

УДК 551.24+552.578.1

## ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕГАЗАЦИИ В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ОБРАМЛЕНИЯ ХРЕБТА КНИПОВИЧА (СЕВЕРНАЯ АТЛАНТИКА)

© 2022 г. С. Ю. Соколов<sup>a, \*</sup>, Г. Д. Агранов<sup>a, b</sup>, С. И. Шкарубо<sup>c</sup>,  
А. В. Зайончек<sup>a</sup>, А. С. Абрамова<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1,  
Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Музей землеведения Московского государственного университета  
имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>c</sup>АО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция”,  
ул. Софьи Перовской, 26, Мурманск, 183038 Россия

\*e-mail: [sysokolov@yandex.ru](mailto:sysokolov@yandex.ru)

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 18.02.2022 г.

Принята к публикации 29.04.2022 г.

В работе проанализированы аномалии сейсмических данных типа “яркое пятно” и “плоское пятно” на юго-восточном обрамлении хребта Книповича, связанные с аккумуляцией свободного газа в осадочном разрезе над океаническим фундаментом. Выделенные аномалии в пространстве ассоциированы с отрицательными значениями остаточных аномалий Буге и положительными аномалиями магнитного поля  $\Delta T_a$ . Это указывает на зоны разуплотнения коры и верхней мантии, которые могут иметь серпентинизационный генезис, с которым связана также наложенная хемогенная намагниченность, вероятно имеющая современный возраст и искажающая первичный линейный рисунок магнитных аномалий океанического фундамента района исследований. Серпентинизацией также объясняются вертикальные смещения блоков коры и верхней мантии на флангах хребта Книповича, приводящие к деформациям осадочного чехла при увеличении объема породы. Внеосевая сейсмичность указывает на тектонические срывы на флангах хребта, при которых увеличивается доступ воды, необходимой для серпентинизации с последующим изменением физических свойств пород, отраженных в геофизических полях. Восточный фланг хребта Книповича испытывает тектоническую активизацию вдоль структур фундамента, являющихся северным продолжением разлома Сенья. Следствием этих процессов являются обнаруженные скопления свободного газа в осадочном чехле.

**Ключевые слова:** хребет Книповича, скопления газа, серпентинизация, сейсмические аномалии “яркое пятно”, аномалии Буге, аномальное магнитное поле.

**DOI:** 10.31857/S0024497X2205007X

Сейсмические исследования осадочного чехла на флангах хребта Книповича (рис. 1) позволили изучить распределение его мощности на спрединговом фундаменте в мелкомасштабном [Straume et al., 2019] и крупномасштабном представлениях [Шкарубо, 1996; Ямпольский, Соколов, 2012], тектоническое строение [Шипилов и др., 2006; Пейве, Чамов, 2008; Amundsen et al., 2011; Зайончек и др., 2010; Kvarven et al., 2014] и выполнить сейсмостратиграфическое расчленение [Зайончек и др., 2010; Чамов и др., 2010; Amundsen et al., 2011; Kvarven et al., 2014]. Исследованию сейсмofациальных особенностей осадков и их различий на западном и восточном флангах не уделялось существенного внимания предыдущими исследователями. Тем не менее, объектами фациальных

исследований являлись проявления контуритов в связи с проблемой циркуляции придонных вод вдоль континентального склона к западу от Шпицбергена [Rebesco et al., 2013, 2014] и осадочной толщи хребта Вестнеса с проявлениями дегазации и псевдодонных рефлекторов [bottom simulated reflectors – BSR], являющихся подошвой газогидратного слоя [Plaza-Faverola, Keiding, 2019], а также поднятие Святогор [Johnson et al., 2015; Waghorn et al., 2018]. Дегазация на поверхности дна проявлена в виде воронок на дне – покмарков, остающихся после газовых выбросов, и зон пузырьковой разгрузки в водную толщу. В толще осадков скопления свободного газа проявляются на сейсмических разрезах в форме так называемых “ярких пятен”, которые возникают при рез-

ком увеличении амплитуды отраженных волн из-за увеличения контраста акустических свойств вмещающей среды и газонасыщенных слоев. Иногда свободный газ резко увеличивает рассеивание сигнала, что приводит к резкому затуханию отражений от нижележащей толщи. Если скопления газов под локальным или региональным флюидоупором, которым довольно часто является BSR, достаточно велики — то под флюидоупором скапливается достаточно мощный слой, превышающий разрешение используемой версии метода отраженных волн. В этом случае нижняя кромка газонасыщения приобретает плоскую форму, и отражение от нее называется плоским пятном при сохранении амплитудного контраста. В районе хребта Книповича кроме поднятия Святогор “яркие пятна” были выявлены на восточном фланге в районе  $76^{\circ}25'$  с.ш. [Rajan et al., 2012] на сейсмическом разрезе, вдоль которого были выполнены также работы методом преломленных волн. Значения полученных граничных скоростей в этой работе дают основание считать верхнюю мантию, расположенную под обнаруженным ярким пятном, областью развития серпентинизации, которая происходит в результате контакта мантийных пород с морской водой и, как следствие, образуется водород, и в дальнейшем метан. Сейсмические данные, использованные в настоящей статье, содержат проявления аномалий записи типа “яркое пятно” и “плоское пятно”. В данной работе проведено изучение этого явления путем картирования пространственного распределения ярких пятен, сопоставления их морфометрических характеристик с геофизическими полями, отражающими возникающий при серпентинизации метаморфизм пород верхней мантии. Эти задачи исследования сформулированы для определения возможной тектонической природы структур фундамента, над которыми в осадочном чехле возникают “яркие” и “плоские пятна”, и геодинамической обстановки, при которой они могли возникнуть, а также характера распределения скоплений газа по осадочным комплексам.

### СТРОЕНИЕ ФУНДАМЕНТА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ФЛЮИДОВ

Строение океанического фундамента хребта Книповича и его флангов приведено на тектонической схеме [Шкарубо, 1996]. Это единственная работа открытого доступа, в которой изогипсами показана структурная поверхность фундамента юго-восточной окраины хребта. Между “континентальной” областью Баренцевской шельфовой субплатформы на востоке и областью новообразованной спрединговой океанической коры на западе расположена переходная область “континент—океан”, в пределах которой континенталь-

ная кора подверглась процессам интенсивной деструкции. Особый интерес представляет трассирование зоны контакта деструктированной континентальной и новообразованной океанической коры, которая отражает начало спрединга океанического дна. В плане она представляет собой ступенчатую границу. Такой характер границы “спрединговой” коры, состоящей из сдвиговых и сбросовых сегментов, был ранее установлен в северной части прогиба Атка [Батурин, 1993]. На юге эта зона совпадает с региональным разломом Сенья: от  $74^{\circ}$  с.ш. до м. Сёркап она протягивается вдоль  $13^{\circ}$ – $14^{\circ}$  в.д., далее к северу ступенчато смещается на запад до разлома Моллой (рис. 2).

