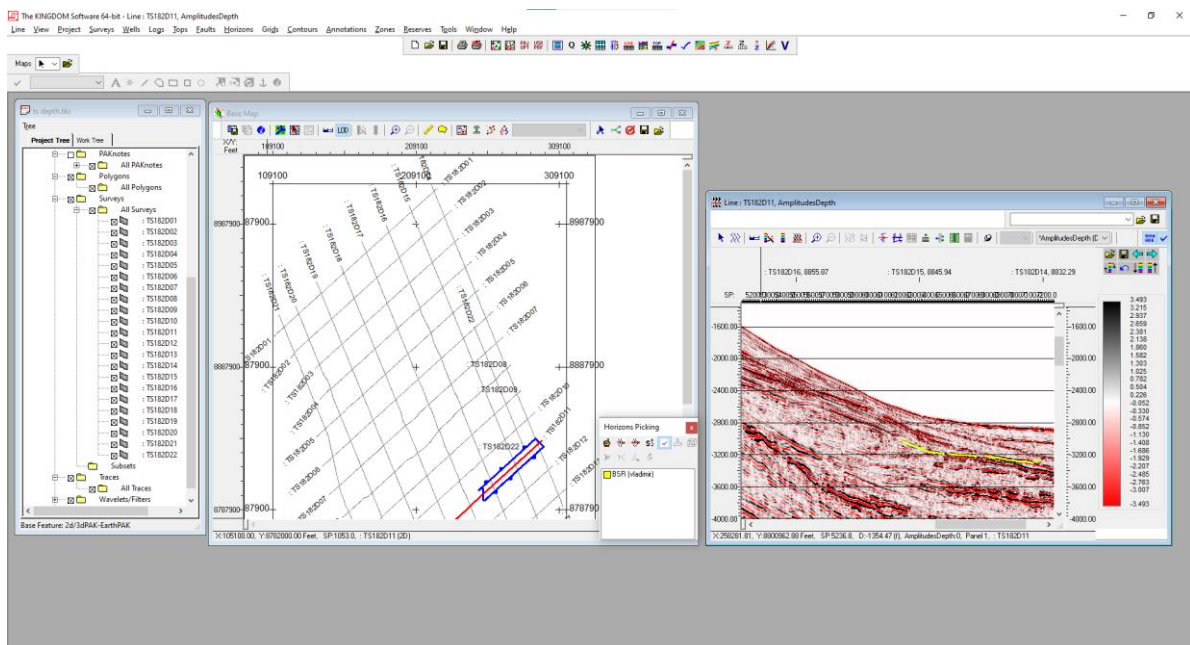


Рис. 14. Рабочее окно ПО «KINGDOM»; слева расположено окно дерева проекта, справа – окно визуализации сейсмической информации, в средней части – карта взаимного расположения профилей.

Ввиду того, что в разных экспедициях использовались разные проектированные системы координат, создание единого KINGDOM-проекта было невозможно – для разрезов, полученных по геофизическим данным каждого рейса, создавался индивидуальный проект.

Интерпретация разрезов проводилась в окне визуализации, где изучалась волновая картина: 1) сначала выявлялись перспективные отражающие горизонты, удовлетворяющие нескольким признакам BSR; 2) после этого выделенные горизонты сравнивались с интерпретацией сейсмофаций авторов отчётов сейсморазведочных работ [Васильева и др., 2019; Петрушина и др., 2020], таким образом, по совпадению горизонтов с сейсмостратиграфическими границами происходило отсеивание недостоверных потенциальных BSR.

Отрисовка горизонта BSR проводилась с помощью инструмента «Horizons Picking». Для удобства были выбраны следующие параметры пикировки: автозаполнение по минимальным значениям амплитуд в вертикальном окне 50 м. Аналогично проводилась пикировка отражения от морского дна (по максимальным значениям амплитуд в вертикальном окне 50 м). Технические возможности интерпретационного пакета позволяли проводить увязку по глубине и корреляцию пересекающихся профилей (в пределах одного проекта). Для последующих работ визуализированные сейсмические данные с отрисованным BSR сохранялись в формате растрового изображения (функция «Print»), а отпикированные горизонты экспортировались в формате текстовых таблиц *.dat. внешний вид такой таблицы представлен на рисунке 15.

X	Y	Профиль	Трасса	Глубина (м)	Амплитуда	Флаг
2179839.329868	1096877.154739	AR1420	1001.83	-999.0000	-999	
2179839.367587	1096877.025416	AR1420	1001.83	-999.0000	-999	
2179839.406144	1096876.893222	AR1420	1001.83	-999.0000	-999	
2179839.443863	1096876.763899	AR1420	1001.83	-999.0000	-999	
2179839.482419	1096876.631706	AR1420	1001.84	-999.0000	-999	
2179839.520138	1096876.502386	AR1420	1001.84	-999.0000	-999	
2179839.558695	1096876.370189	AR1420	1001.84	-999.0000	-999	
2179839.596413	1096876.240869	AR1420	1001.84	3330.3162	15.2727	
2179839.634971	1096876.108672	AR1420	1001.85	3330.6101	16.1879	
2179839.672689	1096875.979352	AR1420	1001.85	3330.6101	17.1094	
2179839.711246	1096875.847156	AR1420	1001.85	3330.6101	17.5349	
2179839.748965	1096875.717836	AR1420	1001.86	3330.9041	16.7451	
2179839.787522	1096875.585639	AR1420	1001.86	3330.6101	16.2897	
2179839.825240	1096875.456319	AR1420	1001.86	3330.6101	17.3804	
2179839.863798	1096875.324122	AR1420	1001.86	3330.3162	19.1974	
2179839.901516	1096875.194803	AR1420	1001.87	3330.3162	20.9065	
2179839.940073	1096875.062606	AR1420	1001.87	3330.3162	22.0107	
2179839.977792	1096874.933286	AR1420	1001.87	3330.3162	23.0545	
2179840.016349	1096874.801089	AR1420	1001.88	3330.3162	24.3644	
2179840.054905	1096874.668895	AR1420	1001.88	3330.0225	26.851	
2179840.092625	1096874.539573	AR1420	1001.88	3330.3162	28.0956	
2179840.131181	1096874.407379	AR1420	1001.88	3330.3162	28.2424	

Рис. 15. Пример экспортированной из ПО «KINGDOM» таблицы (экспортный формат не предусматривает шапки). Значения столбцов слева направо: X, Y (координаты в проектированной системе координат); название профиля; номер трассы; глубина горизонта в метрах, значение амплитуды (пустые значения: -999).

3.3 Составление карты поддонных глубин BSR

Для обработки таблиц и приведения их в формат, читаемый ПО «ArcGIS», автором был написан скрипт на языке Python в ПО «Spyder». Внешний вид скрипта представлен на рисунке 16. Сформированный *.xlsx файл импортировался в ГИС-проект. В ГИС-проекте таблицы визуализировались в формате точечных объектов – карты распределения поддонных глубин отражающего горизонта BSR. На основании точечной карты поддонных глубин BSR создавалась карта фрагментов профилей, в пределах которых наблюдается сплошной горизонт BSR. Карты представлены в главе 4.2 (Рис. 24, Рис. 25).

```
import pandas as pd
import numpy as np

BSR = pd.read_csv('*.dat', delimiter = '\t')
Bot = pd.read_csv('*.dat', delimiter = '\t')

BSR = pd.DataFrame(np.array(BSR), columns=['X1', 'Y1', 'Name1', 'depthBSR', 'Amp1'])
Bot = pd.DataFrame(np.array(Bot), columns=['X', 'Y', 'Name', 'depthBottom', 'Amp'])

Table = Bot.join(BSR)

Table = Table.drop(Table[Table.depthBSR == -999].index)
Table = Table.drop(Table[Table.depthBottom == -999].index)

Table = Table.drop(columns='Name1')
Table = Table.drop(columns='X1')
Table = Table.drop(columns='Y1')

Table['depthBSR_minus_depthBottom'] = Table['depthBSR'] - Table['depthBottom']

Table.to_excel('ResultTable.xlsx')
```

Рис. 16. Фрагмент окна программы «Spyder», на котором показан скрипт для работы с экспортируемыми из ПО «KINGDOM» файлами *.dat.

3.4 Выявление факторов, контролирующих гидратообразование в море Лаптевых

Образование гидратов в изучаемом регионе напрямую связано с генерацией природного газа в осадочной тоще. Генерация газа, в свою очередь, зависит от мощности осадочного чехла и содержания органического вещества в осадочных породах. Минимальная мощность осадочного чехла, при которой возможно накопление газовых гидратов составляет 2 км [Матвеева, 2018]. Таким образом, можно говорить, что наличие мощного осадочного чехла является одним из геологических факторов, контролирующих накопление газовых гидратов.

Большая часть фильтрогенных газовых гидратов приурочена к флюидопроводящим зонам, таким как разрывные нарушения и ослабленные зоны, проницаемые толщи. Флюидопроводники обеспечивают рассредоточенную фильтрацию

углеводородных флюидов в верхнюю часть разреза, в зону стабильности газовых гидратов [Matveeva, Soloviev, 2002; Матвеева, 2018]. Таким образом, наличие флюидопроводящих зон в осадочном чехле может контролировать флюидный режим и образование гидратов при наличии ЗСГГ.

Газовые гидраты могут существовать только в зоне стабильности, подошва которой определяется пересечением температурного градиента и кривой фазового равновесия газового гидрата, определённого состава. Очевидно, что при неизменном составе газа и постоянном давлении (то есть постоянной глубине моря) положение подошвы ЗСГГ будет определяться тепловым полем. Вблизи хребта Гаккеля тепловой поток выше в сравнении с окружающими участками исследуемой акватории [Керимов и др., 2020], следовательно, можно определить степень влияния хребта Гаккеля по глубине BSR на гидратообразование – над хребтом положение BSR должно быть ближе к морскому дну, чем в остальных глубоководных частях моря Лаптевых.

Для выявления факторов контроля гидратообразования на исследуемой акватории изучались материалы сейсморазведочных работ [Васильева и др., 2019; Петрушина и др., 2020] и материалы из опубликованных литературных источников [Кирилова-Покровская, 2017; Поселов и др., 2012]. По интерпретированным геолого-геофизическим разрезам и литературным данным определялись: 1) наличие разрывных нарушений и ослабленных зон, способных обеспечить разгрузку флюидов в зону стабильности ГГ; 2) мощность осадочного чехла 3) влияние крупных структур, таких как хребет Гаккеля.

