

УДК 551.24+552.578.1

“ПЛОСКИЕ ПЯТНА” В КАЙНОЗОЙСКИХ ОСАДКАХ КОТЛОВИНЫ НАНСЕНА (СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН): ИНДИКАТОРЫ ПРОЦЕССОВ СЕРПЕНТИНИЗАЦИИ, ГЕНЕРАЦИИ ГАЗА И ЕГО АККУМУЛЯЦИИ

© 2022 г. С. Ю. Соколов^a, *, W. H. Geissler^b, А. С. Абрамова^a,
Д. А. Рыжова^c, И. С. Пати́на^a

^aГеологический институт РАН,
Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^bAlfred Wegener Institute Helmholtz Zentrum für Polar und Meeresforschung,
Am Alten Hafen, 26, Bremerhaven, 27568 Germany

^cГеологический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: sysokolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.04.2022 г.

После доработки 31.05.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Аномалии сейсмических данных типа “плоское пятно” в четвертичной части разреза осадков котловины Нансена интерпретируются как скопления газонасыщенных флюидов. “Плоские пятна” в основном расположены над поднятиями спредингового фундамента между магнитными аномалиями C20 (~43 млн лет) и C12 (~33 млн лет). Комплексный морфометрический анализ “плоских пятен” показывает, что области с процессами серпентинизации, выявленные при моделировании гравитационных аномалий, могут быть первоначальным источником газа. Этот процесс также обеспечивает сглаживание перепадов поднятий фундамента. Глубина верхней части “плоских пятен” под морским дном имеет практически постоянное значение ~390 м, что указывает на подъем газов с различных глубин фундамента к единому приповерхностному флюидоупору. Глубины аномалий под морским дном соответствуют теоретической толщине зоны стабильности газогидратов в исследуемом регионе. Гравитационное моделирование вдоль разреза Арктика-2011-03 показало положение блоков верхней мантии с более низкой (до 2.95 г/см³) плотностью в пределах поднятий акустического фундамента. Аномалии “плоских пятен” возникают над высотами фундамента, под которыми моделируются блоки с меньшей плотностью, типичные для серпентинизированных пород. Таким образом, серпентинизация ультраосновных пород верхней мантии считается основным геохимическим процессом, который может объяснить образование и накопление газа в океанической котловине при толщине осадочного чехла 1–3 км, а также небольшие вертикальные перемещения блоков фундамента из-за уменьшения плотности и расширения серпентинизированной породы.

Ключевые слова: метан, “плоские пятна”, ультрамедленный спрединг, серпентинизация, котловина Нансена, сейсмические данные, гравитационное моделирование.

DOI: 10.31857/S0024497X22060076, **EDN:** CVNVXK

Ультрамедленный спрединг наблюдается на сегментах глобальной системы срединно-океанических хребтов (СОХ), которые имеют геологическое строение, отличное от других частей этих хребтов [Астафурова и др., 2000; Edwards et al., 2001; Okino et al., 2002; Jokat et al., 2003; Michael et al., 2003; Dick et al., 2003; Klein, 2003; Snow, Edmonds, 2007; Curewitz et al., 2010]. Основными особенностями ультрамедленных хребтов являются общая низкая продуктивность магматизма, отсутствие стандартных элементов океанической коры (подушечные лавы, покровные дайки и т.д.)

и неровный рельеф океанического фундамента. Рифтогенез в амагматических условиях приводит к дислокациям перидотитов верхней мантии, которые в условиях низких температур обеспечивают контакт с водой, необходимый для процессов серпентинизации. Серпентинизация вызывает значительную потерю плотности охваченных ею пород, сопутствующие вертикальные тектонические движения и образование метана [Charlou et al., 1998; Bougault, 2012]. Большинство сегментов ультрамедленного хребта не покрыто значимым осадочным чехлом, который мог бы задер-

живать абиотически генерируемый метан [Petrov et al., 2016]. Океанический фундамент котловины Нансена как южной части Евразийского бассейна был сформирован на ультрамедленном спрединговом хребте Гаккеля. По данным магнитных аномалий, спрединг в котловине Нансена начался 56 млн лет назад [Никишин и др., 2020]. Осадочный чехол котловины Нансена имеет среднюю толщину ~3 км, достигающую 6 км в восточной части [Арктический ..., 2017] из-за значительного поступления осадков с Евразийского шельфа и моря Лаптевых. В восточной части котловины даже сам хребет Гаккеля полностью покрыт отложениями, вынесенными с шельфа моря Лаптевых [Баранов и др., 2019]. Мощный осадочный чехол в котловине Нансена обеспечивает условия для улавливания флюидов. Их реализация наблюдается на сейсмических разрезах в виде аномалий типа “плоское пятно” которые являются типичным индикатором скоплений углеводородов [Taper et al., 1979] для осадочных бассейнов с условиями термической зрелости, необходимой для их генерации. “Плоские пятна” в центральных частях котловины Нансена указывают на присутствие свободного газа в верхних частях осадочного разреза общей толщиной менее 2 км [Арктический ..., 2017] над океаническим фундаментом, аккреция которого происходила в условиях ультрамедленного спрединга. Аналогичные наблюдения скоплений свободного газа были сделаны на склонах других арктических ультрамедленных хребтов к западу от Шпицбергена, покрытых осадочным чехлом [Johnson et al., 2015; Waghorn et al., 2018].

Развитие сейсмических исследований в глубоководной части Арктики позволило разработать содержательную и последовательную тектоно-седиментационную модель, которая обобщает основные достижения по геологии и сейсмостратиграфии региона [Jokat, Micksch, 2004; Engen et al., 2008; Арктический ..., 2017; Никишин и др., 2020]. Аномалии типа “плоское пятно” флюидного генезиса (по косвенным данным) выделены нами в данных проекта Арктика-2011 [Арктический ..., 2017] в верхней части разреза котловины Нансена и отличаются от аномалий “яркое пятно”, связанных с магматизмом и наблюдаемых на шельфе Баренцева моря. Стратиграфически эти аномалии встречаются в середине разреза четвертичных отложений и не имеют связи с сильными литологическими отражающими границами. Флюид, скорее всего, формируется при метанообразующей серпентинизации пород верхней мантии, которые были изучены во многих глубоководных районах Мирового океана с общей толщиной осадочного чехла не более 3 км. Метан либо образует плюм в морской воде, либо накапливается в самых верхних частях осадочного чехла, создавая характерную запись в поле сейсмических волн

[Charlou et al., 1998; Bougault, 2012; Shakhova et al., 2017; Баранов и др., 2019].

Настоящая работа содержит результаты картирования и анализа пространственного распределения сейсмических аномалий “плоское пятно” в сочетании с данными геофизических полей; двухмерного гравитационного моделирования структур коры и верхней мантии с серпентинизированными блоками и сравнения морфометрических характеристик “плоских пятен” с геофизическими полями. Приведенный сравнительный анализ параметров, таких как ширина “плоского пятна”, амплитуда поднятий фундамента и мощность осадочного слоя над и под сейсмической аномалией, в сочетании с данными геофизических полей показывает причинно-следственные связи между ними и обеспечивает понимание генезиса этих аномалий и их роли в тектоно-седиментационных процессах. Наше исследование направлено на то, чтобы лучше понять происхождение и геодинамическую обстановку в районе проявлений “плоских пятен”.

РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ФЛЮИДОВ

Региональная сейсмостратиграфия

Поскольку покрытые льдом акватории Арктических бассейнов труднодоступны, слабо изучены, представления об эволюции верхней мантии, кристаллической коры и осадочного чехла развиваются медленнее, чем для незамерзающих океанических бассейнов. Тем не менее, имеющиеся сейсмические данные для котловины Нансена (рис. 1) в целом характеризуют его геологическую структуру и стратиграфию [Jokat et al., 1995; Weigelt, Jokat, 2001; Geissler, Jokat, 2004; Jokat, Micksch, 2004; Engen et al., 2009; Moore, Pitman, 2011; Hegewald, Jokat, 2013; Арктический ..., 2017; Nikishin et al., 2017; Castro et al., 2018; Lutz et al., 2018]. Различные многоканальные сейсмические данные метода отраженных волн и данные метода преломленных волн являются основой для проведенного детального изучения региона [Соколов и др., 2019].

Сводное сейсмостратиграфическое расчленение осадочного чехла Норвежского и Российского секторов котловины Нансена показано на рис. 2 по данным [Engen et al., 2009] и [Арктический ..., 2017; Nikishin et al., 2017] соответственно. Сравнение возрастов горизонтов выполнено по данным в Норвежском и Российском секторах котловины Нансена, без прямой привязки к хроностратиграфическим реперам, подтвержденным бурением. Авторы работы [Engen et al., 2009] изучили западную часть котловины Нансена и ее обрамление, используя данные [Jackson et al., 1984; Baturin et al., 1994; Riis, 1994; Jokat et al., 1995; So-

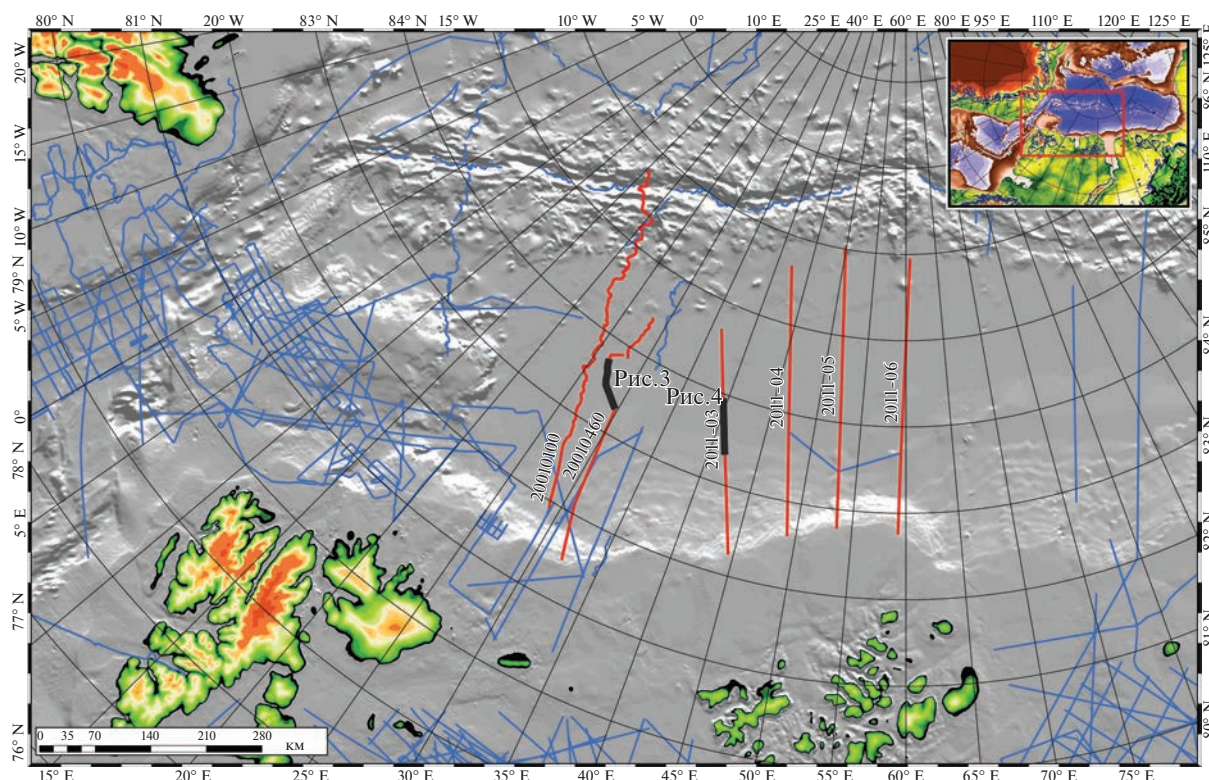


Рис. 1. Изученность сейсморазведкой Западной Арктики и котловины Нансена по состоянию 2014 г., по данным Института полярных и морских исследований им. А. Вегенера (Бремсхавен, Германия) и ВНИИОкеангеология (Санкт-Петербург, Россия). Красными линиями показаны разрезы, использованные в данной работе; толстыми черными линиями показано положение фрагментов, показанных на рис. 3 и 4.

rokin et al., 1998; Weigelt, Jokat, 2001; Jokat et al., 2003; Geissler, Jokat, 2004; Jokat, Micksch, 2004], и обнаружили осадочном чехле четыре сейсмических комплекса с характерными интервальными скоростями от 1.8 до 2.4 км/с. В работе [Lutz et al., 2018] была изучена сейсмическая стратиграфия осадочного чехла и конфигурация фундамента юго-западной части Евразийского бассейна.