Направление формирования спредингового фундамента флангов хребта Книповича, согласно данным аномального магнитного поля  $\Delta T_a$  [Mosar et al., 2002; Соколов, 2011], наследовало тренд, заданный ориентацией сегментов первоначального раскола континентальной коры [Батурин, 1993], с последующей переориентацией на  $\sim 45^{\circ}$  при перескоке оси спрединга в современное положение с запада на восток. В соответствии с интерпретацией сейсмических данных и новейших результатов аэромагнитометрических исследований [Gernigon et al., 2020], первоначальное раскрытие участка Норвежско-Гренландского бассейна с будущим хребтом Книповича началось вдоль трансформных границ океан—континент по разломам Сенья и Хорнсунн по веерообразной схеме с центром вращения в юго-западной части хребта Мона в  $\sim 260$  км к северу от о. Ян-Майен. В настоящее время на север—северо-восточном продолжении разлома Сенья в фундаменте выделяются структуры, имеющие сходную с ним ориентацию, но несовпадающие с азимутами главных тектонических элементов современной спрединговой зоны — рифтовых сегментов и трансформных смещений. Сейсмическая активность восточного фланга хребта Книповича [Соколов и др., 2017] указывает на тектоническую активизацию этой части котловины по линии продолжения разлома Сенья (рис. 3). Развитие долгоживущих плоскостей смещений в условиях преобладающего растяжения создает идеальные условия для проникновения морской воды в верхнюю мантию, следствием которого является серпентинизация, протекающая с выделением водорода и метана.

Исследования 1970–1980 гг., проведенные в местах Мирового океана, где были установлены обнажения ультраосновных пород мантии, показали повышение концентрации  $\text{CH}_4$  над фоном на несколько порядков [Charlou et al., 1998; Dmitriev et al., 1999; Keir et al., 2005; Bougault, 2012]. При этом изотопный состав ( $\delta^{13}\text{C}$ ) однозначно указывал на abiогенное происхождение углево-