4. Результаты

4.1 Результаты интерпретации сейсмических разрезов

В ходе работ выполнена переинтерпретация сейсмических разрезов МОВ ОГТ16, AR1405, AR1420, AR1422, AR1423, SL182D01-SL182D35, TS182D01-22; по материалам: АО «Росгеология» (TS182D01-TS182D22, SL182D01-SL182D35), ОАО «СЕВМОПГЕО» (МОВ ОГТ16), ОАО «МАГЭ» (AR1405, AR1420, AR1422, AR1423) (см. Таб. 1). Целью переинтерпретации сейсморазведочных данных было выявление BSR – основного признака газовых гидратов на сейсморазведочных записях, поскольку ранее таких работ в акватории моря Лаптевых практически не проводилось. Исключение составляет работа Богоявленского и др., [2018].

Всего проанализирован 61 сейсмический разрез в цифровом формате SEG Y. BSR был идентифицирован на 42 разрезах, что свидетельствует о широком его распространении, а значит, о распространении газовых гидратов на континентальном склоне и абиссальной равнине в пределах моря Лаптевых.

Ниже приводится характеристика наиболее характерных гидратообусловленных аномалий, выявленных в ходе переинтерпретации цифровых сейсморазведочных данных.

Центральные и восточные части профилей SL182D21-SL182D31, профили SL182D05-SL182D17, западная часть профиля МОВ ОГТ 16 и южные части профиля AR1420 демонстрируют широкое распространение BSR. Горизонт характеризуется отрицательной полярностью, широким диапазоном амплитуд отражённого сигнала и сплошным/локально прерывистым характером распространения. Часто над BSR наблюдается зона осветления. Примеры выявленных BSR представлены на рисунках 17-19.

Профиль МОВ ОГТ 16 пересекает хребет Гаккеля и большей частью находится в котловине Нансена (см. Рис. 13). Поддонная глубина BSR варьирует от 200 до 400 м, рефлектор имеет общую протяжённость 240 км.

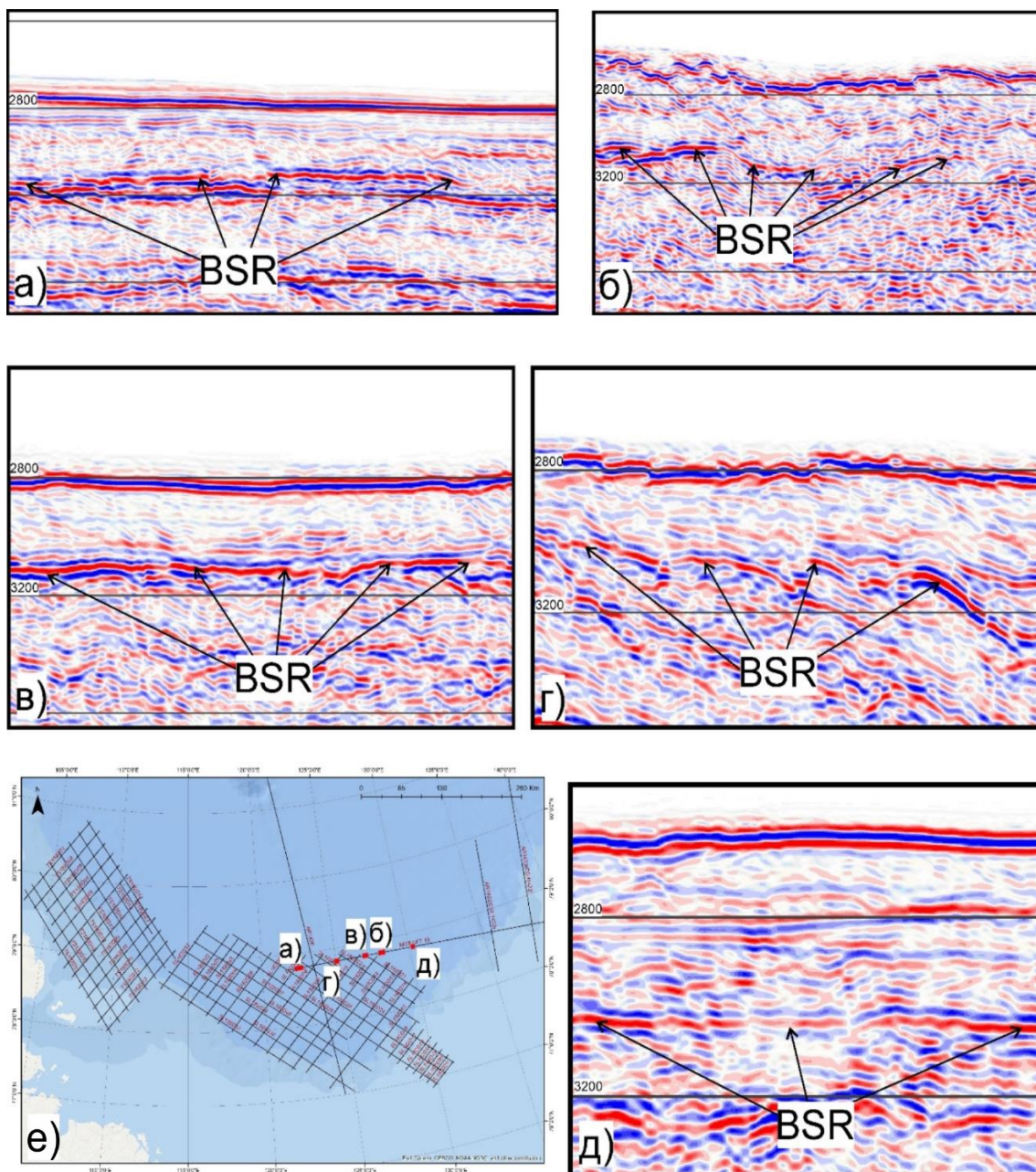


Рис. 17. Фрагменты сейсмического разреза МОВ ОГТ 16, на которых выявлен BSR: а) BSR сильной амплитуды, с зоной осветления над ним; б) BSR с различными значениями амплитуд и характерной субпараллельностью неровному рельефу дна; в) BSR сильной амплитуды параллельный дну с осветлением над ним; г) фрагмент записи через антиклинальную структуру с прерывистым BSR в зоне разрывных нарушений; д) сплошной BSR с различными значениями амплитуд отражённого сигнала; е) положение фрагментов (а-д) на профиле МОВ ОГТ 16 (красные отрезки).

На сейсмическом разрезе SL182D21 (континентальный склон) и разрезах SL182D24, SL182D27, SL182D30 (склон хребта Гаккеля) (см. Рис. 13) также выявлены многочисленные BSR (Рис. 18). BSR располагается на поддонных глубинах от 100 до 300 м. Морфология гидратообусловленного рефлектора также, как и в предыдущем случае, определяется структурно-тектоническими особенностями осадочного разреза и,

по-видимому, газонасыщенностью отложений. В большинстве случаев BSR повторяет рельеф морского дна, пересекает осадочную слоистость (Рис. 18 (а, б, г)).

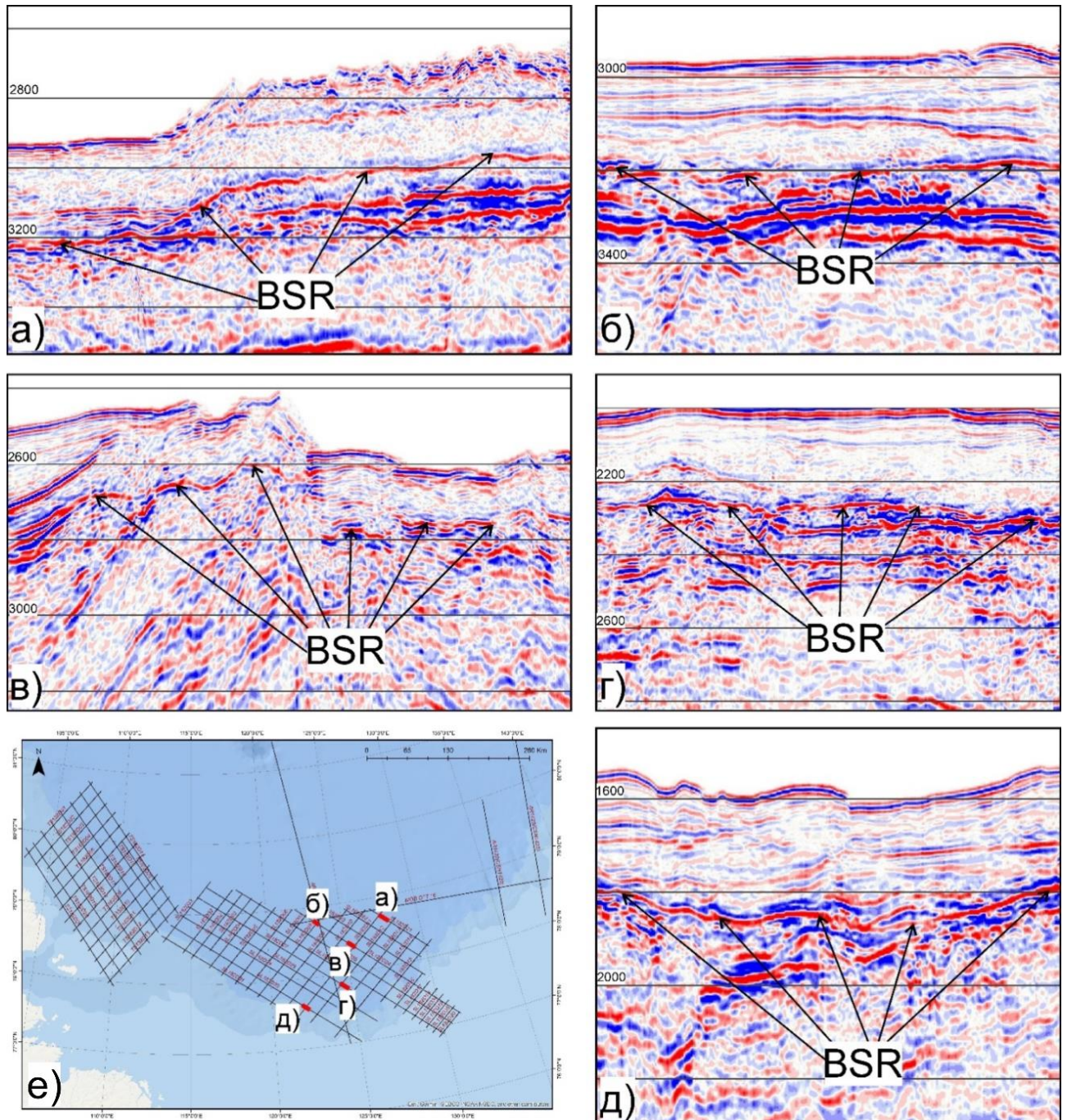


Рис. 18. Фрагменты сейсмических разрезов SL182D21, SL182D24, SL182D27, SL182D30 с выявленными BSR: а) фрагмент профиля SL182D21, BSR отчётливо повторяет отражение от морского дна; б) фрагмент профиля SL182D24, прерывистый BSR субпараллельный морскому дну; в) фрагмент профиля SL182D24, BSR, характеризующийся различными значениями амплитуд, освещением над ним, прерывистостью и отчетливым пересечением осадочной слоистости; г) фрагмент профиля SL182D27, BSR характеризующийся высокой амплитудой отраженного сигнала и освещением над ним; д) фрагмент профиля SL182D30, BSR с высокой амплитудой; е) положение фрагментов профилей (а-д) на сейсмопрофилях (красные отрезки).