Несколько отражающих горизонтов выделены на обширных территориях на основе сводных сеймостратиграфических данных (см. рис. 2). Показанный на рис. 2 акустический фундамент [Engen et al., 2009] прослеживается от континентального шельфа и характеризуется дифракционными гиперболами от поднятий неровного рельефа океанического фундамента на сейсмических данных без процедуры миграции. На фундамент с неровной топографией налегает мощный слой недеформированных осадочных пород. Возрастные границы комплексов NB-1A, NB-1B и NB-2 различаются по данным разных авторов [Jokat, Micksch, 2004; Engen et al., 2009; Nikishin et al., 2017] (см. рис. 2). А.М. Никишин с соавторами [Nikishin et al., 2017] выделили четыре сейсмических комплекса, в целом типичных для Евразий-

ского бассейна: 1) ранний–средний эоцен (56–45.7 млн лет); 2) средний эоцен–ранний олигоцен (45.7–33.2 млн лет); 3) ранний олигоцен–ранний миоцен (33.2–19.7 млн лет) и 4) ранний миоцен до настоящего времени (19.7–0 млн лет). В работе [Engen et al., 2009] разрез верхнего миоцена–четвертичного периода был подразделен на дополнительные комплексы. Далее мы опишем самый молодой сейсмический комплекс NB-4 в соответствии с работой [Engen et al., 2009].

Сейсмический комплекс NB-4 представлен четвертичными отложениями (2.6–0 млн лет). Конформная граница между комплексами NB-3 и NB-4 повторяет общий стиль стратификации и прослеживается как непрерывный отражающий горизонт со средней амплитудой. Интервальные скорости сейсмического комплекса меняются от 1.6 до 2.0 км/с (в среднем 1.8 км/с), а его мощность составляет 0.4–0.6 км [Engen et al., 2009]. Подошва комплекса в одном из разрезов содержит отложения обломочного потока мощностью ~0.1 км с потерей когерентности отражения, типичной для хаотических обломочных отложений. Предполагается наличие аналогичных осадочных тел в других частях бассейна. Согласно сейсмиче-

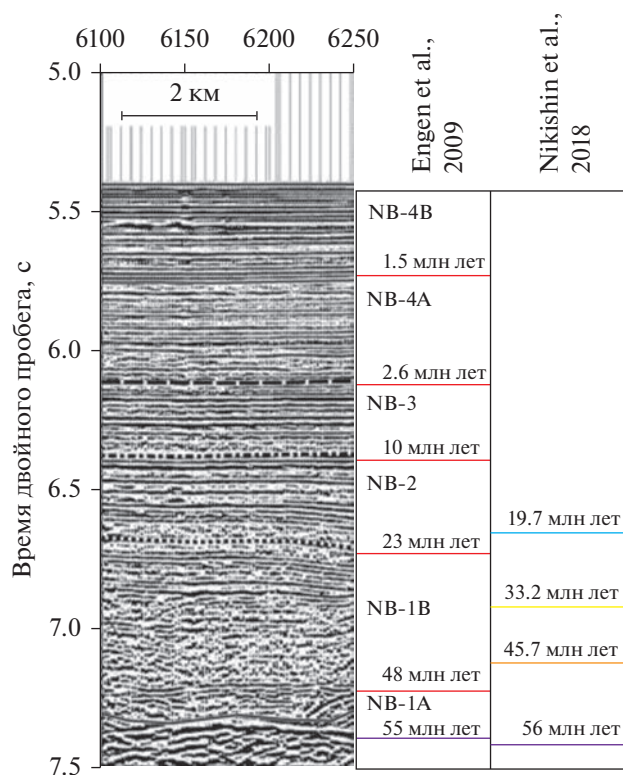


Рис. 2. Основные сейсмические комплексы в Норвежском ([Engen et al., 2009], с изменениями) и Российском ([Nikishin et al., 2017], с изменениями) секторах котловины Нансена.

ской записи, комплекс NB-4 подразделяется [Engen et al., 2009] на две части: нижнюю (NB-4A), содержащую слабые параллельные рефлекторы и локальное акустическое осветление записи с потерей когерентности отраженного сигнала, и верхнюю (NB-4B), содержащую высокоамплитудные параллельные рефлекторы, которые намного интенсивнее нижележащих. Они интерпретируются как два региональных субкомплекса, образовавшихся в результате эрозии континентальной окраины, покрытой ледниковым щитом в плейстоцене [Geissler, Jokat, 2004; Engen et al., 2009].

Происхождение флюидов

В ряде исследований океанических рифтов с обнажениями мантийных ультраосновных пород, не перекрытых осадочным чехлом, выявлено высокое (на несколько порядков превышающее фоновое) содержание CH_4 , растворенного в придонных водах, и доказано абиогенное происхождение углеводородов (CH_4) на основании изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ [Charlou et al., 1998; Дмитриев и др., 1999; Keir et al., 2005; Bougault, 2012]. Циркуляция морской воды через ультраосновные породы

верхней мантии вдоль системы глубинных разломов приводит к серпентинизации при температурах 100–450°C, с образованием серпентина и магнетита из оливина и выделением H_2 , который взаимодействует с растворенным в морской воде CO_2 , образуя CH_4 [Charlou et al., 1998; Дмитриев и др., 1999]. Вынос флюидных продуктов серпентинизации в слабо консолидированные водонасыщенные отложения создает скопления газа и формирует сейсмическую запись, типичную для насыщенной газом среды.

Океаническая кора, образовавшаяся при ультрамедленном спрединге, с маломощными базальтовыми и габброидными слоями и наличием осадочного чехла, способного удерживать флюиды, наиболее благоприятна для этого процесса. В условиях отсутствия осадков, CH_4 поступает непосредственно в толщу воды. Например, это было обнаружено вдоль восточного склона хребта Книповича [Cherkashev et al., 2001]. Предположение об образовании метана в серпентинизированных породах было сделано в работе [Rajan et al., 2012].

В дополнение к образованию флюидов [Дмитриев и др., 1999], серпентинизация сопровождается формированием нового магнитного слоя за счет кристаллизации магнетита и изменения характера первичных магнитных аномалий [Астафурова и др., 1996; Oufi et al., 2002], объемным расширением серпентинизированной породы и уменьшением ее плотности на 20% [Физические ..., 1984], а также усилением теплового потока за счет экзотермического эффекта [Delescluse, Chamot-Rooke, 2008]. Редкие измерения теплового потока в глубоководной полярной области [Хуторской и др., 2013] не позволяют оценить реальный вклад серпентинизационного нагрева в его величину. Уменьшение плотности, которое сопровождает серпентинизацию и увеличивает объем породы [Физические ..., 1984], объясняет положительные вертикальные движения блоков кристаллической коры, образование сети разломов в осадочном чехле и путей перемещения флюидов.

ВЫЯВЛЕННЫЕ “ПЛОСКИЕ ПЯТНА” И ИХ ПОЛОЖЕНИЕ В РАЗРЕЗАХ

Выявление “плоских пятен” на сейсмических разрезах

Аномалии “плоское пятно” выявлены в котловине Нансена на сейсмических разрезах экспедиций AWI (рис. 3) и проекта “Арктика-2011” (рис. 4). Во всех случаях они представляют собой рефлектор с более высокой амплитудой и шириной в несколько километров в плоскости разреза над большими поднятиями акустического фундамента. В соответствии с вертикальным смещением положительных и отрицательных фаз рефлекто-

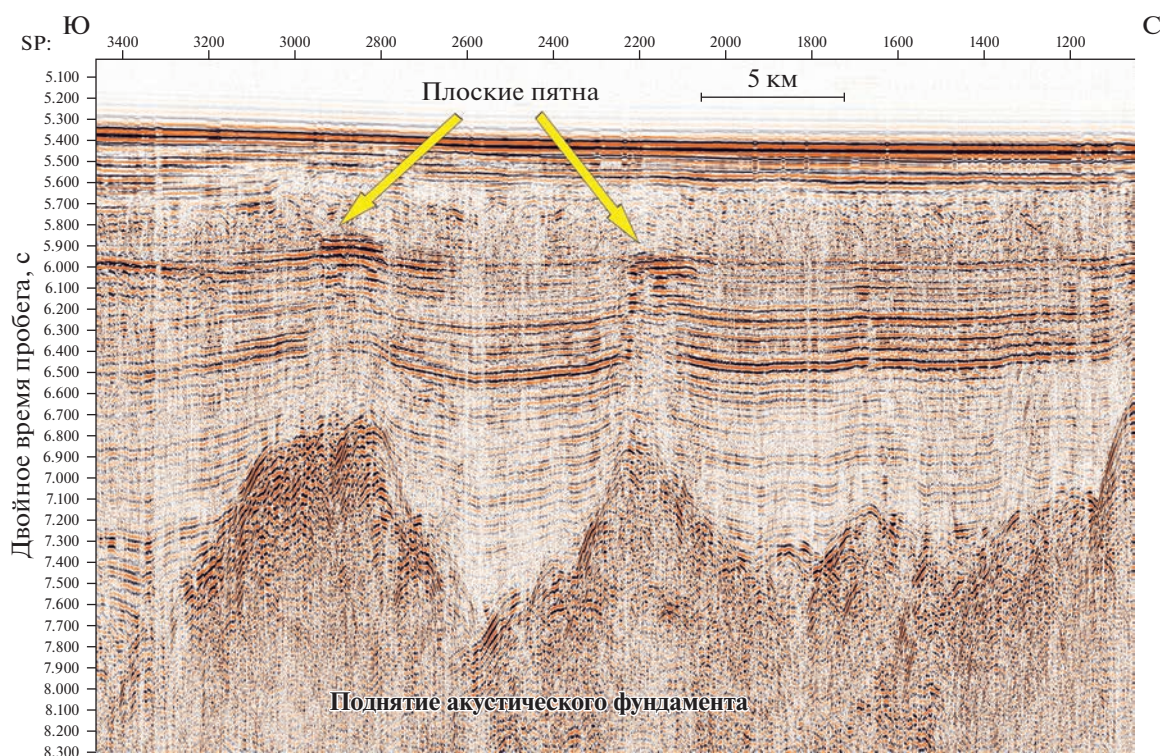


Рис. 3. Фрагмент разреза AWI 20010460 (положение показано на рис. 1) с аномалиями сейсмической записи типа “плоское пятно” над поднятиями акустического фундамента.