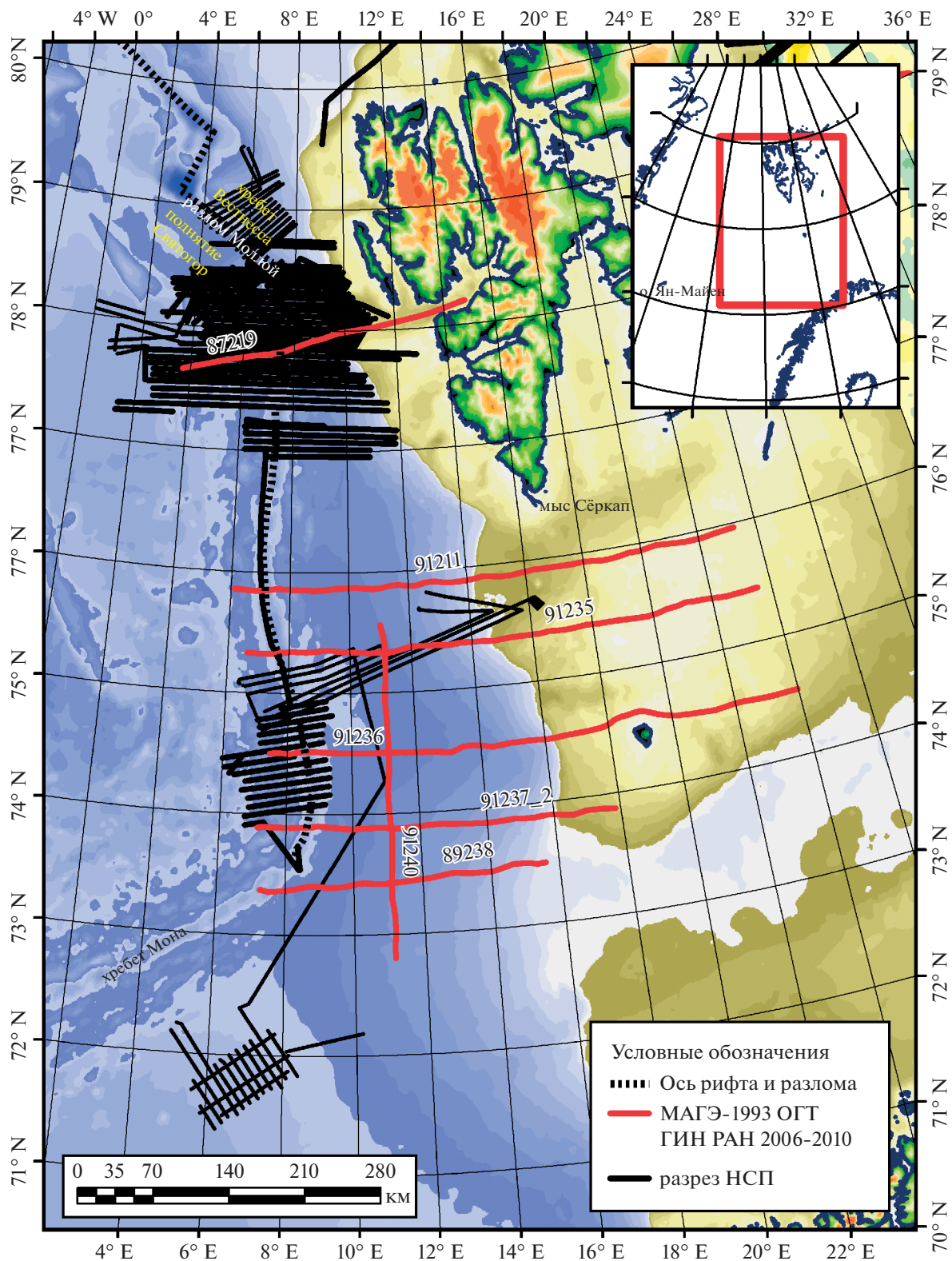
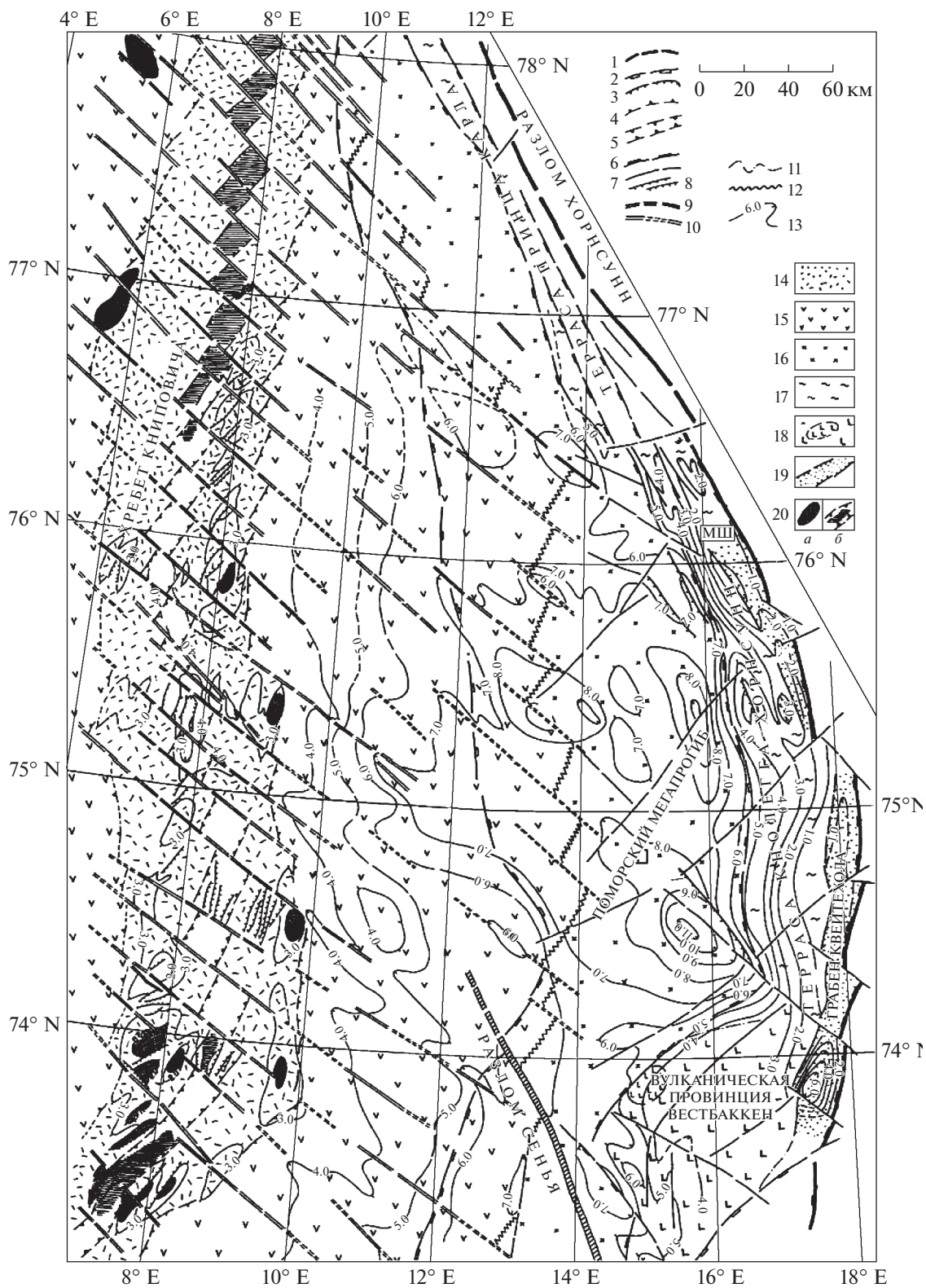
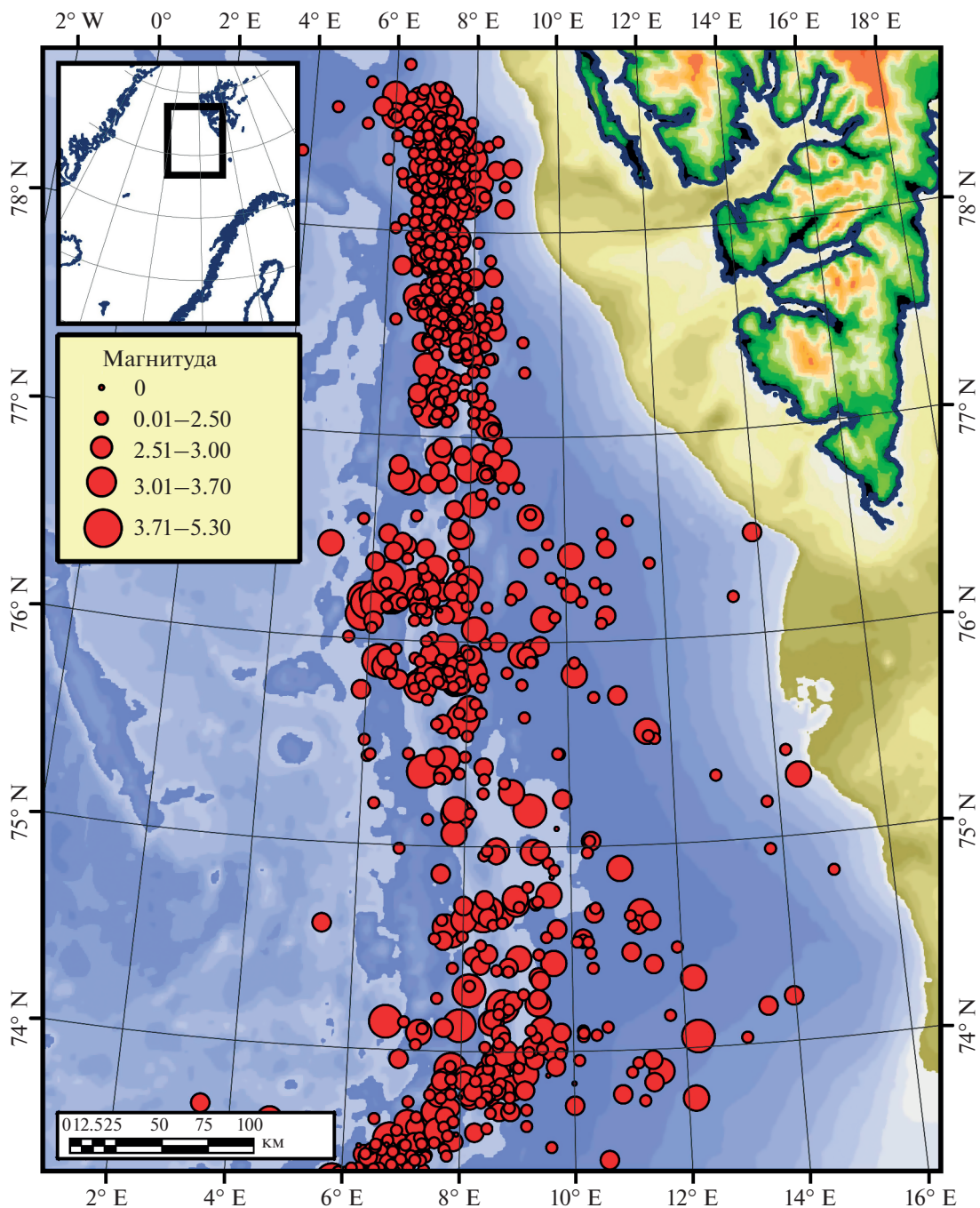


Рис. 1. Схема изученности сейсмическими данными МОВ ОГТ, многолучевым эхолотированием и НСП района хребта Книповича по данным МАГЭ (1993 г.) и ГИН РАН (24–27 рейсы НИС “Академик Николай Страхов”, 2006–2010 гг.).