Множественные BSR различной морфологии с обширными зонами осветления выявлены в ходе переинтерпретации профилей SL182D07, SL182D09, SL182D11, SL182D14, SL182D17 (Рис. 13), расположенных на континентальном склоне. Диапазон поддонных глубин положения BSR составляет 180-350 м (Рис. 19)

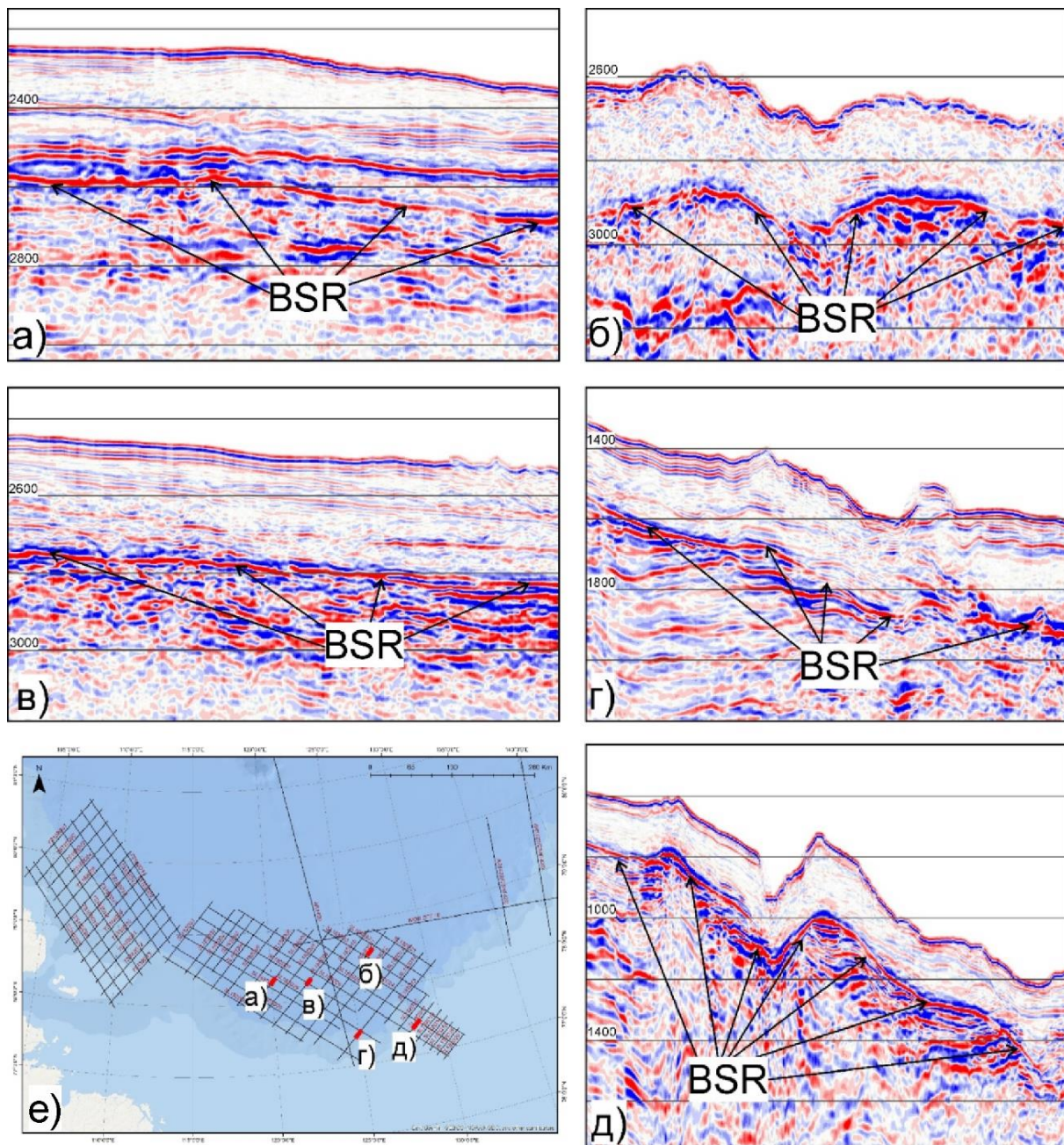


Рис. 19. Фрагменты профилей SL182D07, SL182D09, SL182D11, SL182D14, SL182D17, иллюстрирующие положение BSR: (а-д) яркие BSR обратной полярности, отчётливо повторяющее рельеф дна с зонами осветления над ним; е) расположение фрагментов (а-д) на изученных профилях (красные точки).

BSR, идентифицированный на разрезах AR1422 и AR1423 в котловине Амундсена и континентальном склоне в восточной части моря Лаптевых, характеризуется яркостью, отчетливостью и значительной протяженностью (Рис. 20).

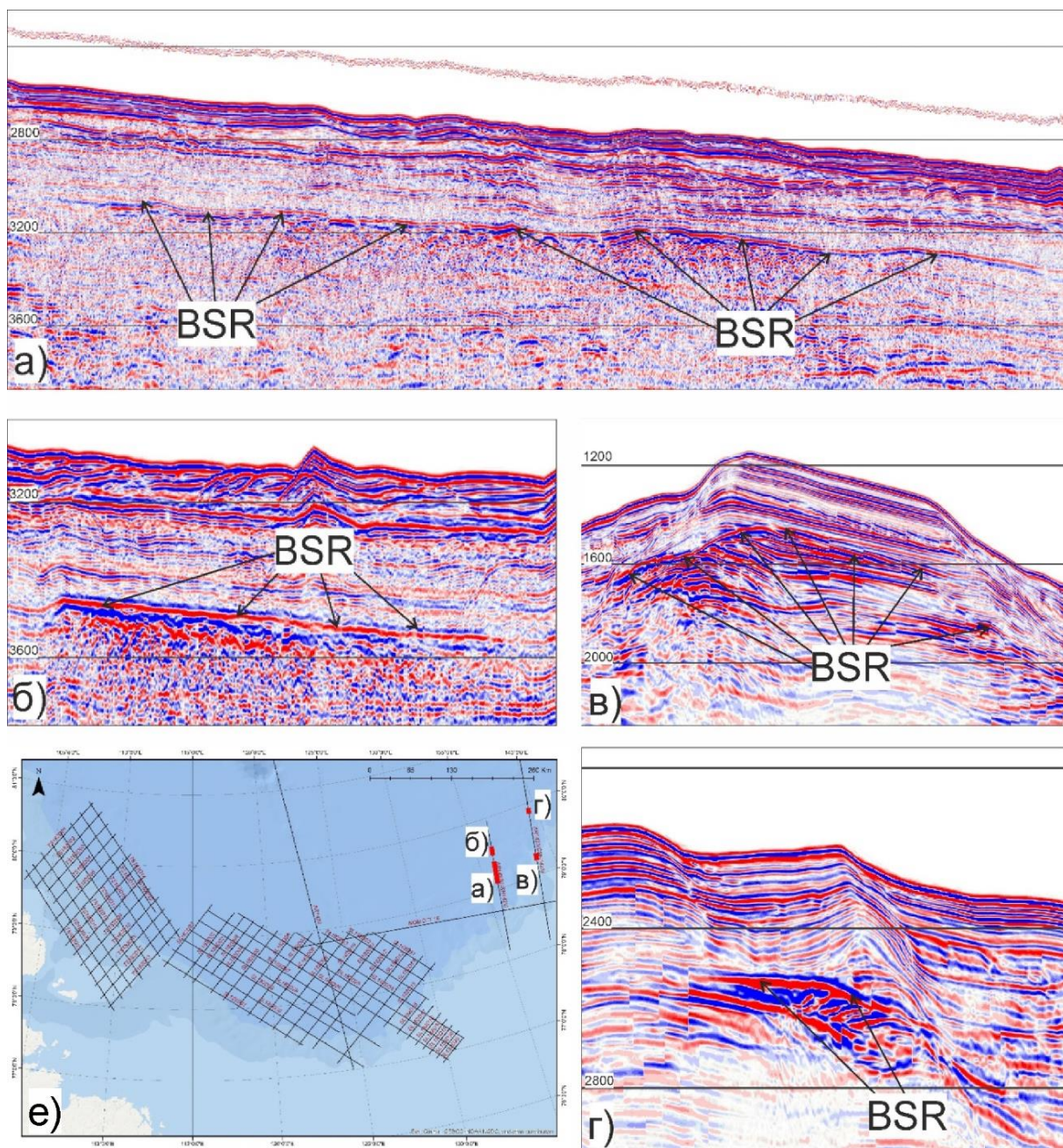


Рис. 20. Фрагменты сейсмических разрезов AR1422 и AR1423 с выявленным BSR: а) на протяженный, сплошной хорошо выраженный по амплитуде BSR; б) локальный яркий BSR; в,г) на фрагментах локальные аномалии BSR, BSR параллельны дну, секут осадочную слоистость и имеют высокие значения амплитуд отражённого сигнала; е) расположение фрагментов на изученных профилях (красные точки).

На западных частях профилей SL182D02, SL182D05, SL182D32, SL182D33, расположенных на континентальном склоне, его подножии и в котловине Нансена, BSR менее распространен. Амплитуда рефлектора варьирует в широких пределах. BSR имеет

прерывистый характер и распространен по большей части на абиссальной равнине. В некоторых случаях наблюдается особенно ярко – выраженное пересечение BSR осадочной слоистости. Осветление над ним практически отсутствует (Рис. 21).