ров, над поднятиями фундамента наблюдаются признаки разломов со взбросовой кинематикой и локальное увеличение амплитуд сигнала в конфигурации рефлекторов верхней части разреза. В некоторых случаях разломы развиваются по всему осадочному чехлу, что указывает на современный возраст тектонического процесса. Имеются также признаки узких вертикальных зон акустического осветления и вариации амплитуд по горизонтали вдоль рефлекторов вблизи таких зон. Это указывает на возможный подъем флюида и его горизонтальное растекание.

В случае насыщенной жидкостью или газом породы (донного осадка), сейсмический сигнал приобретает инверсию полярности из-за отрицательного контраста ее акустического импеданса относительно вмещающих пород [Taner et al., 1979]. Сходные аномалии сейсмической записи могут иметь место, например, в связи с силами в осадочном разрезе, расположенном в северной части шельфа Баренцева моря [Старцева и др., 2017]. Но эти аномалии не параллельны общей стратификации слоев, имеют положительную полярность и высокую амплитуду отражений и должны быть отнесены к “ярким”, но не к “плоским” пятнам. Другое различие связано с неровными отражениями от магматических интрузий, которые имеют переменные углы наклона и часто

пересекаются с фазами сигнала, отраженного от осадочного чехла. На участке с подобными аномалиями было проведено бурение в районе Лудловской структуры в Баренцевом море [Бургутто и др., 2016], и породы определены как юрско-раннемеловые магматические интрузии [Карта дочетвертичных ..., 2004].

Полярность “плоских пятен” котловины Нансена (см. рис. 4) отличается от донного отражения из-за отрицательного перепада акустического импеданса, который является результатом накопления флюида в пористой породе (донном осадке) [Taner et al., 1979]. Таким образом, в случае отсутствия прямого отбора керна из скважины, это свойство сигнала является косвенным, но значимым свидетельством флюидного происхождения аномалии. Все “плоские пятна” в котловине Нансена ровные и горизонтальные, что указывает на флюидное происхождение аномалий, нижняя граница которых приобретает такую форму после миграции флюида вверх и накопления под непроницаемой ловушкой.

Положение “плоских пятен” в разрезах

Другая особенность “плоских пятен” в котловине Нансена связана с их стратиграфическим положением, как правило в средней части ком-

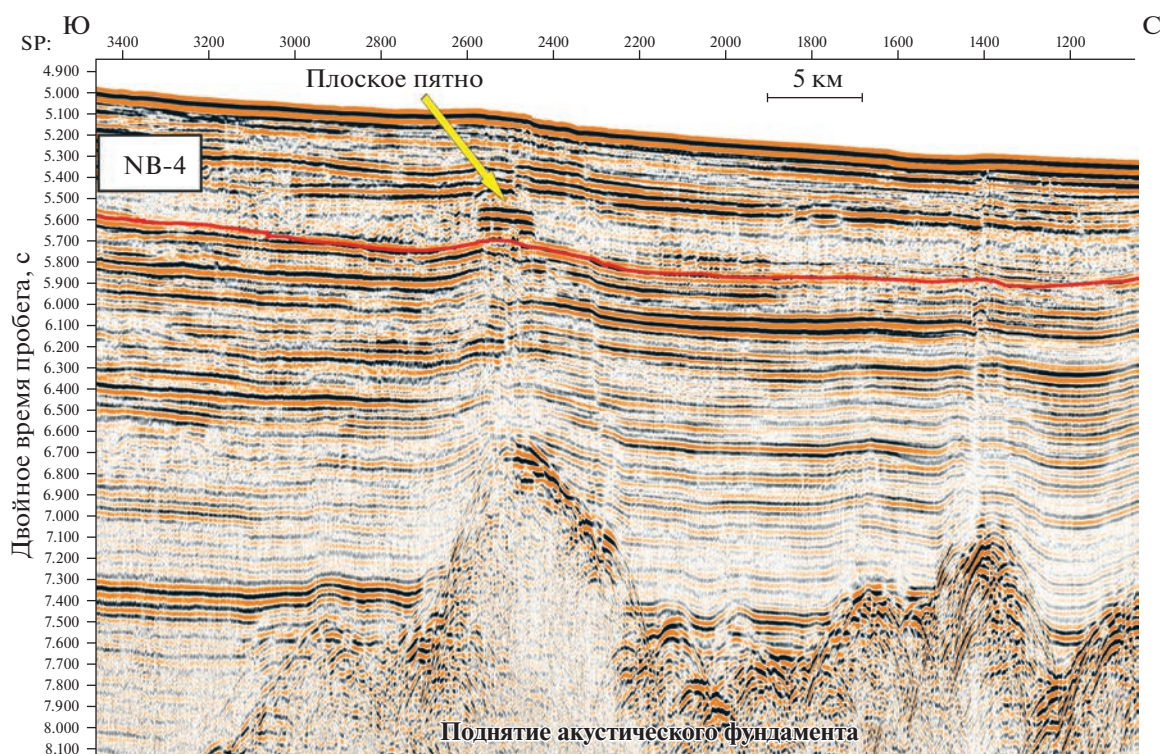


Рис. 4. Фрагмент разреза Арктика-2011-3 (положение показано на рис. 1) с аномалиями сейсмической записи типа “плоское пятно” над поднятиями акустического фундамента. Красной линией показана подошва сейсмического комплекса NB-4 (см. рис. 2), выделенная в результате интерпретации.

плекса NB-4, и не имеет привязки к рефлектору, который ограничивает тот или иной сейсмический комплекс (см. рис. 4). “Плоские пятна” связаны с горизонтальными скоплениями флюида под осадочными слоями с низкой проницаемостью [Backus, Chen, 1975], которая вызвана не только литологическими причинами, но и физическим состоянием насыщенной флюидом породы, например, такой как газовый гидрат [Judd, Hovland, 2007], нарушение целостности которой может привести к просачиванию флюида к морскому дну и его прорыву в водную толщу. На рис. 4 аномалия выделена в средней части сейсмического комплекса NB-4А, нижняя часть которого содержит отложения обломочного потока, формирующие акустически прозрачный некогерентный сигнал [Engen et al., 2009]. Отложения обломочного потока, скорее всего, возникли после падения уровня моря и увеличения сноса эродированного осадочного материала с шельфов и островов в котловину в начале плейстоцена [Engen et al., 2009]. “Плоские пятна” в котловине Нансена также имеют более высокие относительные амплитуды в отличие от акустических свойств окружающей породы, не содержащей флюида.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Картирование аномалий “плоское пятно”

Временные сейсмические разрезы AWI-20010100 и AWI-20010460 с расстоянием между суммарными трассами 25 м и разрезы Арктика-03, -04, -05 и -06 с расстоянием между суммарными трассами 6.25 м были проинтерпретированы с помощью программного обеспечения RadExPro версии 2018.4 путем выделения кровли аномалий “плоское пятно” как отдельного горизонта вне привязки к существующей сейсмостратиграфической схеме (см. рис. 2). В настоящей работе анализируются указанные объекты, расположенные в пределах верхних 500 мс под дном, и нет необходимости в использовании глубинных сейсмических разрезов для котловин с глубиной дна ~4000 м. Полученные в результате интерпретации разрезов положения кровли аномалий “плоское пятно” выносятся на карты с различной топонимией.

Морфометрические параметры “плоских пятен”

Были оцифрованы морфометрические характеристики “плоских пятен”, геометрия которых показана на рис. 5. Измерены следующие параметры аномалий: глубина морского дна (1), перепад высоты поднятия акустического фундамен-

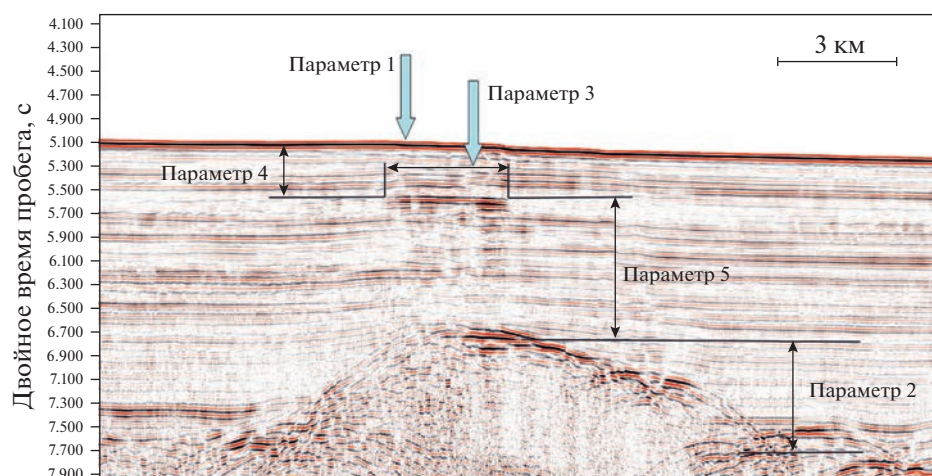


Рис. 5. Фрагмент разреза Арктика-2011-3 с аномалией записи “плоское пятно” над выступом акустического фундамента.

Параметры: 1 — глубина дна над аномалией (м); 2 — перепад высоты поднятия акустического фундамента над средним значением глубины фундамента в окрестности поднятия (мс); 3 — ширина пятна (м); 4 — мощность осадков над пятном (мс); 5 — мощность осадков между пятном и выступом фундамента (мс).

та (2), ширина аномалии в плоскости сечения (3) и толщина осадочного слоя над аномалией (4) и под ней (5). Мы также использовали общую интенсивность магнитных аномалий ΔT_a [Maus et al., 2009] и гравитационных аномалий Буге [Balmino et al., 2012] для сравнения с вышеперечисленными параметрами с целью их геодинамической и структурной интерпретации. Этот подход ранее применялся при изучении глубоководных районов экваториального сегмента Атлантического океана [Соколов, 2017], в которых наблюдаются деформации фундамента и осадочного чехла со значительным акустическим осветлением фрагментов сейсмических разрезов, которое связано с присутствием свободной газовой фазы в осадках. Сравнение морфометрических параметров деформаций со значениями геофизических полей позволило сделать выводы о влиянии земной коры и верхней мантии на структуру и деформации осадочного чехла. Аналогичный подход применяется здесь к аномалиям “плоских пятен” котловины Нансена, и это может дать ключ к пониманию их генезиса и места в последовательности проявления тектоно-седиментационных процессов.

Двухмерное гравитационное моделирование

Серпентинизация, сопровождающаяся уменьшением плотности пород верхней мантии, является причиной локальных изменений в стандартной модели плотности коры и верхней мантии, а также служит для проверки гипотезы о существовании этих изменений с помощью решения задачи прямого моделирования. Гравитационные аномалии в свободном воздухе вдоль фрагмента профиля Арктика-2011-03 были смоделированы в

программе TG-2D [Булычев, Зайцев, 2008] с помощью решений прямой и обратной задач гравиметрии с использованием интерактивного выбора гравитационных эффектов в зависимости от 2D структурно-плотностных блоков. Сечение аппроксимируется системой замкнутых прямоугольников с постоянной плотностью (г/см^3). Формирование 2D-модели требует глубины границ основных слоев и их плотности. Интерпретация разреза Арктика-2011-03 позволила получить значения глубины морского дна и акустического фундамента, которые были пересчитаны из временной области с сейсмическими скоростями 1500 и 2000 м/с для водной толщи и осадочного слоя соответственно. Аномалии силы тяжести в свободном воздухе вдоль линии сейсмического разреза были получены из модели WGM-2012 [Balmino et al., 2012].