**Рис. 2.** Тектоническая схема северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна, по [Шкарубо, 1996]. 1–5 – границы структур: 1 – Баренцевской субплатформы, 2 – Медвежинско-Шпицбергенской ступени и Поморского мегапрогиба, 3 – шельфовых грабенов, 4 – гребневой зоны хребта Книповича, 5 – осевого рифта; 6–10 – разрывные нарушения: 6 – пограничная разломная зона Кнолетга-Хорнсунн, 7 – крупные сбросы и сбросо-сдвиги, 8 – локальные сбросы, 9 – крупнейшие зоны трансформных разломов, 10 – трансформные разломы срединного хребта; 11 – граница распространения траппов провинции Вестбаккен; 12 – предполагаемая граница спрединговой океанической коры; 13 – изогипсы поверхности базальтового фундамента; 14–20 – структурно-вещественные комплексы и тектонические зоны переходной области и океанического бассейна: 14 – гребневая неотектоническая зона хребта Книповича с маломощным слоем дислоцированных неоген-четвертичных отложений, 15 – кайнозойские осадочные комплексы (недислоцированные) на океанической коре, 16 – кайнозойские осадочные комплексы на коре переходного типа, 17 – то же, на континентальном субстрате, 18 – зона распространения эоценовых вулканических покровов (провинция Вестбаккен), 19 – шельфовые грабены с палеоген-раннеогеновым выполнением, 20 – выходы базальтового фундамента на поверхность океанического дна: *a* – вулcano-тектонические гряды гребневой зоны; *b* – обнажения рифтовой долины.



**Рис. 3.** Эпицентры землетрясений по данным [NORSAR, 2012] в районе хребта Книповича.

дорода. Был установлен геохимический процесс, при котором происходит образование  $\text{CH}_4$ . Доступ воды к ультраосновным породам верхней мантии по системе трещин приводит в действие процесс серпентинизации при температурном диапазоне от  $\sim 100^\circ\text{C}$  до  $\sim 450^\circ\text{C}$  (но возможно и при более высоких температурах). При этом из оливина образуются серпентин и магнетит, и кроме того выделяется  $\text{H}_2$ , который взаимодействует с растворенным в воде  $\text{CO}_2$  и формирует  $\text{CH}_4$ . Попадая непосредственно в воду,  $\text{CH}_4$  образует аномальные концентрации в водной толще, но в случае осадочного покрова в местах выхода флюидов из кристаллической коры, они будут удерживаться в осадках и формировать характерные для газонасыщенных сред варианты сейсмической записи.

Наиболее благоприятной ситуацией для реализации этого процесса является океаническая кора, сформированная при медленном и ультрамедленном спрединге, с минимальным базальтовым и габброидным слоями, и наличие осадочного чехла, способного удержать флюид. Если осадков нет,  $\text{CH}_4$  попадает непосредственно в водную толщу, что было установлено вдоль восточного борта хребта Книповича [Cherkashev et al., 2001]. Реализация указанных условий была исследована на восточном фланге хребта Книповича [Rajan et al., 2012], где в верхней мантии были установлены области глубинных срывов с пониженными сейсмическими скоростями [Kandilarov et al., 2010], а в осадочном чехле мощностью до 2.5 с времени двойного пробега – характерные для присутствия флюидов аномалии сейсмической записи.

Кроме формирования флюидов [Dmitriev et al., 1999], процесс серпентинизации сопровождается формированием нового магнитоактивного слоя из-за образования магнетита, расширением объема породы, подверженной серпентинизации, с одновременным уменьшением ее плотности до 20% [Физические ..., 1984], а также увеличением теплового потока в разы за счет экзотермического эффекта этого процесса [Delescluse, Chamot-Rooke, 2008]. Формирование хомогенного магнетита, несомненно, накладывает на первичную линейную картину магнитных аномалий дополнительную компоненту, создающую мозаичный рисунок аномального магнитного поля в районе исследований [Olesen et al., 1997], провести в котором разделение первичной и наложенной компонент поля очень сложно. Разуплотнение, вызванное серпентинизацией и приводящее к увеличению объема породы, вполне способно объяснить положительные вертикальные движения блоков кристаллической части коры, формирование раз-

ломной сети и деформаций в осадочном чехле, а также путей миграции флюидов вверх по разрезу.

Сейсмостратиграфическое расчленение осадочного чехла на восточном фланге хребта Книповича имеет особенность, связанную с мощными конусами выноса четвертичного времени. По данным [Amundsen et al., 2011], чехол состоит из гляциального и догляциального комплексов. Догляциальный комплекс ограничен в подошве акустическим фундаментом, являющимся спрединговым магматическим слоем океанической коры. Возраст этих осадков, налегающих на фундамент, изменяется от эоценового на востоке до плиоценового на западе. Гляциальный комплекс представлен 3 подкомплексами, которые имеют четвертичный возраст, разделены 7 опорными рефлекторами и прослеживаются от бровки шельфа до борта рифтовой долины хребта Книповича. Разрез, приведенный в работе [Amundsen et al., 2011], имеет мощность гляциального комплекса до 1 км. Общая мощность осадков к востоку от хребта на океаническом субстрате может достигать  $\sim 6000$  м [Straume et al., 2019] при среднем значении  $\sim 3500$  м. Скопления газа, формирующие “яркие” и “плоские пятна”, встречаются в обоих осадочных комплексах.