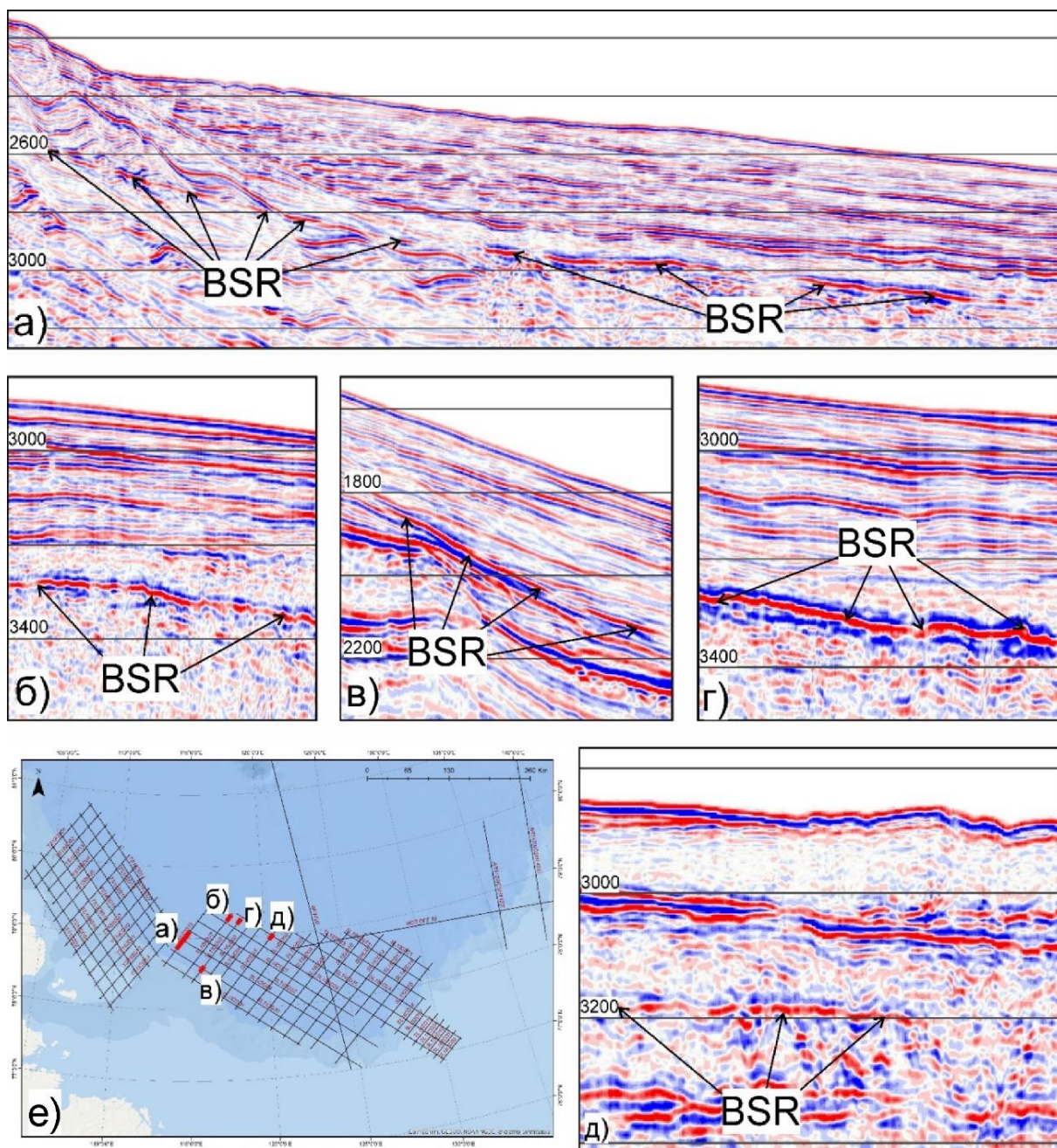


Рис. 21. (а-д) Фрагменты разрезов SL182D02, SL182D05, SL182D32, SL182D33 с выявленным BSR и их положение (е) красные точки.

В ходе интерпретации также были выделены участки профилей, на которых наблюдаются сейсмические границы по характеристикам похожие на BSR, но по некоторым причинам их нельзя достоверно диагностировать как BSR: из-за недостаточной вертикальной разрешённости сейсмического разреза или невозможности

проследить оси синфазности на удалении, наложении волновых картин от нескольких сейсмических границ, несоответствии некоторым косвенным свойствам BSR.

Так, на профилях TS182D02, TS182D03, TS182D07, TS182D08, TS182D11 (Рис. 22) в глубоководной части акватории и на бровке шельфа при небольших поддонных глубинах (100-200 м) наблюдалась сейсмическая граница отрицательной полярности, похожая на BSR. По динамическим характеристиками граница контрастна – амплитуды отражённого сигнала как сильные, так и слабые. Граница сильно прерывиста и развита локально – вблизи бровки шельфа, её невозможно проследить вверх и вниз по склону. Граница параллельна рельефу морского дна, и в некоторых случаях можно сделать вывод, что она пересекает осадочную слоистость.

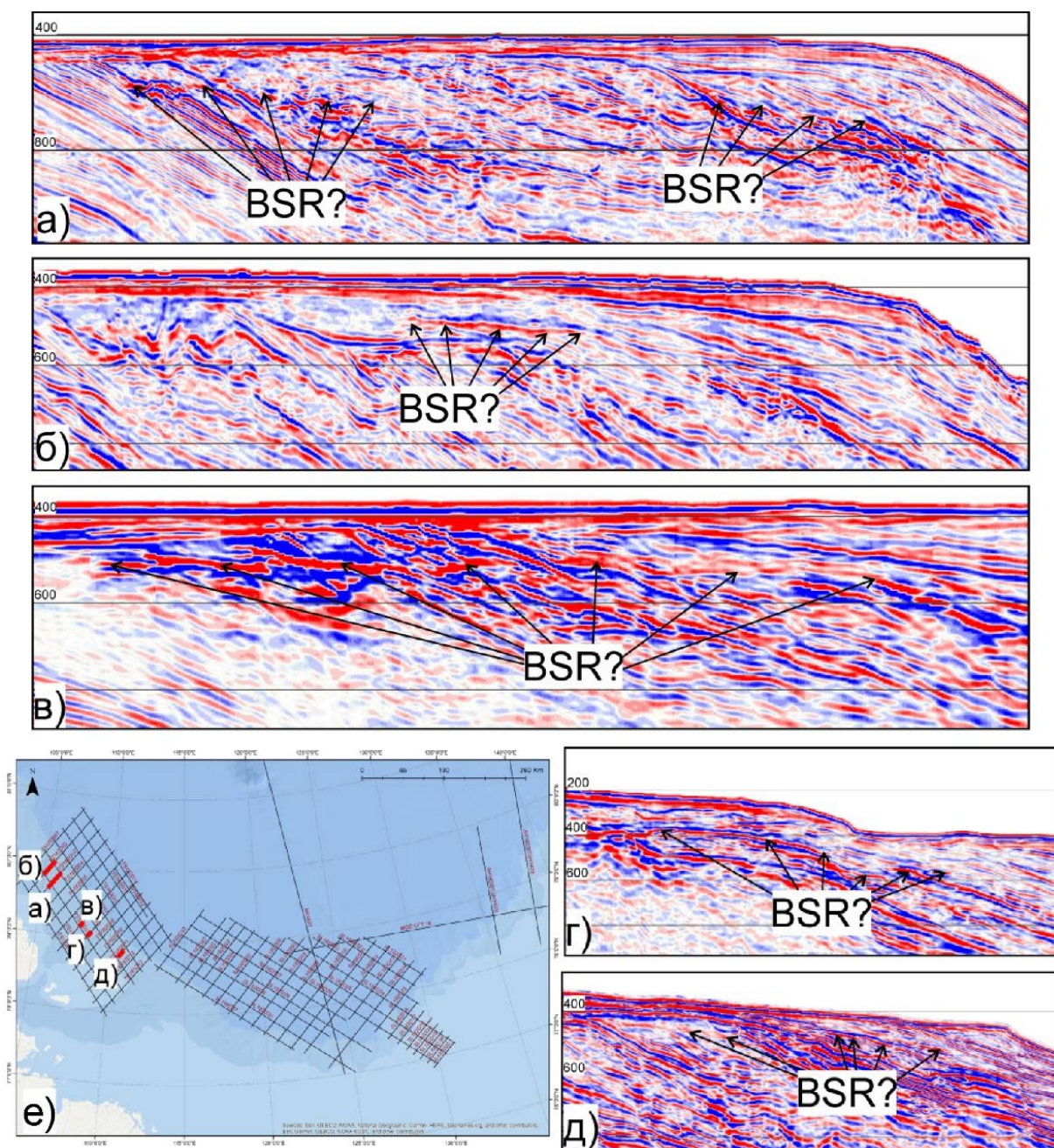


Рис. 22. Фрагменты профилей TS182D02, TS182D03, TS182D07, TS182D08, TS182D11 (а-д); стрелками отмечено положение границы, похожей на BSR; (е) расположение изученных фрагментов на профилях.

В центральной части исследуемой акватории (Рис. 23) также есть участки разрезов, содержащие аномалии, схожие с BSR. Аномалии располагаются на той же поддонной глубине, что и BSR на прилегающих участках, и повторяют рельеф дна, однако нельзя достоверно отнести эти отражения к BSR по нескольким причинам: наложение высокоамплитудных отражений от других горизонтов, отсутствие некоторых косвенных признаков BSR.