Модель включает четыре основных слоя, гравитационный эффект от которых имеет разные амплитудные характеристики. Подошва первого (водного) слоя с плотностью 1.03 г/см^3 определяется с помощью батиметрии морского дна из ИВСАО версии 3 [Jakobsson et al., 2012]. Подошва второго (осадочного) слоя интерпретирована по сейсмическим данным, которые описывают сейсмические комплексы от современного возраста до раннего эоцена [Nikishin et al., 2017]. Для этого слоя мы предполагаем среднюю плотность 2.30 г/см^3 , которая характерна в основном для глинистых пород [Физические ..., 1984]. Это предположение подтверждается физическими свойствами керна, показывающего линейный тренд изменения плотности от 1.8 до 2.1 г/см^3 в верхних 400 керновой колонки по данным с сайта ODP 911 [Myhre

et al., 1995]. Средняя плотность осадочного чехла толщиной до 4.5 км в южной части разреза [Арктический ..., 2017] должна иметь более высокое значение. Оценка скорости сейсмических волн для кайнозойских осадочных пород по формуле Л. Фауста [Faust, 1951] и соотношения скорости и плотности по Г.Х.Ф. Гарднеру с соавторами [Gardner et al., 1974] позволяет получить значение 2.3 г/см^3 .

Исследование сейсмических данных, полученных методом отраженных волн, не выявляет сигнала от границы Мохоровича (Мохо), которая разделяет кору и верхнюю мантию. При отсутствии данных по преломленным сейсмическим волнам, обычной практикой является предположение о слое кристаллической коры с постоянной толщиной 6000 м [Kuo, Forsyth, 1988], которое использовалось для области Срединно-Атлантического хребта с полускоростями спрединга 2–4 см/год. В сегментах хребтов с медленным и ультрамедленным спредингом (полускорости $< 15 \text{ мм/год}$) и пониженной продуктивностью магматизма, это значение следует уменьшить. Обзор работ с использованием преломленных волн для модели земной коры в котловинах, прилегающих к таким хребтам [Ritzmann et al., 2002, 2004; Ljones et al., 2004; Czuba, 2007; Kandilarov et al., 2008, 2010; Hermann, Jokat, 2013; Schmidt-Aursch, Jokat, 2016] показывает правдоподобность предположения о слое кристаллической коры толщиной 4000 м ниже кровли акустического фундамента. Плотность 2.85 г/см^3 используется в модели третьего слоя с подошвой на границе Мохо. Породы верхней мантии с плотностью 3.3 г/см^3 моделируются ниже океанической коры. Отказ от постоянной толщины слоя коры для приближения модели к наблюдаемому полю, без прямых измерений глубины Мохо с помощью отраженных или преломленных волн, может привести к ошибочной конфигурации модели в тех местах, где наблюдаются эффекты, связанные с изменением плотности.

Приближение рассчитанного гравитационного поля к измеренному с помощью прямого моделирования не имеет единственного решения. Оно может быть получено с помощью различных вариантов распределения плотности. С нашей точки зрения, предпочтительным вариантом является тот, который, в первую очередь, содержит блоки с наибольшей вариацией плотности внутри слоев. Для серпентинизированной мантии плотность смещается от 3.3 до 2.95 г/см^3 . Следовательно, меньшие вариации плотности в других слоях могут не приниматься во внимание при моделировании. Другими словами, у нас нет информации о распределении небольших изменений плотности в коре, но у нас есть косвенные признаки проявления плотностных изменений в верхней мантии. Подход к приближению модели должен быть

выполнен в этом слое при постоянной плотности, зафиксированной в других слоях. Поиск схожести модели будет осуществляться путем изменения размера предполагаемых серпентинизированных блоков. Использование в расчетах моделирования изменений плотности с меньшими вариациями значений в земной коре является, по нашему мнению, менее оправданным подходом для решения задачи в котловине Нансена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И ИХ ПЕРВИЧНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Пространственное распределение “плоских пятен”

Положение аномалий “плоское пятно” вдоль сейсмических разрезов показано на карте (рис. 6) с мощностью осадочного чехла в качестве топографической основы [Petrov et al., 2016]. В пределах изученных разрезов мы выявили 22 “плоских пятна”, которые более или менее компактно сосредоточены в полосе между магнитными аномалиями C20 (~43 Ma) и C12 (~33 Ma) (см. рис. 6). Этот возрастной диапазон фундамента (охватывающий средний и поздний эоцен) указывает на целесообразность поиска признаков изменения тектонического режима как возможной причины формирования региональных структур фундамента в это время. В районах вблизи континентального склона, где толщина осадочного чехла составляет более 3 км, в сейсмических данных проекта Арктика-2011 “плоские пятна” не были обнаружены.

Морфометрические параметры плоских пятен

В изученных разрезах обнаружено 22 аномалии “плоское пятно”, что недостаточно для надежных статистических оценок морфометрических свойств, однако некоторые выводы сделать можно. При построении 2D кросс-корреляционных диаграмм (рис. 7), масштабирование размера символа (кружок) по значению третьего параметра дает дополнительную информацию. Меньшие значения гравитационных аномалий Буге около “плоских пятен” указывают на уменьшение плотности фундамента при более широких аномалиях сейсмической записи, показанных масштабированием символов (см. рис. 7а). Это указывает на больший объем накопленного газа из-за развития серпентинизации ультраосновных пород, что приводит к снижению их плотности. Более низкий перепад высот поднятий фундамента (разница между локальными максимумами и минимумами фундамента) при меньших значениях аномалий Буге (см. рис. 7а) может быть объяснен развитием объема переработки верхней мантии и увеличением площади, вовлеченной в серпентинизацию. Сравнение значений аномального магнитного поля ΔT_a с шириной “плоского

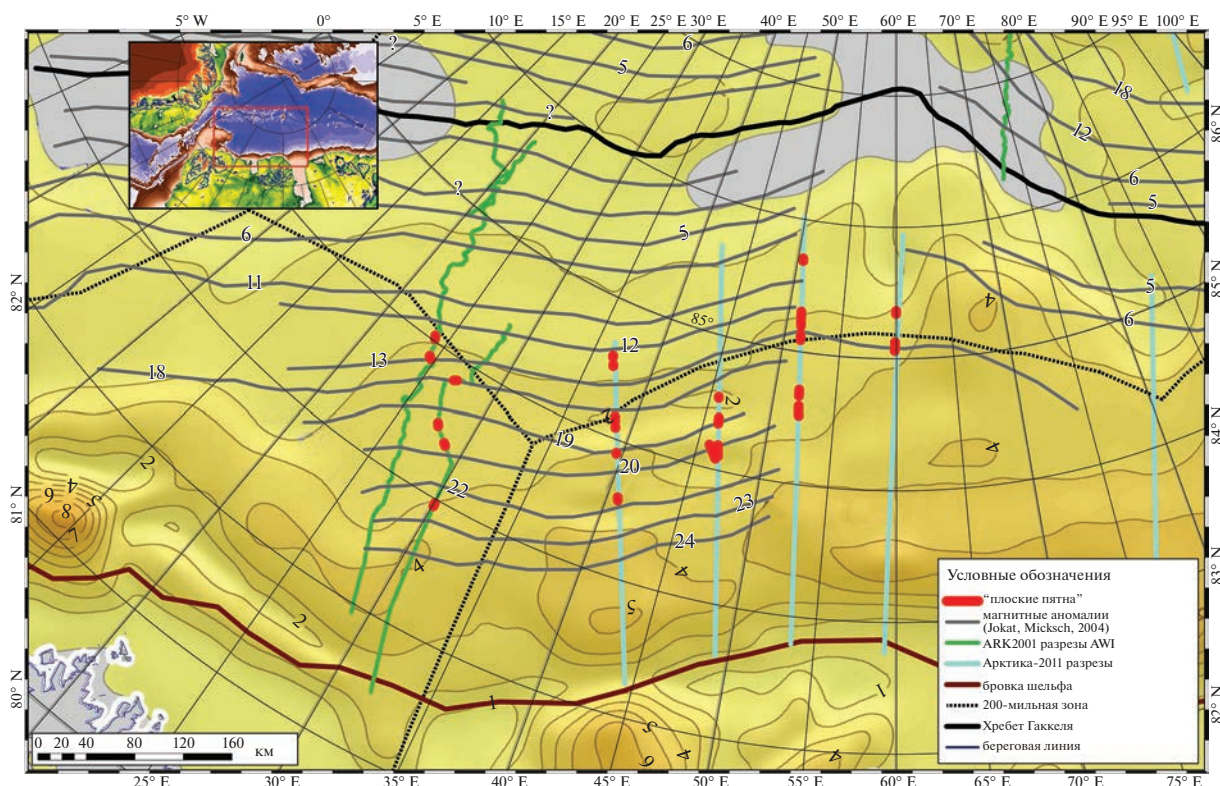


Рис. 6. Пространственное распределение аномалий “плоское пятно” в котловине Нансена и оси линейных магнитных аномалий, по [Jokat, Micksch, 2014]. Мощность осадочного чехла (км) использована в качестве топоосновы, по [Petrov et al., 2016].

пятна” (см. рис. 7б) показывает слабую тенденцию его роста и увеличение аномалий в положительном диапазоне значений (вероятно, имеющих возраст эпохи Брюнес и наложенных на первичную линейную структуру аномалий), поскольку газовыделяющая серпентинизация сопровождается образованием магнитных минералов [Астафурова и др., 1996]. На рис. 7б также показан переход отрицательных аномалий к положительным значениям с увеличением ширины “плоских пятен”. Масштабирование по амплитуде поднятий фундамента показывает, что образование широких “плоских пятен” приводит к меньшей разнице между неровностями нижежащего фундамента. В первую очередь это можно было бы интерпретировать как результат эволюции процесса серпентинизации.

Данные рис. 8 также показывают имеющие физический смысл корреляции морфометрических параметров. Чем меньше перепад высот поднятий фундамента, тем мощнее отложения между фундаментом и аномалиями “плоских пятен” и больше их ширина, показанная масштабированием символов на рис. 8а и масштабированием перепадом высот фундамента на рис. 8б. Ключевым моментом является то, что развитая серпентинизация приводит к большему выделению газа

и сглаженным перепадам фундамента, вероятно, из-за расширения области вокруг первичной протрузии около центра серпентинизации. Следует также отметить, что все аномалии “плоских пятен” в основном расположены в узком диапазоне значений аномалии Буге 380–390 мГал (рис. 9).

Параметр 4 – двойное время пробега до аномалии от морского дна или мощность осадков над аномалией – практически постоянен в пространстве около 22 обнаруженных аномалий и составляет 490 ± 100 мс при значительном изменении мощности осадков под “плоскими пятнами” (от 378 до 1562 мс). Полагая, что скорость сейсмических Р-волн в верхней части разреза составляет 1600 м/с, средние значения параметра 4 составят 390 м. Постоянная глубина аномалий может быть объяснена вертикальной миграцией свободного газа к основанию зоны стабильности газогидратов, где он формирует флюидоупор и накапливается в нем. Следуя данным авторов работы [Wallman et al., 2012], прогнозируемая толщина зоны стабильности слоя газогидрата в исследуемом районе составляет 370–400 м, что совпадает с наблюдаемой глубиной аномалий.