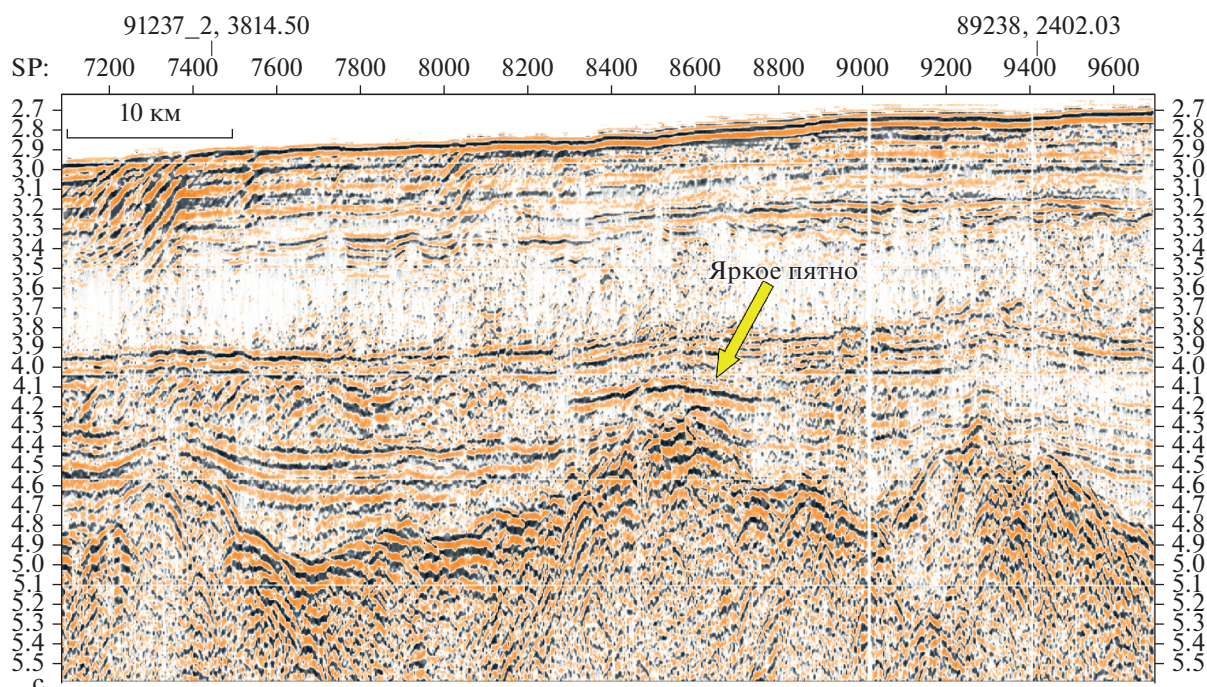
## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе использованы фондовые материалы Российского Геологического Фонда и цифровые данные сейсмических работ методом отраженных волн (МОВ ОГТ) (см. рис. 1), которые были получены АО “МАГЭ” в период с 1989 по 1992 гг. на шельфе Баренцева моря и западном континентальном склоне вплоть до хребта Книповича. Также использовались данные непрерывного сейсмического профилирования (НСП) Геологического института РАН, полученные в 24, 25, 26 и 27 рейсах НИС “Академик Николай Страхов” в период с 2006 по 2010 гг. Кроме этого использовали данные открытого доступа по гравитационному полю и его редукциям [Balmino et al., 2012] и аномальному магнитному полю [Maus et al., 2009], скомпилированных в grids на сетке  $2' \times 2'$ .

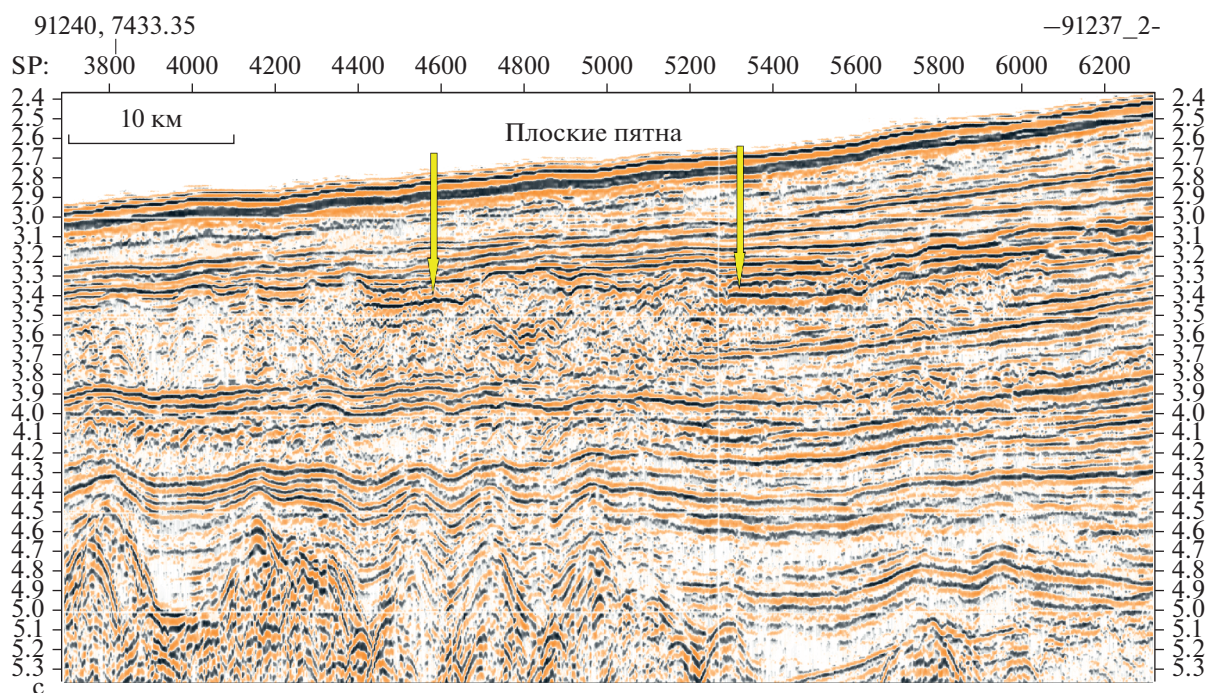
## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Суммированные временные разрезы МОВ ОГТ были загружены в программную среду RadExPro для интерпретации сейсмических данных, где было проведено пикирование “ярких” и “плоских пятен” как отдельного дискретного горизонта вне стратиграфической привязки. Также в эту среду были загружены одноканальные разрезы