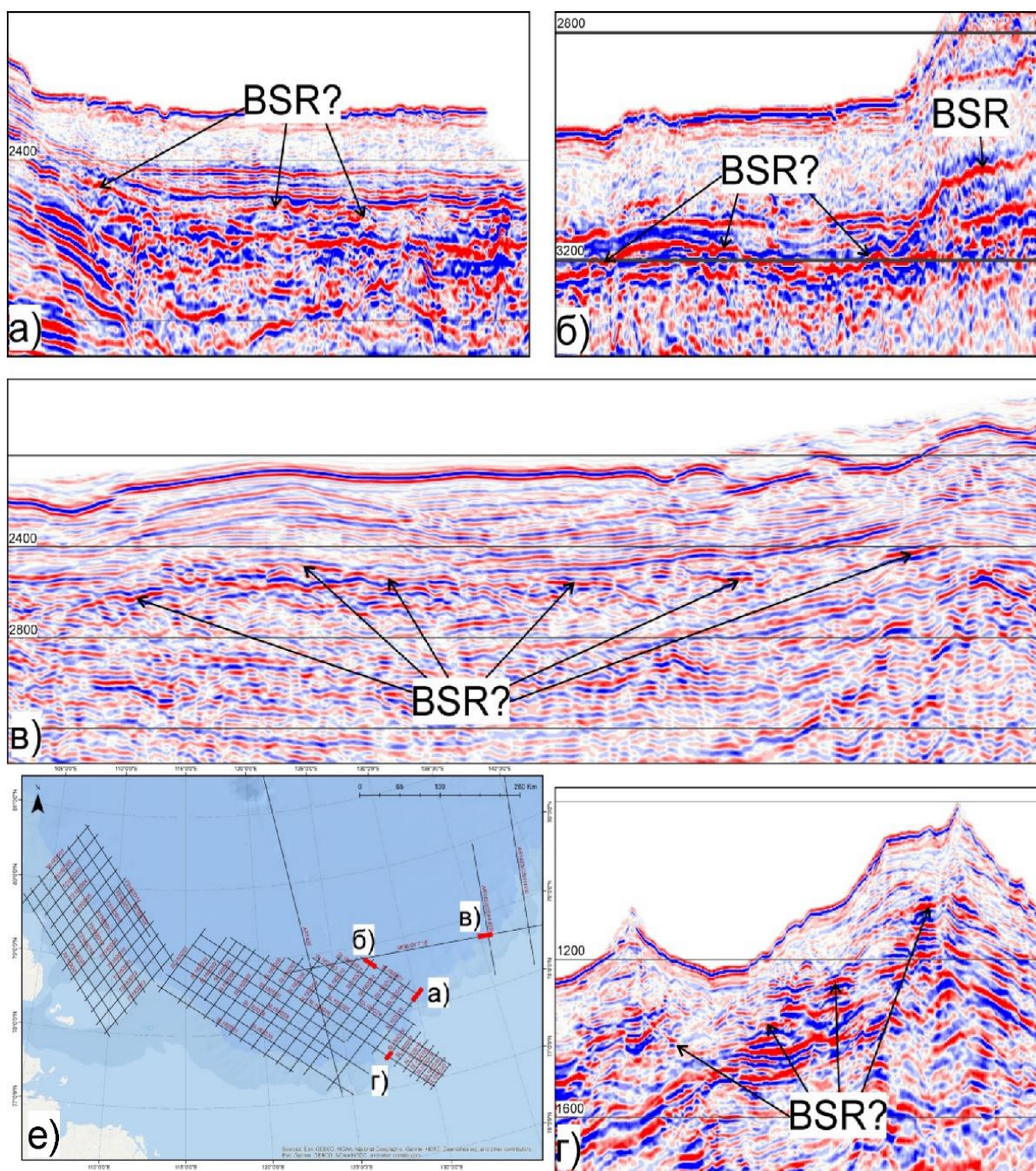


Рис. 23. Фрагменты сейсмических разрезов МОВ ОГТ 16, SL182D15, SL182D16, SL182D21 (а-д); стрелками показано положение предполагаемого BSR; (е) положение изученных фрагментов на профилях.

4.2 Картирование BSR по площади и разрезу

В результате обработки табличных данных (см. главу 3.3) в ПО «ArcGIS» были составлены схема расположения фрагментов профилей с BSR (Рис. 24) и карта поддонных глубин горизонта BSR (Рис. 25).

На рисунке 25 видны основные закономерности распределения поддонных глубин BSR: на абиссальных равнинах в глубоководных котловинах (северо-западная и северо-восточная части исследуемой акватории) поддонная глубина BSR значительна и достигает 460 м. На континентальном склоне выявлена следующая закономерность: поддонная глубина BSR пропорциональна глубине морского дна и меняется от 100 м на бровке шельфа до 300 м у подножия континентального склона. Наблюдается также зависимость глубин от близости к оси хребта Гаккеля: на удалении от хребта поддонные глубины BSR максимальны и достигают 460 м, в центральной части исследуемой площади глубины BSR меньше, в осевых частях разрывных зон, связанных с хребтом Гаккеля, поддонная глубина BSR уменьшается до 150-200 м.

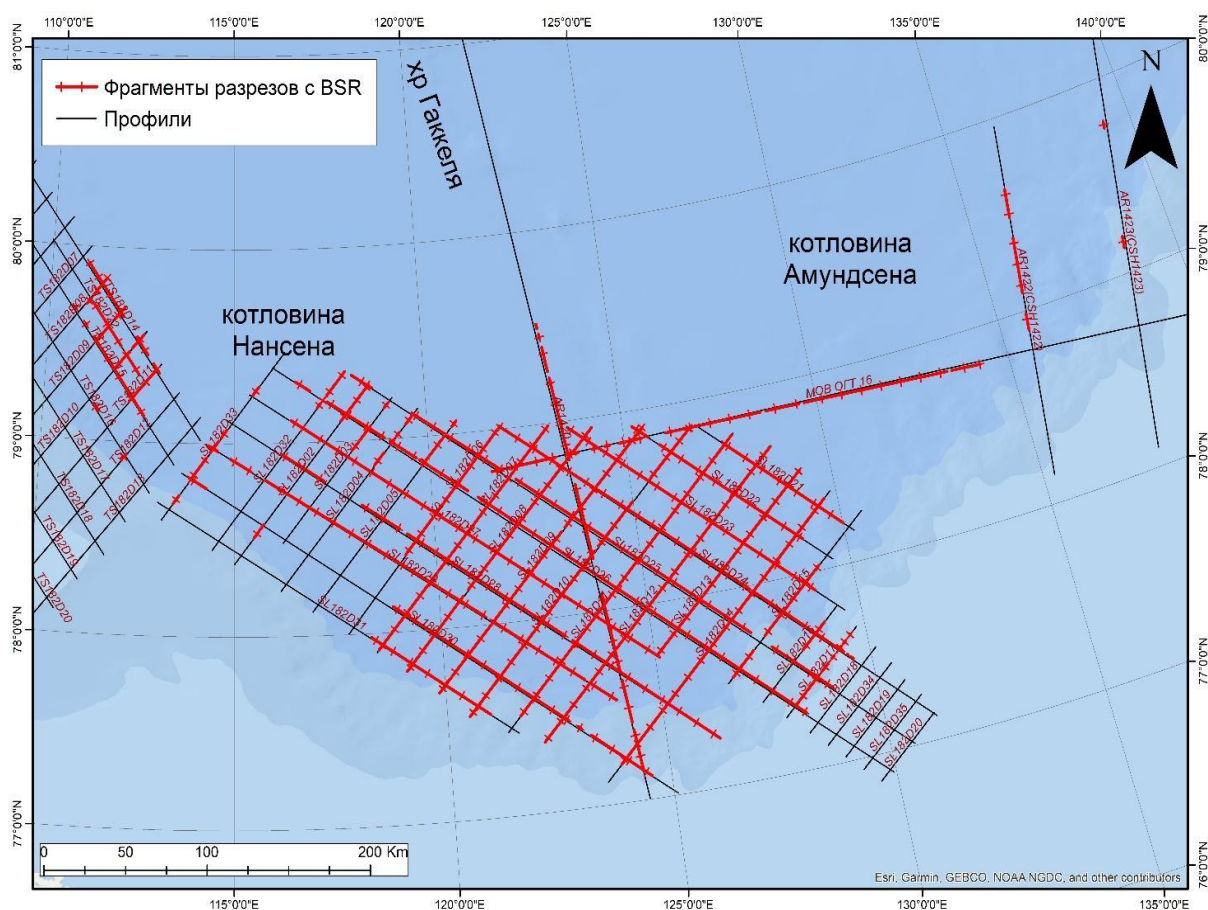


Рис. 24. Схема расположения фрагментов профилей, на которых выявлен отражающий горизонт BSR

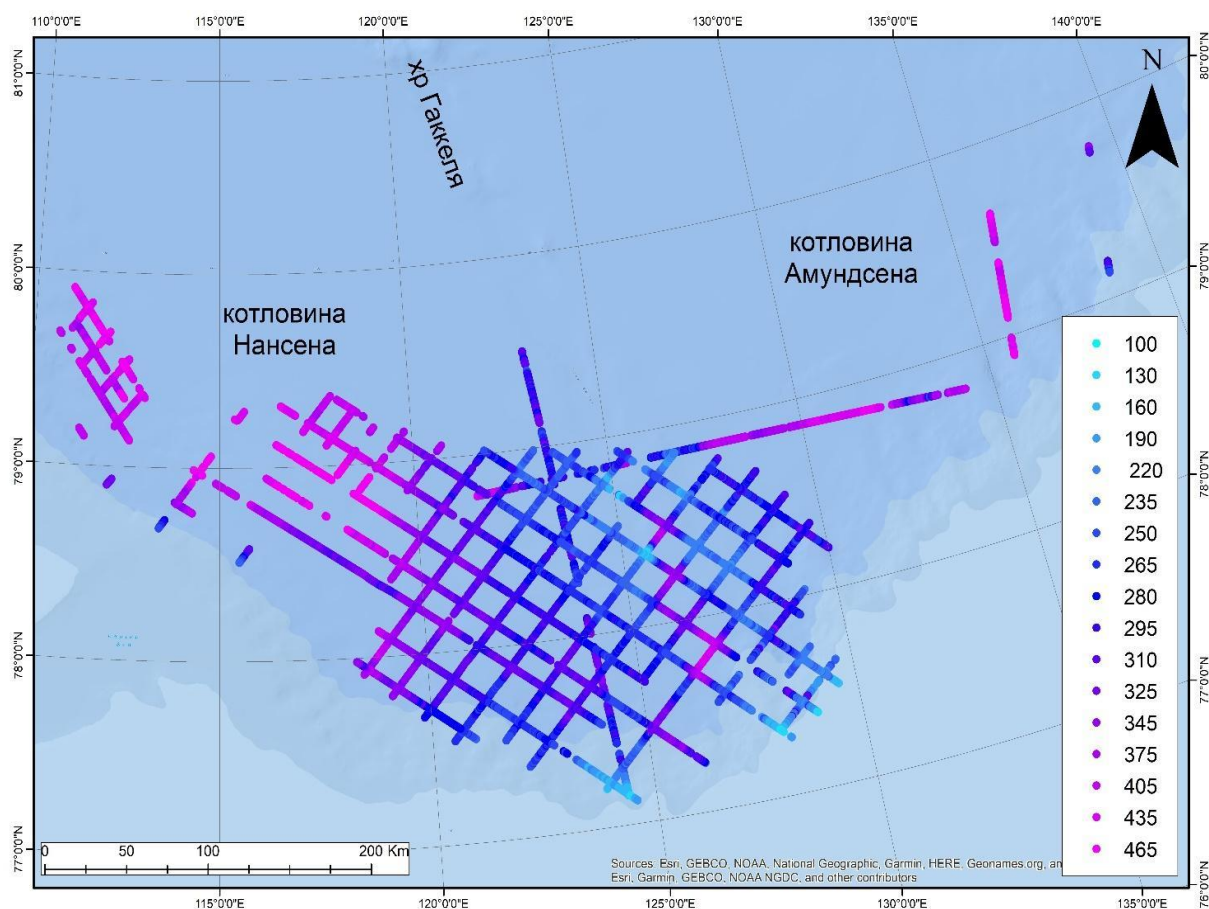


Рис. 25. Карта распределения поддонных глубин отражающего горизонта BSR.