Масштабирование символов положений аномалий шириной “плоского пятна” (см. рис. 9) показывает, что этот параметр увеличивается к

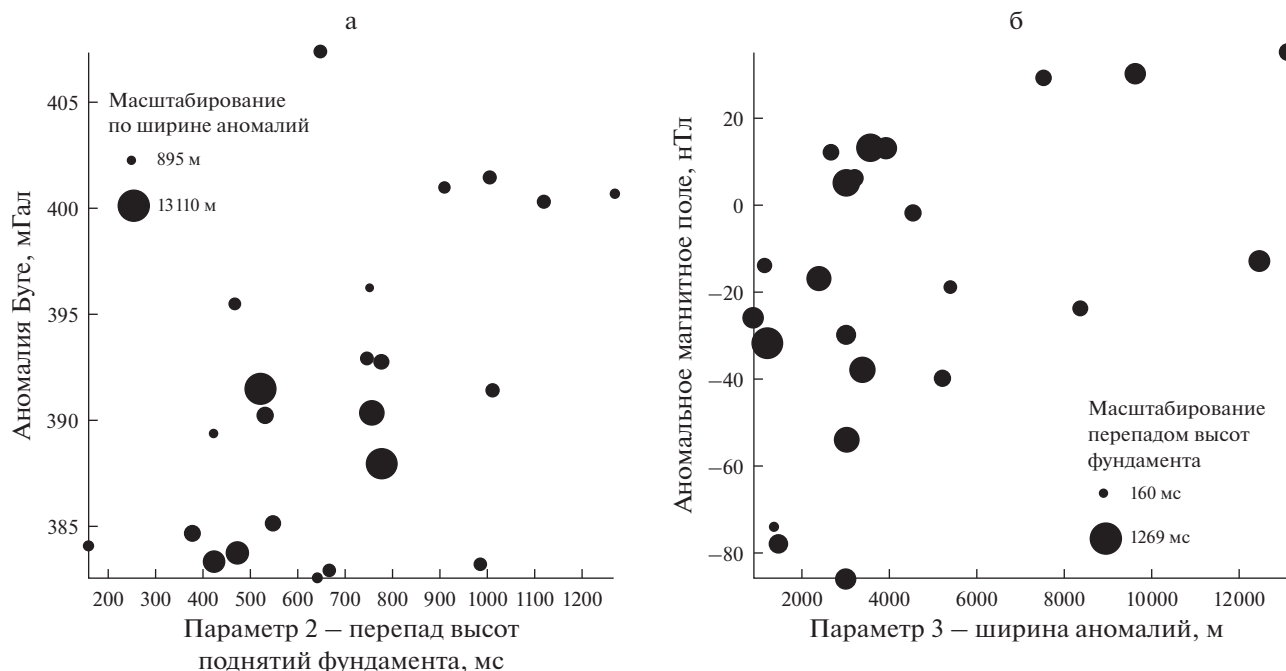


Рис. 7. Кросс-корреляция значений геофизических полей и морфометрических параметров аномалий “плоское пятно”. а — аномалии Буге, по [Balmino et al., 2012], и перепад высот поднятий фундамента; б — аномальное магнитное поле ΔT_a , по [Maus et al., 2009], и ширина плоских пятен. Здесь и на рис. 8 линейное масштабирование символов сделано по параметру 3 (для а — ширина аномалии) и параметру 2 (для б — перепад высот фундамента). Минимальные и максимальные размеры символов (черные кружки) имеют условные значения.

востоку в пределах котловины Нансена. Это может свидетельствовать о более интенсивном накоплении газа в восточных аномалиях, а также о большем количестве газа под пятнами в осадочной толще. Основываясь на имеющихся данных, трудно сделать вывод, что это является результатом увеличения области серпентинизированных ультраосновных пород.

Двухмерное гравитационное моделирование вдоль профиля Арктика-2011-03

Результаты моделирования показаны на рис. 10. Модельные расчеты четырех слоев с постоянной плотностью в верхней мантии 3.30 г/см^3 , исключая серпентинизированные блоки с плотностью 2.95 г/см^3 (см. рис. 10а), дают более высокое (на 8–12 мГал) расчетное поле относительно наблюдаемого поля в областях максимумов акустического фундамента (см. рис. 10а). Чтобы компенсировать различия, блоки с плотностью 2.95 г/см^3 , типичные для серпентинизированной мантии с пониженной плотностью [Физические ..., 1984], были включены в модель с использованием интерактивного подбора, что позволило достичь расхождения в $\sim 1 \text{ мГал}$ (или меньше) между результатом модели и наблюдаемым гравитационным полем. Три границы, которые были измере-

ны по сейсмическому разрезу и заданы для нижней части кристаллической коры с постоянной толщиной 4000 м, остаются неизменными: морское дно, акустический фундамент и Мохо. Топография Мохо может повлиять на моделирование, но данных прямых измерений ее глубины нет. Поэтому была задана постоянная толщина кристаллической коры. В результате включения в модель ниже Мохо блоков с плотностью 2.95 г/см^3 максимальная разница между наблюдаемым и расчетным полями составляет $\pm 0.8 \text{ мГал}$. Этот способ минимизации различий предпочтительнее моделирования изменений плотности коры, поскольку серпентинизация верхней мантии рассматривается как основной процесс, объясняющий более широкие аномалии “плоских пятен” над поднятиями фундамента, превышающими типичные перепады их высот, и связанные с более низкими значениями аномалий Буге (см. рис. 7а). Кроме того, наличие вертикальных смещений в осадочном чехле (см. рис. 4) подтверждает предположение о расширении объема в области серпентинизированных блоков.

Сравнение результатов моделирования вдоль разреза Арктика-2011-03 (см. рис. 10) с положением “плоских пятен” в осадочном чехле показывает, что они в основном сосредоточены над поднятиями акустического фундамента, прямое гравита-

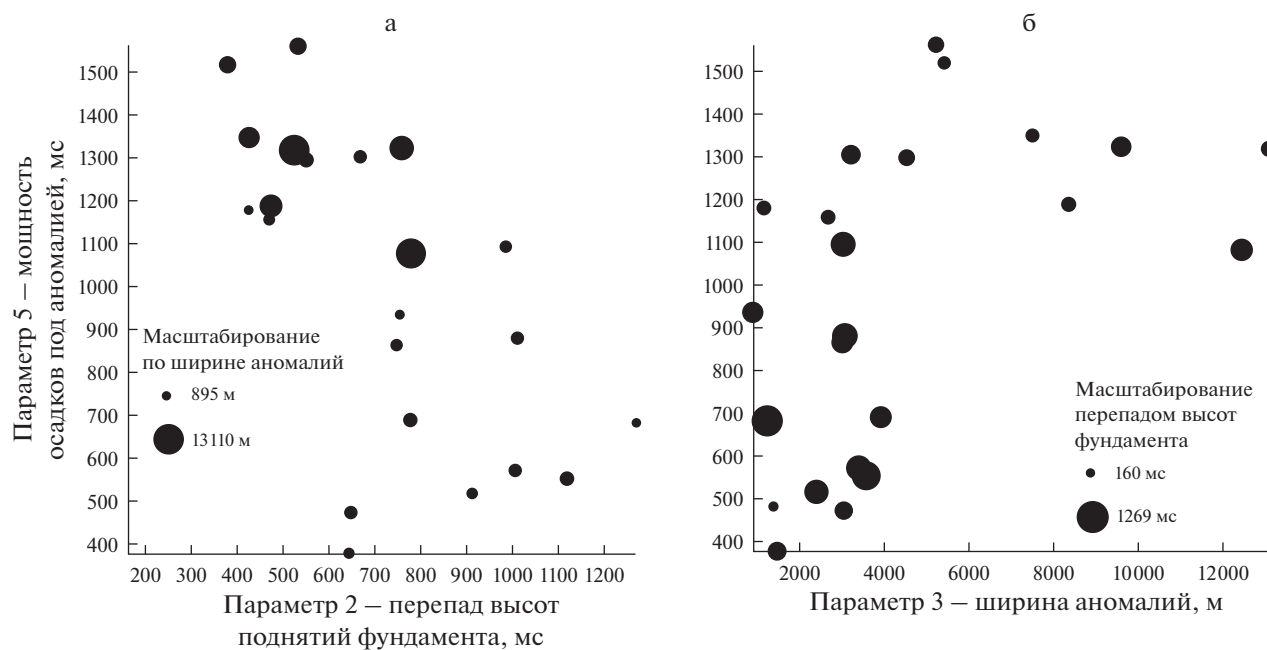


Рис. 8. Кросс-корреляция значений геофизических полей и морфометрических параметров аномалий “плоское пятно”. а — перепад высот поднятий фундамента и мощность осадочного чехла под аномалиями; б — ширина плоских пятен и мощность осадочного чехла под аномалиями.

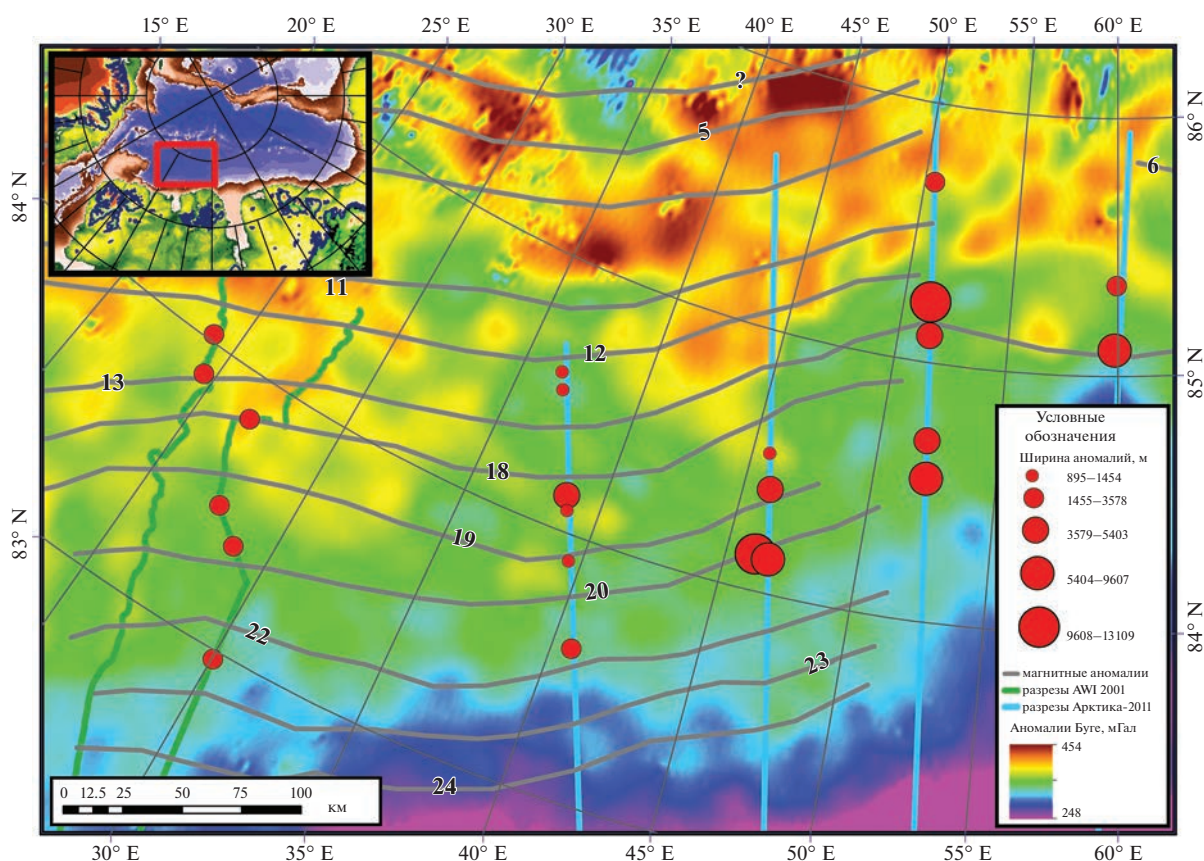


Рис. 9. Пространственное распределение аномалий “плоское пятно” с линейным масштабированием символов (красные кружки) по параметру 3 (ширина аномалии). Положение осей линейных магнитных аномалий показано по [Jokat, Micksch, 2004]. Аномалии Буге приведены по [Balmipo et al., 2012]. Условные минимальные и максимальные размеры символов не соответствуют реальным размерам параметра ширины в масштабе карты.