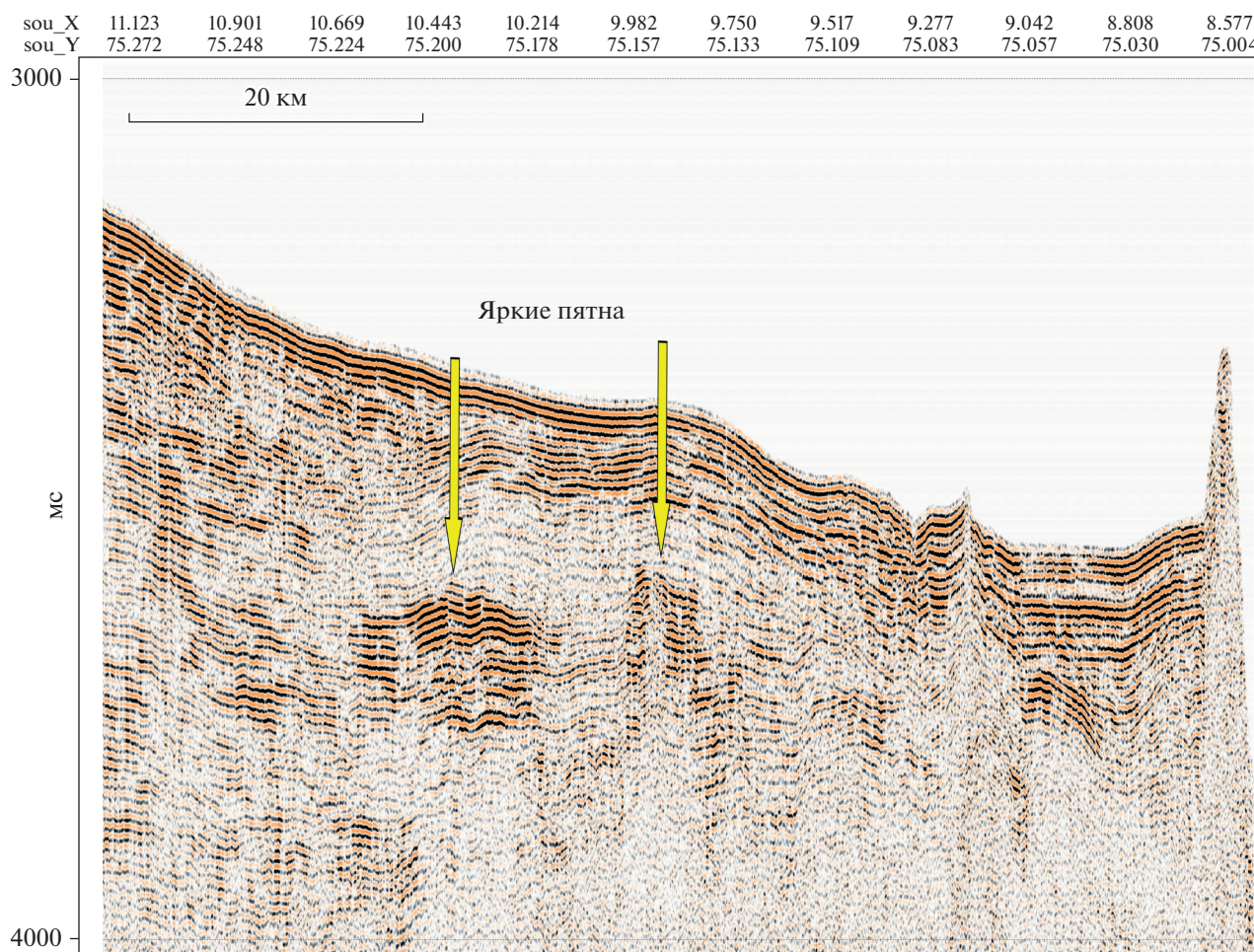


**Рис. 4.** Фрагмент разреза МОВ ОГТ 91240 (положение показано на рис. 1), содержащий аномалию сейсмической записи типа “яркое пятно” над выступом акустического фундамента. По горизонтали – номер суммарной трассы.



**Рис. 5.** Фрагмент разреза МОВ ОГТ 91237\_2 (положение показано на рис. 1), содержащий аномалии сейсмической записи типа “плоское пятно” над выступом акустического фундамента. По горизонтали – номер суммарной трассы.





**Рис. 6.** Фрагмент разреза НСП S26-52, содержащий аномалии сейсмической записи типа “яркое пятно” над выступами акустического фундамента. По горизонтали – долгота и широта в градусах с десятичной долей.

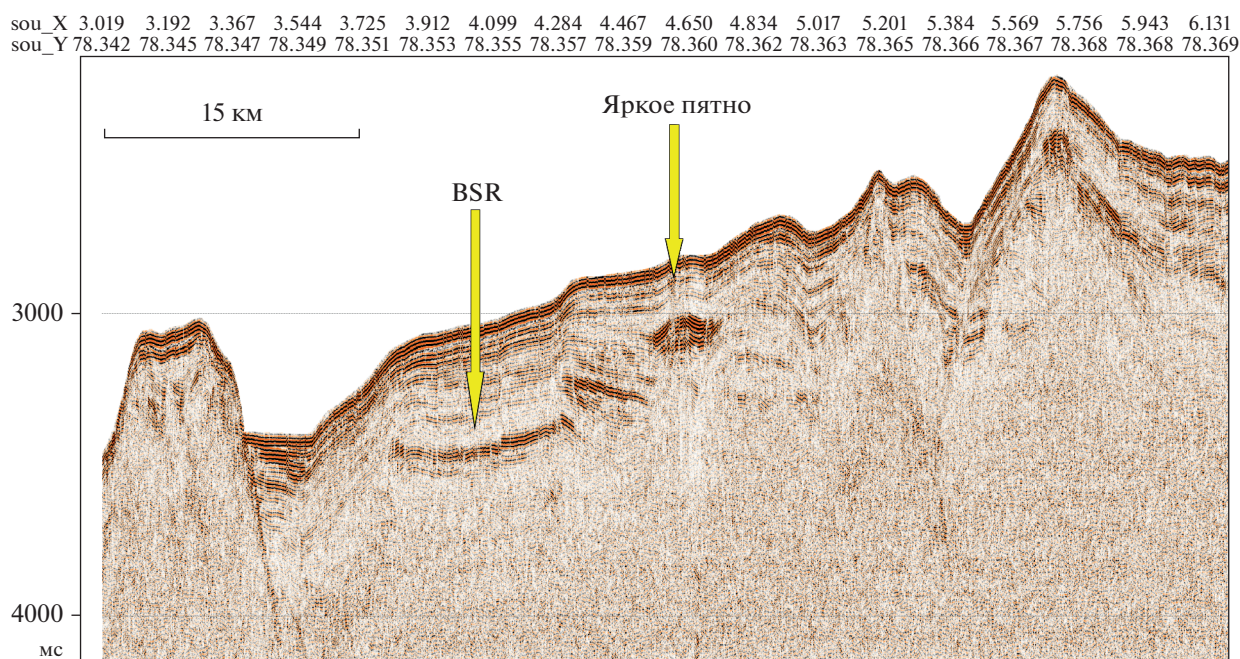
НСП, по которым также было проведено пикирование указанных выше аномалий сейсмической записи. В силу существенно меньшей глубинности НСП, по этим данным были выделены пятна исключительно в верхней части осадочного разреза. Выделяемые пятна проверялись на принадлежность к аккумуляции флюидов путем расчета сейсмического атрибута мгновенной частоты в среде RadExPro. Локальные минимумы атрибута вдоль рефлекторов указывают на локальное уменьшение пластовых скоростей, связанное с флюидонасыщением. Результаты пикировки были экспортированы в картографическую среду ArcGIS, где прежде всего было сформировано картографическое отображение положения пятен на топографической основе из геофизических полей. Кроме того, пятнам были присвоены значения этих полей, соответствующие их центрам, что показало приуроченность пространственного положения пятен к определенным зонам фундамента восточного фланга хребта Книповича.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРВИЧНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В результате интерпретации сейсмических данных было выделено 24 аномалии волнового поля, относимых к типу “яркого” или “плоского пятна”. На рис. 4, 5, 6, 7 приведены примеры этих аномалий.