4.3 факторы геологического, контроля гидратообразование в море Лаптевых

4.3.1 Условия генерации углеводородных газов

Как было показано выше (глава 1.2), достаточная для генерации углеводородов мощность осадочного чехла является одним из ключевых геологических факторов гидратообразования наряду с физическими факторами – температурой (тепловой поток из недр) и давлением (гидростатическое давление на морском дне).

По результатам изучения литературного материала по геологии исследуемого региона, установлено, что большая часть акватории моря Лаптевых характеризуется мощным осадочным чехлом, варьирующим от 1 до 9 км (Рис. 26) [Васильева и др., 2019; Кирилова-Покровская, 2017; Петрушина и др., 2020; Поселов и др., 2012]. В главе 1.2 представлены материалы по бассейновому моделированию в море Лаптевых. Один из выводов по результатам моделирования – при мощности осадочного чехла более 2 км на

исследуемой акватории уже существовали условия для генерации углеводородов. Органическое вещество большей части осадочного разреза, вероятно, прошло или проходит стадию «газового окна».

Мощность осадочного чехла менее 2 км наблюдается только на шельфе – в прибрежной зоне за пределами дельты Лены и вокруг архипелагов Северная Земля и Новосибирские острова (вне ЗСГГ) и на хребте Ломоносова. Закономерно, что в этих областях гидратообусловленный горизонт BSR не наблюдался. В глубоководной части моря Лаптевых, где широко представлен BSR, мощность чехла составляет более 2 км, включая осевую часть хребта Гаккеля (Рис. 29). Таким образом, в изученном регионе мощность осадочного чехла является одним из факторов, контролирующих образование газовых гидратов.

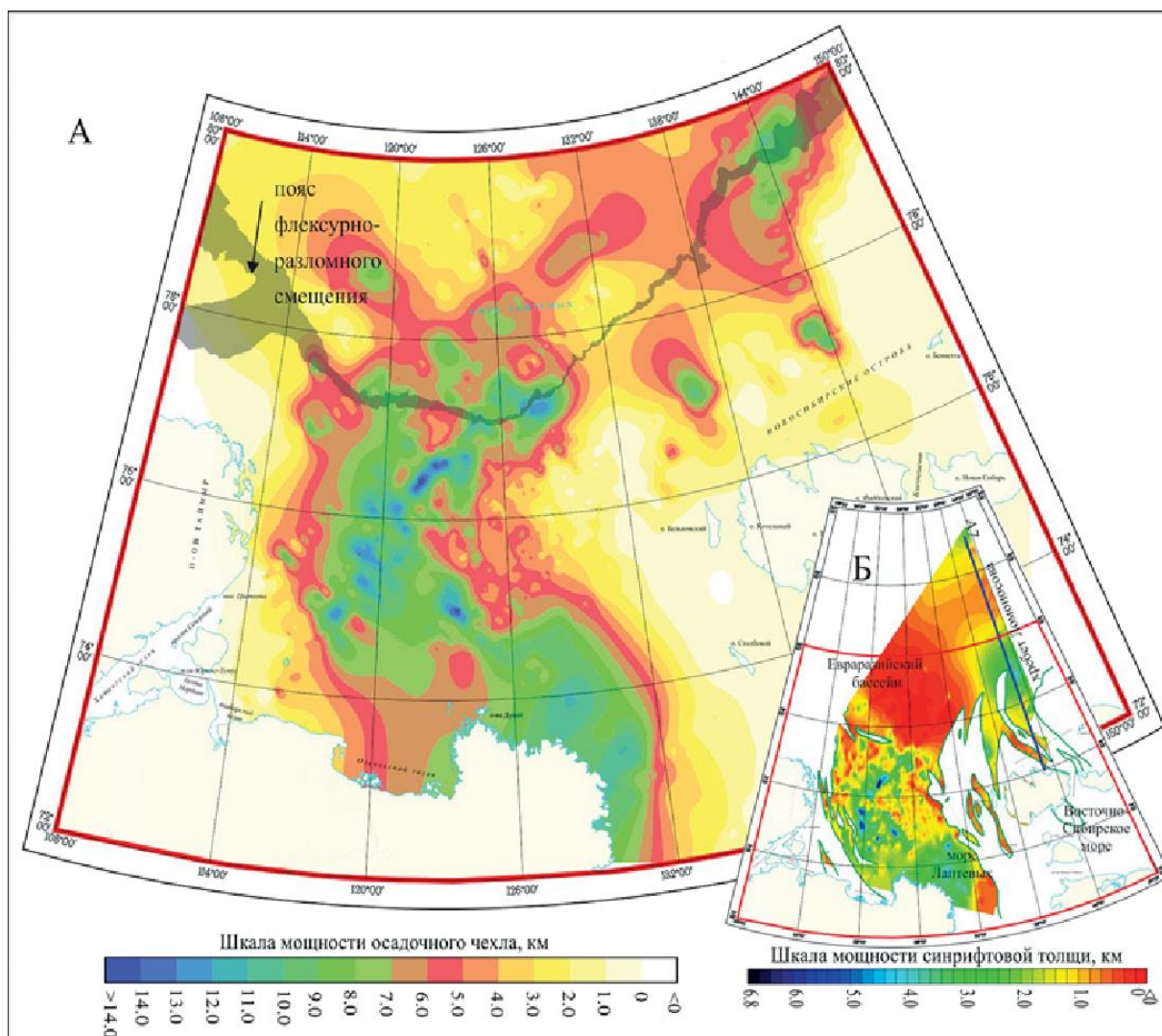


Рис. 26. Карта мощности осадочного чехла в исследуемой части акватории моря Лаптевых, [Кирилова-Покровская, 2017].

4.3.2 Структурно-тектонический контроль гидратообразования

Поскольку для образования гидратов необходимо, чтобы образованный в недрах на значительной поддонной глубине газ попал в ЗСГГ, еще одним фактором, ответственным за это является наличие флюидопроводящих зон – трещин, разломов, проницаемых отложений. Такие зоны в подавляющем большинстве случаев связаны со структурно-тектоническими особенностями.

В частности, осадочный чехол моря Лаптевых рассечён множеством дизъюнктивных нарушений. Описание системы разрывных нарушений приведено в главе 1.1. По результатам интерпретации сейсморазведочных данных, проведённой специалистами АО «Росгеология» (2019-2020 гг.), ОАО «СЕВМОРГЕО» (2013 г.), в осадочном чехле моря Лаптевых было выявлено значительное количество ослабленных зон и разрывных нарушений, являющихся флюидопроводниками, обеспечивающими рассредоточенную миграцию флюидов в ЗСГГ. Фрагменты сейсмических разрезов с положением BSR и выделенными разломами проиллюстрированы на рисунках 28 (континентальный склон в центральной части исследуемой акватории, соответствует южной части котловины Нансена) и 29 (хребет Гаккеля в абиссальной части исследуемой области), положение фрагментов отмечено на рисунке 27.

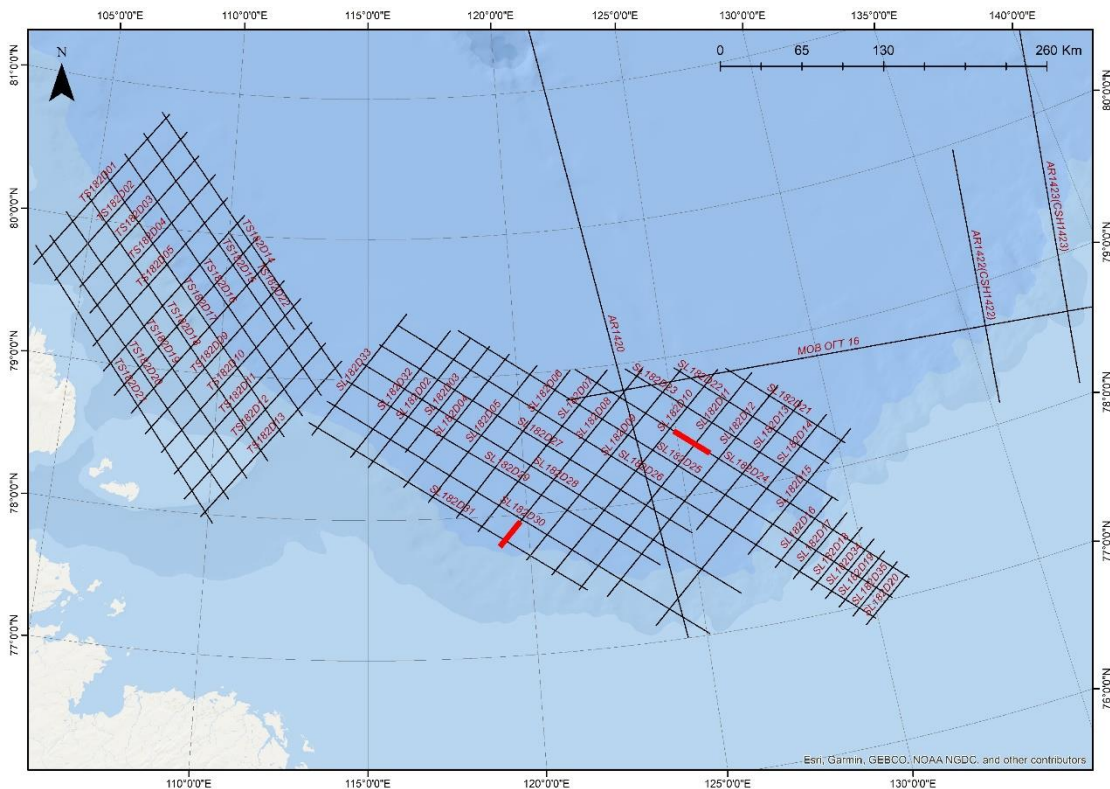


Рис. 27. Положение фрагментов сейсмических разрезов, представленных на рисунках 28 и 29.