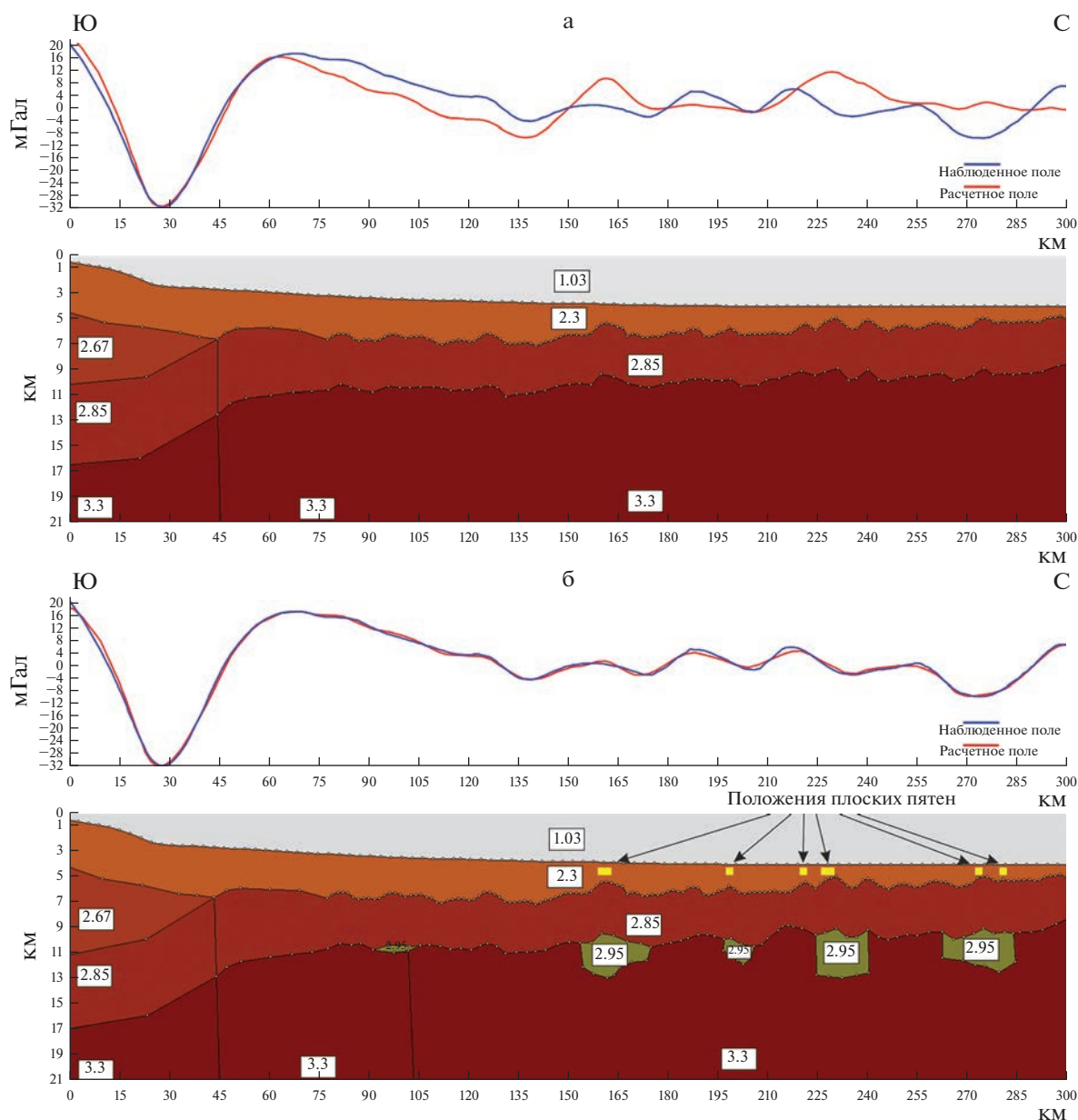


Рис. 10. Результаты двухмерного гравитационного моделирования вдоль сейсмического разреза Арктика-2011-03. а – графики наблюдаемой гравитационной аномалии в свободном воздухе [Balmino et al., 2012] и расчетного аномального поля от 4-х-слойной плотностной модели: водный слой, осадочный чехол от дна до акустического фундамента, выявленного по сейсмическим данным, слой кристаллической коры с постоянной мощностью 4000 м и верхняя мантия; б – та же конфигурация слоев с добавлением блоков верхней мантии с пониженной плотностью, обеспечивающих оптимальную сходимость между наблюдаемым и расчетным полем и положение плоских пятен, выявленных на сейсмических данных. Для каждого слоя и блока показаны значения плотности (г/см^3).

ционное воздействие от которого было рассчитано с учетом блоков верхней мантии с плотностью 2.95 г/см^3 . Сравнение результатов расчетного гравитационного поля с положением аномалий “плоское пятно” согласуется с предположениями об их происхождении в результате серпентинизации, даже при отсутствии подтверждения бурением флюидонасыщенного комплекса пород.

ДИСКУССИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Многоканальные сейсмические данные в сочетании с 2D-гравитационным моделированием и данными магнитных изохрон позволили смоделировать структуру и эволюцию фундамента котловины Нансена со значительной ролью серпентинизированного слоя верхней ман-

тии с плотностью 2.95 г/см^3 . Флюиды или свободный газ также могут мигрировать из глубоких осадочных слоев в локальных депрессиях к верхним частям поднятий фундамента. Глубинные осадочные комплексы могут содержать органический углерод, который является основой для образования метана, но в этом случае следует рассматривать типичные условия давления и температуры для образования углеводородов, чтобы объяснить появление газа, что является сомнительным для района исследований. В настоящее время о появлении типичных скоплений углеводородов в областях стандартной океанической коры на расстоянии $>150 \text{ км}$ от краев шельфа почти ничего не известно.

Аномалии “плоских пятен” на сейсмических разрезах, которые имеют флюидное происхождение и залегают ниже морского дна на глубине зоны стабильности газогидратов, могут быть объяснены серпентинизацией пород верхней мантии. Маловероятно, что неровная кровля литологически неоднородных обломочных отложений является горизонтальной границей, образующей ловушку для флюида и аномалию “плоского пятна”: это может быть физическая граница подошвы зоны стабильности газогидратов, которая может располагаться в части разреза без четкой слоистости и поперек нее. Процесс серпентинизации сопровождается образованием флюидов, потерей плотности и вертикальным смещением блоков земной коры, определяемым по сдвигам фаз рефлекторов в сейсмическом разрезе, и образованием разломов в осадочном чехле. Наличие этих мантийных зон подтверждается 2D-гравитационным моделированием (см. рис. 10б), результаты которого совпадают с пространственным распределением “плоских пятен” вдоль разреза. Эти данные в изученной области могут указывать на современную внутриплитную тектоническую активность, которая делает возможным разломообразование и доступ воды к верхней мантии. Согласно [Rajan et al., 2012], аналогичные результаты получены в результате формирования разломов срыва в мантии на восточном фланге хребта Книповича. Эти срывы могут быть объяснены реконфигурацией оси рифта при наличии сдвиговых компонент движений тектонических плит его обрамления [Соколов и др., 2017]. По данным работы [Kandilarov et al., 2010], низкие сейсмические скорости верхней мантии наблюдаются в связи с зонами серпентинизации, локальными поднятиями фундамента и аномалиями сейсмических разрезов, характерными для присутствия флюидов в осадочном чехле с общей мощностью до 2.5 с двойного времени пробега. Стоит отметить, что срывы выходят на поверхность кристаллической

коры в области фундамента с самым медленным спредингом (полускорости $\sim 5 \text{ мм/год}$) [Kandilarov et al., 2008]. Среднее расстояние между аномалиями C12 и C20 в котловине Нансена составляет $\sim 100 \text{ км}$ (см. рис. 6). Это означает, что средние полускорости спрединга составляли $\sim 10 \text{ мм/год}$ за период от 43 до 33 млн лет. Однако распределение индексированных магнитных аномалий в течение этого периода неравномерно, что указывает на возможные значительные отклонения от средних значений скоростей в котловине.

Согласно данным сейсмотомографии по Р-волнам [Яковлев и др., 2012], Арктический регион, хребет Гаккеля и котловина Нансена являются областями с неоднородной структурой мантии. В диапазоне глубин от 200 до 400 км наблюдаются отрицательные аномалии скорости, которые встречаются в районе нашего исследования. Далее к востоку от долготы $\sim 70^\circ$ в.д. отрицательные аномалии на этих глубинах сменяются положительными, обозначая, таким образом, смену в реологическом состоянии мантии по сравнению с менее глубокими слоями ($<200 \text{ км}$). Вероятно, что это контрастное состояние под кайнозойской литосферой котловины Нансена также существует и в земной коре из-за перехода от амагматического к магматическому режиму в восточном направлении вдоль хребта Гаккеля на долготах от $\sim 40^\circ$ до $\sim 65^\circ$ восточной долготы в соответствии с геохимией базальтов [Michael et al., 2003]. В районе $\sim 85^\circ$ в.д. это контрастное состояние выражается в обширном поле магматических пород, формирование которых сопровождалось кластером землетрясений 1999 г. [Schlindwein, 2012]. Эти данные подтверждают крайне неоднородную реологию мантии под упругой литосферой в исследуемой области от $\sim 40^\circ$ до $\sim 60^\circ$ в.д. (см. рис. 1), которая может влиять на внутриплитные тектонические процессы при ее движении над неоднородностями.