На рис. 6 показан фрагмент записи НСП S26-52 с флюидной аномалией типа “яркое пятно” мощностью ~160 мс (~120 м) при горизонтальном размере 12 км. Если предположить изометричные горизонтальные размеры, то объем залежи составит 13.5 млрд м<sup>3</sup>. Аномалия заполняет антиформу, над которой расположена аналогичная конфигурация рефлекторов, не формирующая аномальную запись. Это может указывать на локальный подъем неконсолидированных осадков под давлением флюидов, либо на деформации осадков при вертикальном движении блоков фундамента. Западнее большого пятна есть еще одно, но поменьше.





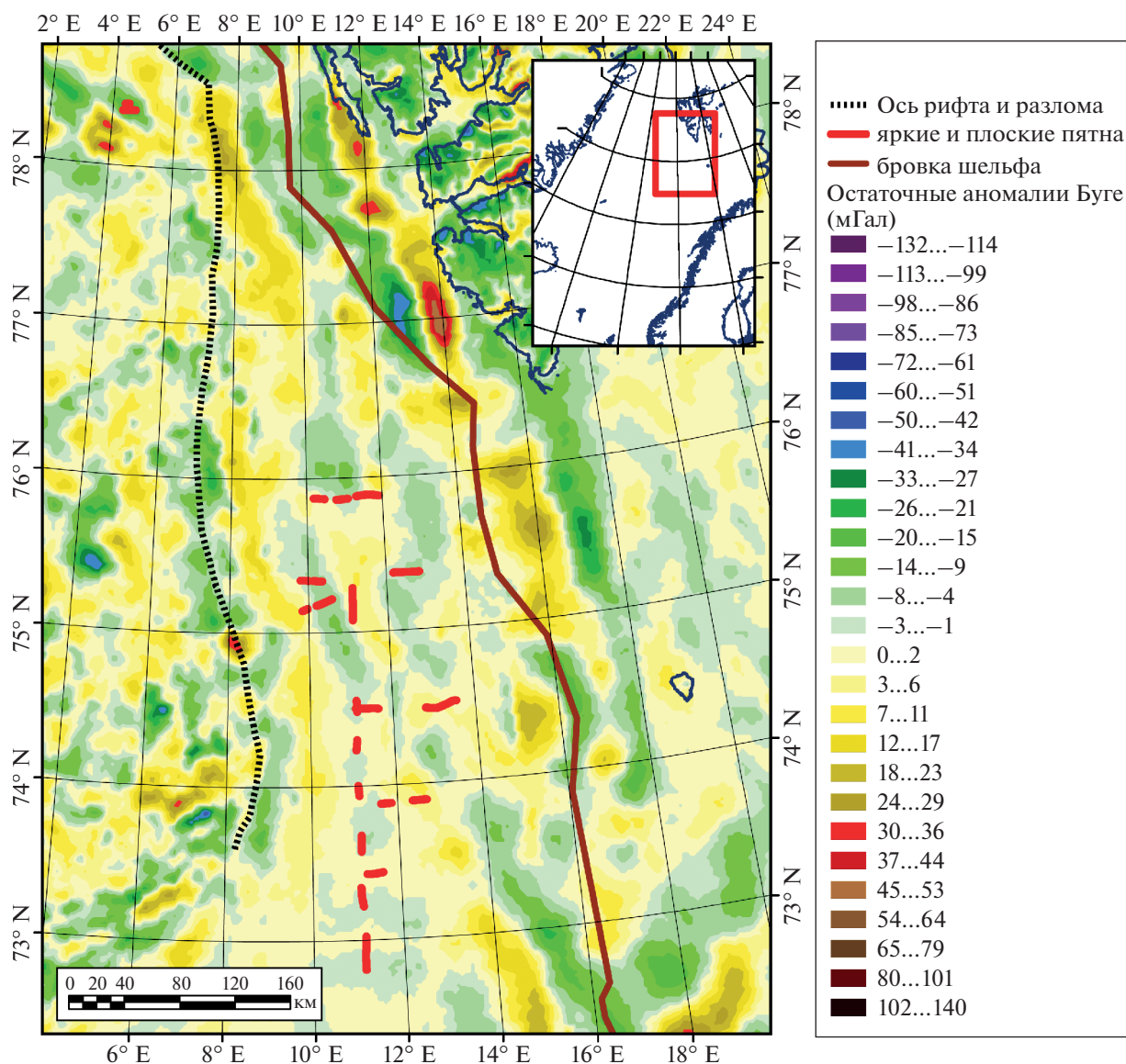
**Рис. 7.** Фрагмент разреза НСП S26-P2-12b, содержащий аномалии сейсмической записи типа “яркое пятно” и аномалии BSR. По горизонтали — долгота и широта в градусах с десятичной долей.

На разрезе S24-P2-12b (см. рис. 7) от хребта Ховгард до западного борта хребта Книповича показан фрагмент записи с флюидной аномалией типа “яркое пятно”, расположенной над разрывом в BSR. Мощность аномалии ~120 мс (~90 м) при горизонтальном размере 4 км. Аномалия заполняет антиформу, над которой расположена конформная деформация рельефа дна. Это также может указывать на локальный подъем неконсолидированных осадков под давлением флюидов, поступивших из разрыва флюидоупора вверх по разрезу.

На участках разрезов с субширотной ориентацией, где были обнаружены аномалии записи и виден акустический фундамент, прослеживаются деформации догляциального и, в некоторых случаях, гляциального осадочных комплексов, которые могут быть сформированы за счет вертикальных движений блоков консолидированной коры. Деформации чехла, перекрывающего фундамент, минимальны на субмеридиональном разрезе 91 240 (см. рис. 1), что указывает также на субмеридиональную ориентацию оси складчатого фронта. Пространственное положение аномалий приведено на рис. 8 с использованием остаточной аномалии Буге в качестве топографической основы. В данной работе под остаточными аномалиями понимается высокочастотная компонента поля с длинами волн менее 65 км. Это значение граничной частоты было выбрано для того, чтобы обеспечить в результате фильтрации представ-

ленность в трансформанте поля плотностных неоднородностей коры и верхней мантии, в которой могут проходить процессы серпентинизации.

Рисунок остаточного поля аномалий Буге (см. рис. 8) показывает продолжение линейной структуры, связанной с разломом Сенья, на север–северо-запад. Это продолжение представляет собой линейную пару максимума и минимума, утыкающуюся в хребет Книповича около 76° с.ш. Расположение большинства пятен связано с отрицательными зонами остаточной аномалии. Особенно глубокий минимум поля связан с немногими аномалиями севернее 78° с.ш. При среднем уровне поля в области проявления аномалий на обоих флангах хребта 0.3 мГал, близком к нулю после фильтрации, среднее значение поля под аномалиями составляет –2.7 мГал, а на юго-восточном фланге хребта –0.5 мГал. Сопоставление пространственного положения аномалий с аномальным магнитным полем  $\Delta T_a$  по данным [Olesen et al., 1997] (рис. 9) показывает, что аномалии развиты в областях с мозаичным характером поля, где преимущественно отсутствует его линейная конфигурация. Кроме того, средний уровень магнитного поля в местоположениях аномалий сейсмической записи составляет +72 нТл и практически все сейсмические аномалии лежат в пределах значительных положительных магнитных аномалий.