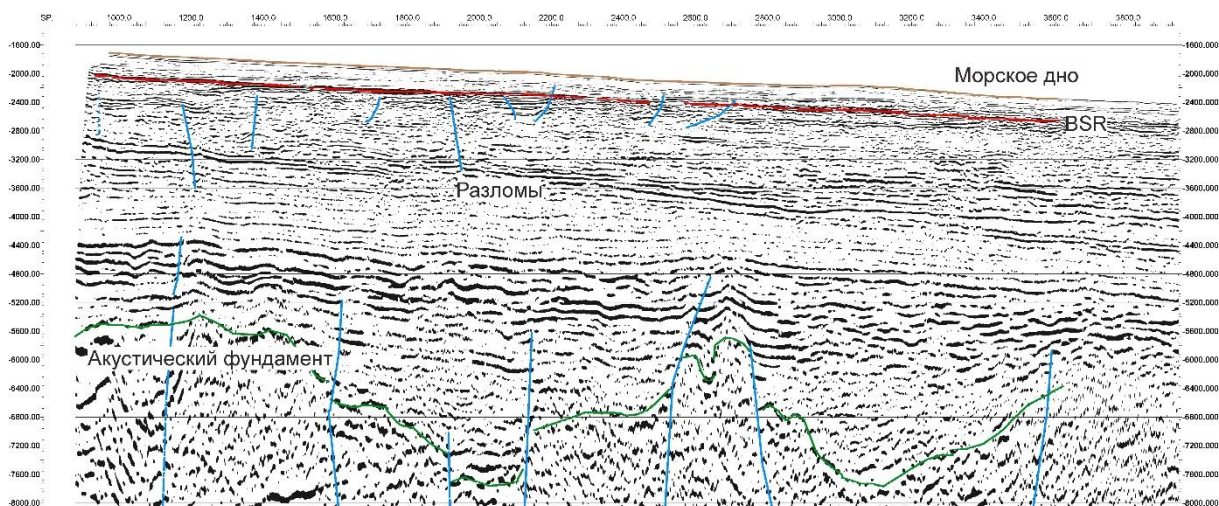


Рис. 28. Сейсмогеологический разрез по фрагменту профиля SL182D08, расположенному на континентальном склоне в центральной части исследуемой акватории (южная часть котловины Нансена); красным показано положение BSR, коричневым – дно, зелёным – акустический фундамент, синим – разрывные нарушения. Положение профиля см. на рис. 27.

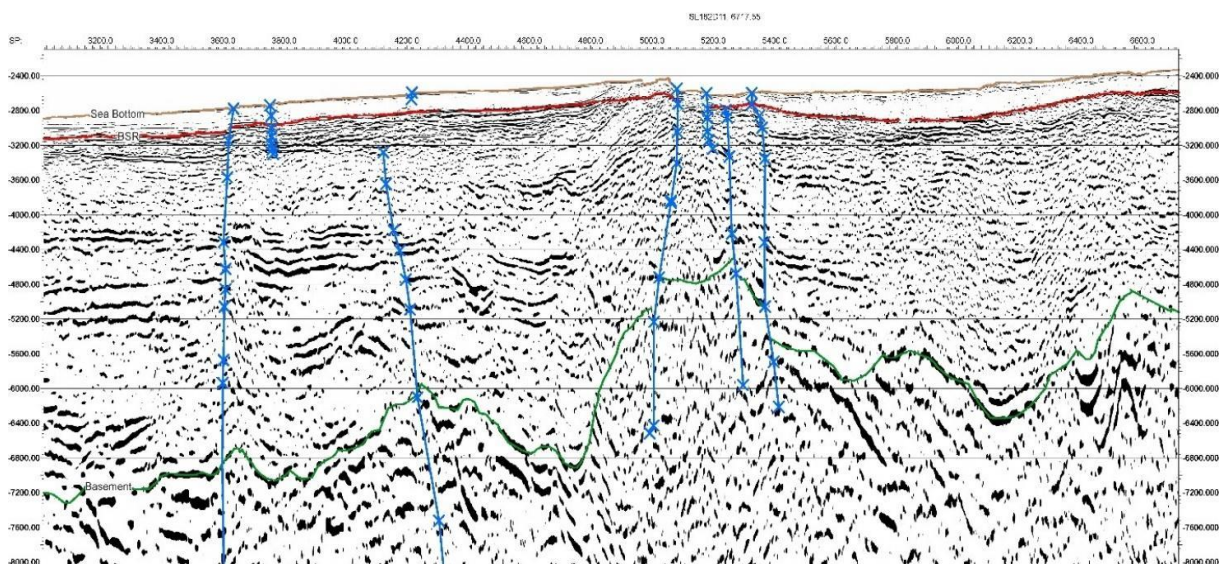


Рис. 29. Сейсмогеологический разрез по фрагменту профиля SL182D24 через хребт Гаккеля, красным показано положение BSR, коричневым – дно, зелёным – акустический фундамент, синим – разрывные нарушения. Положение профиля см. на рис. 27.

4.3.3 Геодинамический режим в пределах хребта Гаккеля, как фактор контроля гидратообразования

Условия формирования скоплений газовых гидратов не одинаковы на пассивных и активных континентальных окраинах, а также в отдельных зонах коллизии или растяжения [Матвеева, 2018]. Анализ составленных карт распространения BSR по площади и разрезу изученной акватории показал различие в глубине залегания BSR над хребтом Гаккеля и на прилегающих котловинах. При сопоставлении тектонической

карты района работ на южном продолжении хребта Гаккеля с картой глубин залегания горизонта BSR (Рис. 30) установлено, что глубина BSR уменьшается вблизи хребта Гаккеля.

При изучении зависимости поддонной глубины BSR от глубины морского дна (Рис. 31а) были выявлены две основные особенности: 1) большинство точек попадает на линейный тренд (соответствующий нормальному погружению BSR с ростом глубины морского дна); 2) значительная часть точек выпадает из этого тренда (при большой глубине моря, поддонная глубина BSR меньше ожидаемой). При определении географического положения выпавших из нормального тренда точек (Рис. 31б) выяснилось, что все они находятся вблизи хребта Гаккеля, это подтверждает влияние флюидо-динамического фактора за счёт аномального теплового поля рядом с хребтом Гаккеля.

Подразумевая, что хребет Гаккеля – срединно-океанический хребет, в его пределах геодинамические условия отличны от прилегающих котловин, что, вероятно, влияет на глубину залегания BSR посредством флюидо-динамических процессов (разгрузка флюидов и повышенный поток тепла из недр) и структурно-тектонических факторов (возникновение ослабленных зон и разрывных нарушений). Таким образом, наличие в изученном регионе такой значительной геологической структуры, как хребет Гаккеля, позволяет интерпретировать его, как геодинамический фактор контроля гидратообразования, который, в свою очередь, определяет флюидо-динамические и структурно-тектонические факторы контроля гидратообразования.

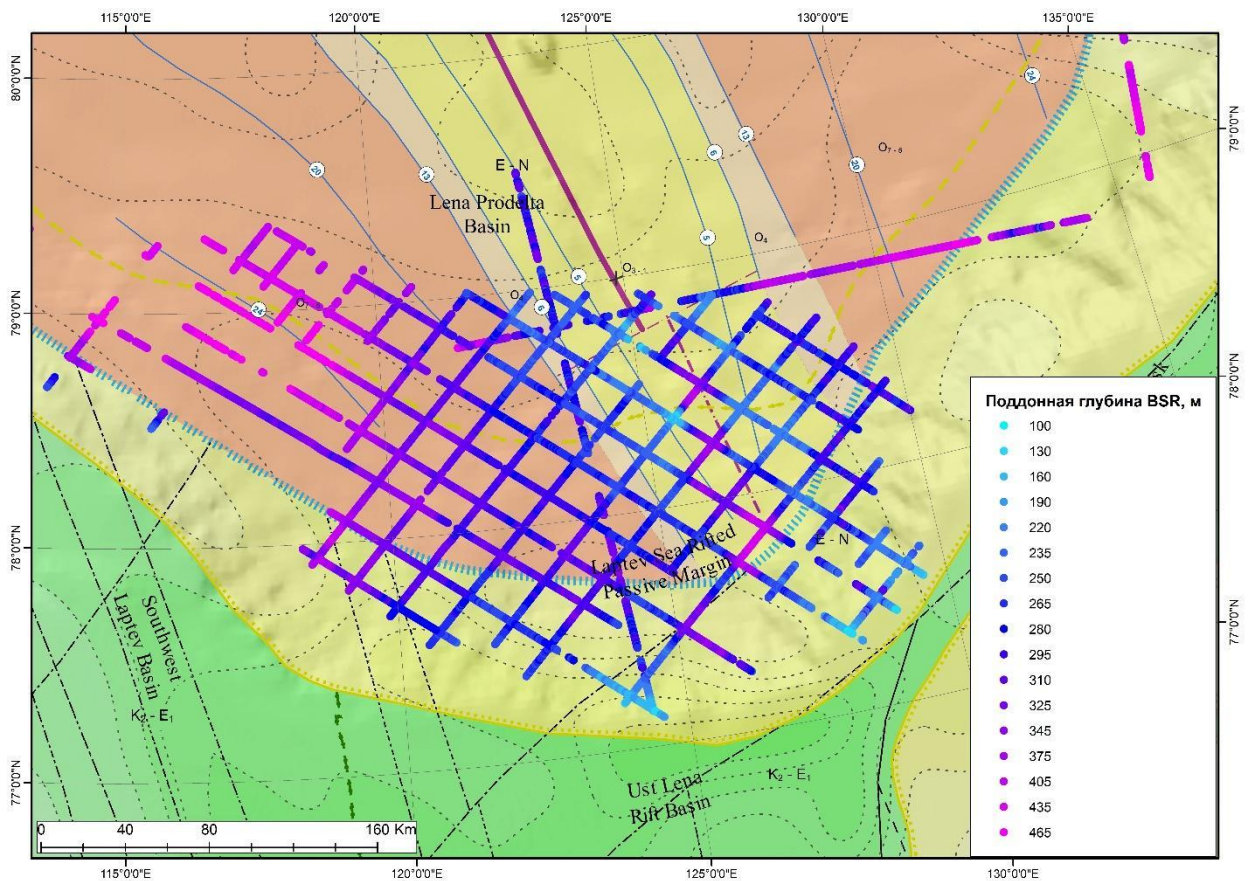


Рис. 30. Карта залегания горизонта BSR, наложенная на тектоническую карту моря Лаптевых [Petrov et al., 2013]; заливкой и индексами на тектонической карте отмечен возраст земной коры (мел – зелёный, палеоген – розовый, неоген – жёлтый).

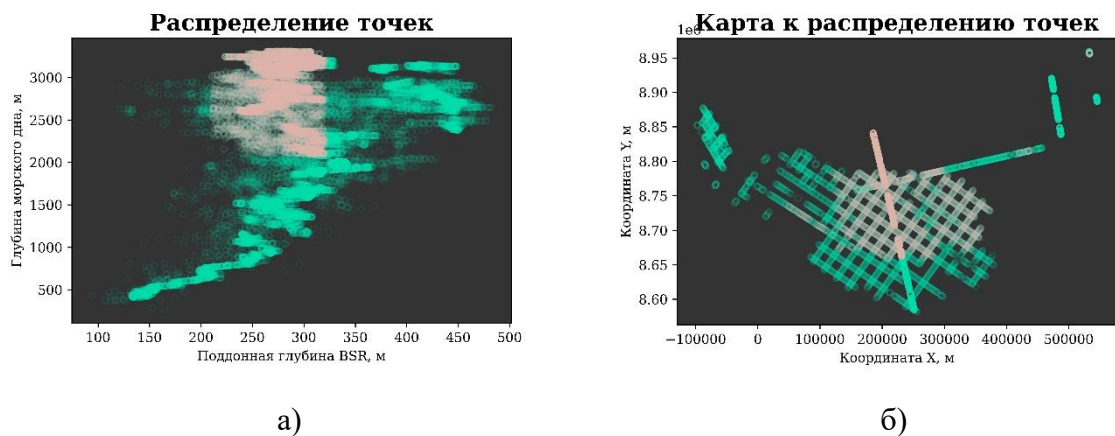


Рис. 31. График распределения точек значений поддонной глубины залегания BSR в координатах глубина морского дна / поддонная глубина BSR (а); (б) положение точек глубины залегания BSR в географических координатах; розовым цветом выделены точки, выпадающие из линейного тренда на графике (а).