Согласно различным геофизическим данным, внутриплитные тектонические движения блоков фундамента создают последовательную причинно-следственную связь процессов, имеющих место внутри расслоенной литосферы с блоковым строением (рис. 11), и в результате приводящих к образованию “плоских пятен”: 1) контрастное горизонтальное и вертикальное реологическое состояние мантии; 2) переменная во времени и неоднородная динамика плит с горизонтальными и вертикальными перемещениями отдельных блоков охлажденной литосферы и усилением макротрещиноватости в виде тектонических срывов; 3) проникновение воды вдоль разломов, серпентинизация пород верхней мантии и возникновение зон снижения их плотности; 4) деформация

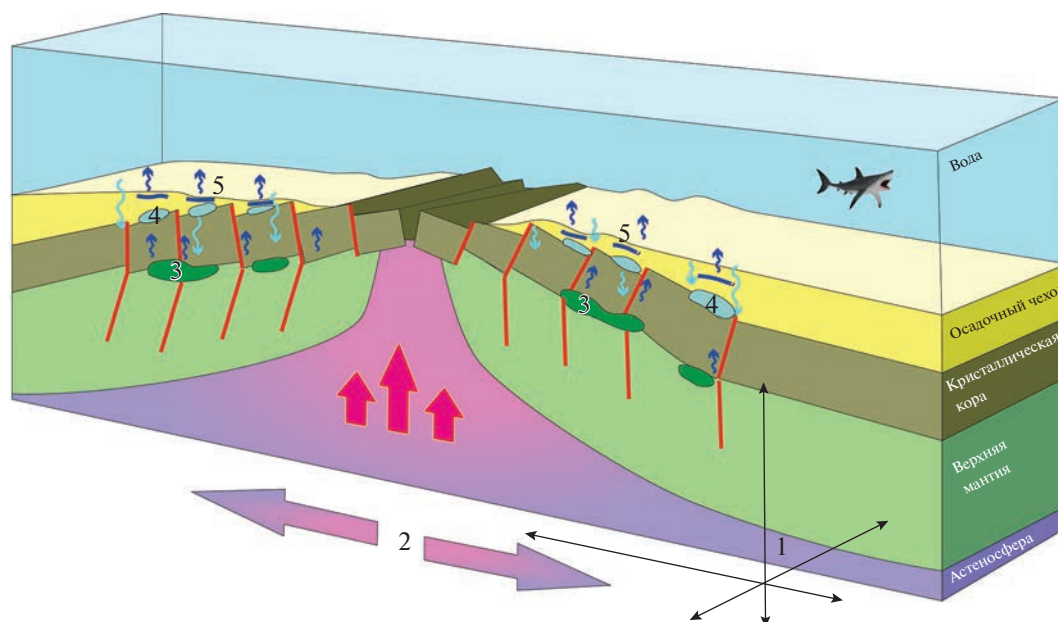


Рис. 11. Непротиворечивая причинно-следственная связь процессов, происходящих внутри расслоенной литосферы с блоковым строением.

1 — контрастное по вертикали и горизонтали реологическое состояние мантии; 2 — динамика плит с вертикальной и горизонтальной компонентами движения; 3 — проникновение воды по разломам, уменьшение плотности блока в верхней мантии при серпентинизации; 4 — вертикальный подъем блоков фундамента, деформации осадочного чехла и генерация флюидов; 5 — приповерхностное накопление флюидов, образование аномалий сейсмической записи и прорыв флюидов в водную толщу.

ции осадочного чехла, вызванные вертикальным подъемом блоков фундамента, и образование флюидов; 5) накопление флюидов в приповерхностном осадочном чехле, изредка проникающих в водную толщу, и формирование сейсмических аномалий типа “плоское пятно” [Соколов, 2017, 2018].

“Плоские пятна” были выявлены в области с узким возрастным диапазоном фундамента 43–33 млн лет. Возраст 33 млн лет соответствует началу отделения Гренландии от Шпицбергенской плиты [Engen et al., 2008]. Подобные аномалии не наблюдаются над более молодым фундаментом в пределах изученной котловины Нансена. Это показывает, что структура океанического фундамента до процессов раскола происходила в благоприятных условиях для образования серпентинизированных блоков в верхней мантии, что приводит к образованию газонасыщенной среды и отображается в виде “плоских пятен” в сейсмической записи. Это может указывать на изменение параметров тектонического режима после раскола.

ВЫВОДЫ

1. Сейсмические аномалии типа “плоское пятно”, наблюдаемые в котловине Нансена, имеют флюидное происхождение в соответствии со следующими сейсмическими признаками: отрица-

тельная полярность сейсмического сигнала, отличная от отражений морского дна; плавная горизонтальная ориентация аномалий и их положение внутри осадочного комплекса, не связанное с рефлексом, обусловленным сменой литологии. Это можно интерпретировать как подошву зоны стабильности газогидратов, улавливающей свободный газ. Глубина кровли аномалий под морским дном имеет практически постоянное значение 490 ± 100 м (~ 390 м) и расположена в средней части сейсмического комплекса NB-4. Это указывает на подъем газов из фундамента к общему приповерхностному флюидоупору с различных глубин акустического фундамента. Глубина аномалий под морским дном соответствует теоретической мощности зоны стабильности газогидратов в исследуемом регионе. Ширина аномалий с газовыми скоплениями увеличивается в восточном направлении.

2. Аномалии “плоское пятно” встречаются в основном в полосе между магнитными аномалиями спредингового фундамента C20 и C12. Никаких аномалий не наблюдается в верхней части осадочного чехла за пределами этой полосы, над более древним фундаментом, где мощность осадков превышает 3 км, а также над фундаментом моложе C12.

3. Серпентинизация ультраосновных пород верхней мантии представляет собой геохимический процесс, который может объяснить образование и накопление метана, наблюдаемые в сейсмических данных, использованных в настоящей работе, а также вертикальные перемещения блоков фундамента из-за уменьшения плотности и расширения серпентинизированной породы.

4. Сравнение морфометрических характеристик “плоских пятен” и аномалий Буге показывает, что эволюция процессов серпентинизации, выявленная на основе этого подхода, привела к увеличению накопления газа в более широких “плоских пятнах” и уменьшению амплитуд перепада высот поднятий фундамента. Это происходит, вероятно, из-за расширения области вокруг первичного центра серпентинизации с локальным уменьшением плотности верхней мантии, увеличением общей мощности отложений под широкими “плоскими пятнами” и их положением над преимущественно положительными магнитными аномалиями фундамента.

5. Результаты гравитационного моделирования совпадают с наблюдаемым полем, если слой кристаллической коры имеет постоянную толщину 4000 м и плотность 2.85 г/см³. В верхней мантии с нормальной плотностью 3.3 г/см³ ниже поднятий акустического фундамента присутствуют блоки с плотностью 2.95 г/см³.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимным рецензентам за их замечания, которые помогли улучшить последнюю версию рукописи. Авторы благодарят А.А. Булычева и А.Н. Зайцева (Московский государственный университет, кафедра геофизических методов исследования земной коры) за возможность 2D-гравитационного моделирования в программном обеспечении TG-2D.

Работа была выполнена в сотрудничестве Геологического института Российской академии наук (ГИН РАН) и Центра полярных и морских исследований Института Гельмгольца имени Альфреда Вегенера (AWI). Авторы хотели бы поблагодарить компанию Emerson E&P Software, Emerson Automation Solutions, предоставившую лицензию в рамках Академической программы Emerson. Мы также благодарны К.О. Добролюбовой за современное исполнение концептуального рисунка. Мы хотели бы поблагодарить Российский Федеральный геологический фонд (RFGF) (<https://rfgf.ru>) за доступ к сейсмическим данным в Северном Ледовитом океане для проведения исследований. Данные, использованные в этом исследовании, доступны в Фонде при наличии обоснованного запроса.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена при поддержке темы государственного задания Геологического института РАН FMUN-2019-0076. Первичная обработка сейсмических данных выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-05-70040.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арктический бассейн (геология и морфология) / Под ред. В.Д. Каминского, А.Л. Пискарева, В.А. Поселова. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. 291 с.

Астафурова Е.Г., Городницкий А.М., Лукьянов С.В., Мащенко С.П. Природа магнитных аномалий и строение океанической коры Срединно-Атлантического хребта и прилегающих котловин в пределах Канаро-Багамского геотраверса // Природа магнитных аномалий и строение океанической коры / Под ред. А.М. Городницкого. М.: Изд-во ВНИРО, 1996. С. 171–202.

Астафурова Е.Г., Гуревич Н.И., Даниэль Е.Д., Мащенко С.П. Сопоставление особенностей аккреции океанической коры при низкоскоростном и сверхнизкоскоростном спрединге // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 3. С. 295–301.

Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Дозорова Д.А., Цуканов Н.В. Система разломов, контролирующая метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // Докл. РАН. 2019. Т. 486. № 3. С. 354–358.

<https://doi.org/10.31857/0869-56524863354-358>

Булычев А.А., Зайцев А.Н. Программа для интерактивного двухмерного подбора плотностной среды по аномальному гравитационному полю // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611947. Выдано 18.04.2008.

Бургуто А.Г., Журавлев В.А., Заварзина Г.А., Зинченко А.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист S-(36), 37 – Баренцево море (зап., центр. части). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 144 с.

Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Силантьев С.А. и др. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 511–519.

<https://doi.org/10.2205/2000ES000030>

Карта дочетвертичных образований. Т-37-40 (Земля Франца-Иосифа, южные острова). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (новая серия). Лист 1 / Ред. Б.Г. Лопатин. СПб.: ВНИИМоргео, МАГЭ, ПМГРЭ, 2004.

Никишин А.М., Малышев Н.А., Петров Е.И. Основные проблемы строения и истории геологического развития Арктического океана // Вестник Российской Академии наук. 2020. Т. 90. № 5. С. 434–446. <https://doi.org/10.1134/S101933162003003X>