В результате выполнения работы были выявлены следующие факторы, контролирующие образование гидратов фильтрационного генезиса в отложениях моря Лаптевых: 1) мощность осадочного чехла, обеспечивающая генерацию газа для гидратообразования; 2) структурно-тектонический контроль, обеспечивающий наличие

газопроводящих зон – разломов для поступления газа в ЗСГГ; 3) геодинамический контроль, обусловленный наличием в пределах хребта Гаккеля повышенной тепловой и тектонической активности.

Заключение

В ходе работы выполнена переинтерпретация материалов МОВ ОГТ в море Лаптевых в объеме 13120 пог.км. Выявлено 99 гидратообусловленных аномалий типа BSR. Картирование BSR позволяет предполагать, что большую часть Лаптевоморского шельфа занимает крупное скопление газовых гидратов общей площадью 62 тыс.км². Поддонная глубина BSR (положение подошвы зоны стабильности газовых гидратов) изменяется от 100 м на бровке шельфа до 460 м на глубоководных котловинах моря Лаптевых и от 120 м в осевой части хребта Гаккеля до 460 м на его флангах.

По данным фондовых работ выявлена сеть разрывных нарушений под BSR. Разрывные нарушения, прослеживаемые до подошвы ЗСГГ могут рассматриваться, как флюидопроводники, обеспечивающие рассредоточенную миграцию флюидов, в зону стабильности газовых гидратов.

Мощный осадочный чехол в местах обнаружения BSR обеспечивает необходимую для генерации достаточного количества газа степень преобразования органического вещества.

В результате выполнения работы были выявлены следующие факторы, контролирующие образование гидратов фильтрационного генезиса в отложениях моря Лаптевых: 1) мощность осадочного чехла, обеспечивающая генерацию газа для гидратообразования; 2) структурно-тектонический контроль, обеспечивающий наличие газопроводящих зон – разломов для поступления газа в ЗСГГ; 3) геодинамический контроль, обусловленный наличием в пределах хребта Гаккеля повышенной тепловой и тектонической активности. Все поставленные научные задачи решены, цель работы достигнута.

Практическая значимость работы. Результаты, полученные автором в ходе выполнения данной выпускной работы, войдут в отчет ФГБУ «ВНИИОкеангеология» по государственному заданию «Актуализация количественной оценки газовых гидратов в акваториях морей России», где автор является исполнителем. Данные о глубине залегания BSR и его свойства геотермометра будут использованы ФГБУ «ВНИИОкеангеология» для описания теплового поля в районе работ, а также для количественных оценок метана в газовых гидратах моря Лаптевых.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам ФГБУ «ВНИИОкеангеология», где выполнялась работа, А.А. Черных за предоставленный

доступ к материалам, О.В. Назаровой, А.В. Бочкарёву за рекомендации при выполнении работы и доступ к необходимому программному обеспечению, а также за консультативную помощь и поддержку при ее выполнении. Автор благодарит научных руководителей работы д.г.-м.н. Г.А. Черкашёва, к.г.-м.н. Т.В. Матвееву за научное руководство, поддержку и ценные советы при выполнении и написании текста выпускной работы. Отдельную благодарность автор выражает Т.С. Сакулиной за консультационную помощь по работе с геофизической информацией и написанию соответствующих глав.

Список литературы

Русскоязычная литература

1. Андиева Т. А. Тектоническая позиция и основные структуры моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 98. № 3. С. 1–28.
2. Анохин В. М., Гусев Е. А. Разрывная тектоника зоны сочленения океанической и континентальной коры в море Лаптевых // Вестник Томского государственного университета. 2003. Т. 3. № 1. С. 21–23.
3. Богоявленский В. И. и др. Газовые гидраты на акваториях циркумарктического региона // Научные исследования в Арктике. 2018. Т. 3. № 3(31). С. 42–55.
4. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Субмаринные газовые гидраты. Санкт-Петербург: ВНИИОкеангеология, 1994.
5. Заварзина Г. А., Шкарубо С. И. Тектоника западной части шельфа моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 242. С. 1–18.
6. Керимов В. Ю., Щербина Ю. В., Иванов А. А. Условия формирования и эволюция нефтегазоматеринских толщ Лаптевоморской нефтегазоносной провинции // Геология и разведка месторождений углеводородов. 2020. Т. 63. № 3.
7. Кирилова-Покровская Т. А. Разработка актуализированной геологической модели моря Лаптевых и сопредельных глубоководных зон для уточненной оценки его углеводородного потенциала // Разведка и охрана Недр. 2017. № 10. С. 30–38.
8. Кремлёв А. Н., Соловьёв В. А., Гинсбург Г. Д. Отражающий сейсмический горизонт в основании субмаринной зоны стабильности газовых гидратов // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 11. С. 1747–1759.
9. Матвеева Т. В. Образование гидратов углеводородных газов в субаквальных обстановках. Москва. Научный мир, 2018.
10. Поселов В. А. Жолондз С. М., Трухалев А. И., Косыко М. К., Поселова Л. Г., Буценко В. В., Павленкин А. Д., Верба В. В., Ким Б. И. Карта мощности осадочного чехла Северного Ледовитого океана // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. 2012. Т. 351. № 268.
11. Троцюк В. Я. Прогноз нефтегазоносности акваторий. Москва, 1982. 201 с.

12. Фомина Е. А. и др. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности притаймырской континентальной окраины моря Лаптевых // Разведка и охрана недр. 2017. № 10. С. 55–61.

13. Шеин В. С. и др. Плитотектоническое и нефтегазогеологическое районирование Западной Арктики и сопредельных регионов // Геология нефти и газа. 2017. Т. 2.

Англоязычная литература

1. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. Permafrost, Gas hydrates and gas seeps in the central part of the Laptev Sea // Dokl. Earth Sci. 2021. Т. 500. № 1. С. 766–771.

2. Kim B. I., Glezer Z. I. Sedimentary cover of the Lomonosov Ridge: stratigraphy, structure, deposition history, and ages of seismic facies units // Stratigraphy and Geological Correlation. 2007. Т. 15. № 4. С. 401–420.

3. Matveeva T. V., Soloviev V. A. Geologically controlled gas hydrates accumulation on the Blake Outer Ridge, western north atlantic (from DSDP and ODP data) // Russ. Geol. Geophys. 2002. Т. 43. № 7. С. 662–671.

4. Petrov, O. V., Morozov, A., Shokalsky, S., Kashubin, S., Pospelov, I., Grikurov, G., Sobolev, N., Petrov, E. International Tectonic map of the Arctic (TeMAr) // AGU Fall Meeting Abstracts. – 2013. – Т. 2013. – С. T13B-2535.

5. Prakash A., Samanta B. G., Singh N. P. Evidence of gas hydrate accumulation and its resource estimation in Andaman deep water basin from seismic and well log data // Mar. Geophys. Res. 2012. Т. 34. № 1. С. 1–16.

6. Tinivella U., Lodolo E. The Blake Ridge bottom-simulating reflector transect: Tomographic velocity field and theoretical model to estimate methane hydrate quantities // Proc. Ocean Drill. Progr. Sci. Results. 2000. Т. 164. С. 273–281.

Фондовая литература

1. Алексеева А. К. и др. Годовой отчет о результатах работ за 2017 год по Управлению геологии нефти и газа, подземных вод и сооружений по разделу: «Научно-техническое обеспечение геологоразведочных работ на углеводородное сырье на континентальном шельфе РФ, в Арктике и Мировом океане». // ФГБУ «ВНИИОкеангеология». Санкт-Петербург, 2017. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

2. Васильева Е. А. и др. Комплексные региональные геофизические исследования в зоне сочленения Лаптевской окраинно-материковой плиты со структурами Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО). Государственный контракт №15/18/520-2 ОТ 31.07.2017 г. // АО «РОСГЕО». Москва, 2019. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

3. Винокуров И.Ю. и др. Проведение дополнительных комплексных геолого-геофизических исследований в центральной части Арктического бассейна с целью обоснования природы Центрально-арктических поднятий, примыкающих к ним впадин и определения положения внешней границы континентального шельфа Российской Федерации // Государственный контракт № 15/08/20-14 от 08 ноября 2012 года // ОАО «СЕВМОРГЕО». Санкт-Петербург, 2013. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

4. Матвеева Т.В. и др. Методические рекомендации по проведению геологоразведочных работ на газовые гидраты в акваториях морей России. // ФГБУ «ВНИИОкеангеология». Санкт-Петербург: 2018. 172 с. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

5. Матвеева Т.В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных за 2021 год в рамках Государственного задания Федерального агентства по недропользованию Федерального агентства по недропользованию № 049-00015-21-00 от 15 января 2021 г. на 2021 год и плановый период 2022 и 2023 год. // ФГБУ «ВНИИОкеангеология». Санкт-Петербург, 2021. 274 с. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

6. Матвеева Т.В. и др. Отчет о проведении тематических и опытно-методических работ, связанных с геологическим изучением недр в рамках Государственного задания Федерального агентства по недропользованию №049-00018-20-03 от 13 октября 2020 г. на 2020 год и на плановый период 2021. // ФГБУ «ВНИИОкеангеология». Санкт-Петербург, 2020. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

7. Петрушина Е. П. и др. Комплексные региональные геофизические исследования в зоне сочленения Таймыро-Североземельской складчатой системы с Лаптевской окраинно-материковой плитой и прилегающего континентального склона СЛО. Государственный контракт № К.2018.004 от 29.06.2018 г. // АО «РОСГЕО». Москва, 2020. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

8. Фомина Е.А. и др. Региональные сейсмические исследования МОВ ОГТ 2D на Арктическом континентальном шельфе с целью изучения особенностей геологического

строения и перспектив нефтегазоносности. Отчет ОАО «МАГЭ» по объекту Гос. контракта № 37/03/82-20. // ОАО «МАГЭ». Мурманск, 2016. Фонды ФГБУ «ВНИИОкеангеология».