- Соколов С.Ю. Деформации осадочного чехла Экваториальной Атлантики и их сопоставление с геофизическими полями // Геотектоника. 2017. № 1. С. 81–96.
- Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. Амплитуды дизъюнктивных нарушений флангов хребта Книповича (Северная Атлантика) как индикатор современной геодинамики региона // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 769–789.
- Соколов С.Ю. Тектоника и геодинамика Экваториального сегмента Атлантики // Труды ГИН РАН. Вып. 618. М.: Научный мир, 2018. 269 с.
- Соколов С.Ю., Гейсслер В.Х., Абрамова А.С. Плоские пятна в котловине Нансена, связанные с ультрамедленным спредингом и серпентинизацией // Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. М.: ИО РАН, 2019. С. 190–194.
- Старцева К.Ф., Никишин А.М., Малышев Н.А. и др. Геологическая и геодинамическая реконструкция Восточно-Баренцевского мегабассейна на основе анализа регионального сейсмического профиля 4-AP // Геотектоника. 2017. № 4. С. 51–67.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.
- Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В. и др. Геотермия арктических морей // Тр. ГИН РАН. Вып. 605. М.: ГЕОС, 2013. 232 с.
- Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктическом регионе по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1261–1272.
- Backus M.M., Chen R.L. Flat spot exploration // Geophysical Prospecting. 1975. V. 23. Iss. 3. P. 533–577.
- Balmino G., Vales N., Bonvalot S., Briaies A. Spherical harmonic modeling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies // J. Geod. 2012. V. 86. P. 499–520.
- Baturin D., Fedukhina T., Savostin L., Yunov A. A geophysical survey of the Spitsbergen margin and surrounding areas // Mar. Geophys. Res. 1994. V. 16. P. 463–484.
- Bougault H. Hydrogène et Méthane hydrothermal: Enjeux scientifiques Une ressource potentielle nouvelle? // Mines et Carrières. Industrie Minérale. 2012. № 196. P. 73–80.
- Castro C.F., Knutz P.C., Hopper J.R., Funck T. Depositional evolution of the western Amundsen Basin, Arctic Ocean: Paleooceanographic and tectonic implications // Paleoceanogr. Paleoclimatol. 2018. V. 33(12). P. 1357–1382.
- Charlou J.L., Fouquet Y., Bougault H. et al. Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15°20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge // Geochim. Cosmochim. Acta. 1998. V. 62(13). P. 2323–2333.
- Cherkashev G.A., Gusev E.A., Zhirnov E.A. et al. The Knipovich Ridge Rift Zone: Evidence from the Knipovich-2000 Expedition // Dokl. Earth Science. 2001. V. 378. P. 420–423.
- Curewitz D., Okino K., Asada M. et al. Structural analysis of fault populations along the oblique, ultra-slow spreading Knipovich Ridge, North Atlantic Ocean, 74°30' N–77°50' N // J. Struct. Geol. 2010. V. 32. P. 727–740.
- Czuba W. 2.5-D seismic tomographic modelling of the crustal structure of north-western Spitsbergen based on deep seismic soundings // Mar. Geophys. Res. 2007. V. 28. P. 213–233.
- Delescluse M., Chamot-Rooke N. Serpentinization pulse in the actively deforming Central Indian Basin // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 276. P. 140–151.
- Dick H., Lin J., Schouten H. An ultraslow-spreading class of ocean ridge // Nature. 2003. V. 426. P. 407–412.
- Edwards M.H., Kurras G.J., Tolstoy M. et al. Evidence of Recent Volcanic Activity on the Ultra-Slow Spreading Gakkel Ridge // Nature. 2001. V. 409. P. 808–812.
- Engen Ø., Faleide J.I., Dyreng T.K. Opening of the Fram Strait gateway: A review of plate tectonic constraints // Tectonophysics. 2008. V. 450. P. 51–69.
- Engen Ø., Gjengedal J.A., Faleide J.I. et al. Seismic stratigraphy and sediment thickness of the Nansen Basin, Arctic Ocean // Geophys. J. Int. 2009. V. 176. P. 805–821.
- Faust L.Y. Seismic velocity as a function of depth and geologic time // Geophysics. 1951. V. 16. № 2. P. 192–206.
- Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics. 1974. V. 39. № 6. P. 770–780.
- Geissler W.H., Jokat W. A geophysical study of the northern Svalbard continental margin // Geophys. J. Int. 2004. V. 158. P. 50–66.
- Hegewald A., Jokat W. Relative sea level variations in the Chukchi region – Arctic Ocean – since the late Eocene // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 803–807. <https://doi.org/10.1002/GRL.50182>
- Hermann T., Jokat W. Crustal structures of the Boreas Basin and the Knipovich Ridge, North Atlantic // Geophys. J. Int. 2013. V. 193. P. 1399–1414. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt048>
- Jackson H.R., Johnson G.L., Sundvor E., Myhre A.M. The Yermak Plateau—formed at a triple junction // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 3223–3232.
- Judd A.G., Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 493 p.
- Johnson J.E., Mienert J., Plaza-Faverola A. et al. Abiotic methane from ultraslow-spreading ridges can charge Arctic gas hydrates // Geology. 2015. V. 43(5). P. 371–374.
- Jokat W., Micksch U. Sedimentary structure of the Nansen and Amundsen basins, Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L02603. <https://doi.org/10.1029/2003GL018352>
- Jokat W., Weigelt E., Kristoffersen Y. et al. New geophysical results from the south-western Eurasian Basin (Morris Jesup Rise, Gakkel Ridge, Yermak Plateau) and the Fram Strait // Geophys. J. Int. 1995. V. 123. P. 601–610.
- Jokat W., Ritzmann O., Schmidt-Aursch M.C. et al. Geophysical evidence for reduced melt production on the Arctic

- ultraslow Gakkel mid-ocean ridge // *Nature*. 2003. V. 423. P. 962–965.
- Jakobsson M., Mayer L., Coakley B. et al.* The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39(12). L12609. P. 1–6.
- Kandilarov A., Mjelde R., Okino K., Murai Y.* Crustal structure of the ultra-slow spreading Knipovich Ridge, North Atlantic, along a presumed amagmatic portion of oceanic crustal formation // *Mar. Geophys. Res.* 2008. V. 29. P. 109–134.
- Kandilarov A., Landa H., Mjelde R. et al.* Crustal structure of the ultra-slow spreading Knipovich Ridge, North Atlantic, along a presumed ridge segment center // *Mar. Geophys. Res.* 2010. V. 31. P. 173–195.
- Keir R.S., Greinert J., Rhein M. et al.* Methane and methane carbon isotope ratios in the Northeast Atlantic including the Mid-Atlantic Ridge (50° N) // *Deep-Sea Res. I*. 2005. V. 52. P. 1043–1070.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.12.006>
- Klein E.M.* Earth science: Spread thin in the Arctic, News and Views // *Nature*. 2003. V. 423. P. 932–933.
- Kuo B.Y., Forsyth D.W.* Gravity Anomalies of the Ridge-Transform System in the South Atlantic between 31° and 34.5° S: upwelling centers and variations in crustal thickness // *Mar. Geophys. Res.* 1988. V. 10. P. 205–232.
- Ljones F., Kuwano A., Mjelde R., Breivik A., Shimamura H.* Crustal transect from the North Atlantic Knipovich Ridge to the Svalbard Margin west of Hornsund // *Tectonophysics*. 2004. V. 378. P. 17–41.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.10.003>
- Lutz R., Franke D., Berglar K., Heyde I., Schreckenberger B., Klitzke P., Geissler W.H.* Evidence for mantle exhumation since the early evolution of the slowspreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // *J. Geodyn.* 2018. V. 118. P. 154–165.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al.* EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. G3. 2009. V. 10. № 8. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Michael P.J., Langmuir C.H., B. Dick H.J. et al.* Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean // *Nature*. 2003. V. 423. P. 956–961.
- Moore T.E., Pitman J.K.* Geology and petroleum potential of the Eurasia Basin // *Geol. Soc. Mem.* 2011. V. 35. P. 731–750.
- Myhre A.M., Thiede J., Firth J.V. et al.* Site 911. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports. 1995. V. 151. P. 271–318.
- Nikishin A.M., Gaina C., Petrov E.I. et al.* Eurasia Basin and Gakkel Ridge, Arctic Ocean: Crustal asymmetry, ultra-slow spreading and continental rifting revealed by new seismic data // *Tectonophysics*. 2017. V. 746. № 10. P. 64–82.
- Okino K., Curewitz D., Asada M. et al.* Preliminary analysis of the Knipovich Ridge segmentation: influence of focused magmatism and ridge obliquity on an ultraslow spreading system // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 202. P. 275–288.
- Oufi O., Cannat M., Horen H.* Magnetic properties of variably serpentinized abyssal peridotites // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107. № B5. 2095.
<https://doi.org/10.1029/2001JB000549>
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S., Artemieva I., Sobolev N., Petrov E., Ernst R., Sergeev S., Smelror M.* Crustal structure and tectonic model of the Arctic region // *Earth-Sci. Rev.* 2016. V. 154. P. 29–71.
- Rajan A., Mienert J., Bünz S., Chand S.* Potential serpentinization, degassing, and gas hydrate formation at a young (<20 Ma) sedimented ocean crust of the Arctic Ocean ridge system // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B03102.
<https://doi.org/10.1029/2011JB008537>
- Riis F.* North of Nordaustlandet. In: *Seismic Atlas of Western Svalbard: A Selection of Seismic Transects* // *Meddelelser / Ed. O. Eiken*. Oslo, Norway: Norsk Polarinstitutt, 1994. V. 130. P. 30–31.
- Ritzmann O., Jokat W., Mjelde R., Shimamura H.* Crustal structure between the Knipovich Ridge and the Van Mijenfjorden (Svalbard) // *Mar. Geophys. Res.* 2002. V. 23. P. 379–401.
- Ritzmann O., Jokat W., Czuba W. et al.* A deep seismic transect from Hovg^oard Ridge to northwestern Svalbard across the continental-ocean transition: A sheared margin study // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 157. P. 683–702.
- Schlundwein V.* Teleseismic earthquake swarms at ultraslow spreading ridges: indicator for dyke intrusions? // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 190. P. 442–456.
- Schmidt-Aursch M., Jokat W.* 3D gravity modelling reveals off-axis crustal thickness variations along the western Gakkel Ridge (Arctic Ocean) // *Tectonophysics*. 2016. V. 691. P. 85–97.
- Shakhova N., Semiletov I.P., Gustafsson O. et al.* Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nat. Commun.* 2017. 8:15872.
<https://doi.org/10.1038/ncomms15872>
- Snow J.E., Edmonds H.N.* Ultraslow-spreading ridges: Rapid paradigm changes // *Oceanography*. 2007. V. 20(1). P. 90–101.
- Sorokin M.Y., Zamansky Y.Y., Languinen A.Y. et al.* North Pole – 28 ice drift seismic line // *ICAM III Third International Conference on Arctic Margins*, Celle, Germany, 12–16 October 1998, Abstracts.
- Taner M.T., Koehler F., Sheriff R.E.* Complex seismic trace analysis // *Geophysics*. 1979. V. 44. № 6. P. 1041–1063.
- Waghorn K.A., Bünz S., Plaza-Faverola A., Johnson J.E.* 3D Seismic investigation of a gas hydrate and fluid flow system on an active mid-ocean ridge; Svyatogor Ridge, Fram Strait // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018. V. 19(8). P. 2325–2341.
- Wallmann K., Pinero E., Burwicz E. et al.* The global inventory of methane hydrate in marine sediments: a theoretical approach // *Energies*. 2012. V. 5. P. 2449–2498.
- Weigelt E., Jokat W.* Peculiarities of roughness and thickness of oceanic crust in the Eurasian Basin, Arctic Ocean // *Geophys. J. Int.* 2001. V. 145. P. 505–516.

Flat Spots Within Cenozoic Sediments of the Nansen Basin, Arctic Ocean: Indicators for Serpentinization, Gas Generation and Accumulation Processes

S. Yu. Sokolov^{1, *}, W. H. Geissler², A. S. Abramova¹, D. A. Ryzhova³, I. S. Patina¹

¹*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, 27568 Germany*

³*Department of Geology, Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: sysokolov@yandex.ru*

Flat spot anomalies in the Quaternary part of the section of the Nansen Basin are imaged in seismic records and are interpreted to be related to gas-rich fluid accumulations. The flat spots are mainly located above basement highs between magnetic spreading anomalies C20 (~43 Ma) and C12 (~33 Ma). The complex morphometric analysis of flat spots show that serpentinization processes identified from modelling of gravity anomalies could be original gas source. This process also makes smoothing of the basement highs amplitudes. The depth of the top of the flat spots below the seafloor has an almost constant value of ~390 m indicating the ascent of gases from variable basement depths to a common subsurface fluid trap. The depth of the anomalies below the seafloor corresponds to a theoretical thickness of gas hydrate stability zone in the studied region. Gravity modeling along the Arktika-2011-03 section showed the position of the upper mantle blocks with lower (to 2.95 g/cm³) density within the highs of the acoustic basement. The flat spot anomalies occur above basement highs, below which blocks with lower density typical of serpentinized rocks are modeled. Thus, the serpentinization of the upper mantle ultramafic rocks is considered a main geochemical process, which can explain generation and accumulation of gas in oceanic abyss at a 1–3 km thick sedimentary cover, as well as small vertical movements of the basement blocks due to density reduction and expansion of serpentinized rock.

Keywords: methane, flat spots, ultra-slow spreading, serpentinization, Nansen Basin, seismic data, gravity modeling.