**Рис. 8.** Положение аномалий сейсмической записи типа “яркое пятно” и “плоское пятно” на топооснове остаточной аномалии Буге, полученной в результате высокочастотной фильтрации полной аномалии Буге для длин волн  $\leq 65$  км.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Полученные результаты показывают, что на продолжении трансформной границы океан–континент по разлому Сенья происходит тектоническая активизация, выраженная уникальной конфигурацией эпицентров землетрясений (см. рис. 3). Эта уникальность заключается в том, что на восточном фланге хребта Книповича события выстраиваются в длинные цепочки на продолжении разлома и ортогональные короткие цепочки с множеством слабых событий. Данное пространственное распределение сейсмических событий является копией классического распределения

вдоль стандартных структурных элементов дивергентной границы – рифтовых сегментов и трансформных разломов, но с развернутой на  $\sim 60^\circ$  относительно современной оси хребта ориентацией. Ориентация этих эпицентров также не совпадает с ориентацией линейных магнитных аномалий в тех местах, где они выявляются в виде коротких сегментов (см. рис. 9). Это говорит о вторичной наложенной природе активных структур фундамента на первичную структуру. Длинные цепочки событий на фланге расположены вдоль удлиненной формы остаточных аномалий Буге (см. рис. 8), являющейся продолжением разлома Сенья. Это указывает на то, что структуры фундамента, формирующие вариации остаточ-



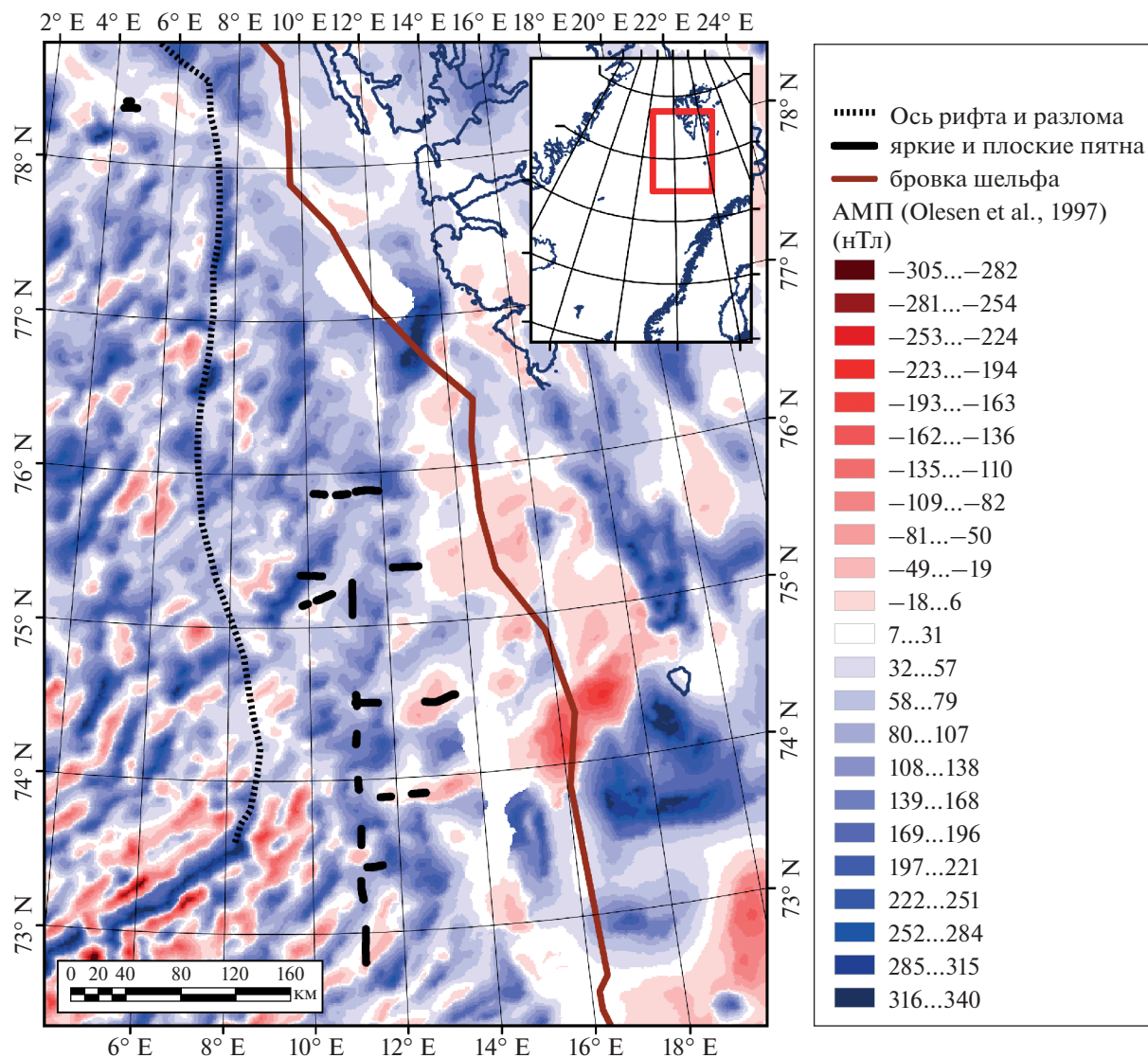


Рис. 9. Положение аномалий сейсмической записи типа “яркое пятно” и “плоское пятно” на топооснове аномального магнитного поля  $\Delta T_a$  (АМП) по данным [Olesen et al., 1997].

ных аномалий Буге, испытывают современные знакопеременные движения. Подъем блоков консолидированной коры формирует деформации в осадочном чехле (см. рис. 4, 5). Погружение блоков связано, по данным [Kandilarov et al., 2008; Rajan et al., 2012], с “детачментом” на восточном фланге хребта. Также в работе [Rajan et al., 2012] предполагается, что на хребте Книповича и его флангах это погружение сопровождается процессами серпентинизации в верхней мантии и приведен пример сейсмического разреза с аномалией “плоское пятно”. Серпентинизация происходит с разуплотнением, увеличением объема и генерацией газа, что приводит к положительным вертикальным движениям и скоплению газа в налегающих на фундамент осадках.

В районах наиболее интенсивной глубинной дегазации (см. рис. 7) на поднятии Святогор газ, попадая в приповерхностное пространство, формирует слой газогидратов с BSR подошвой [Waghorn et al., 2018], который становится флюидоупором для продолжающегося флюидопотока и в случае нарушения целостности BSR прорывается вверх, формируя структуры типа бугров пучения в слабоконсолидированных осадках (см. рис. 6, 7). Многие аномалии типа “яркое пятно” в догляциальном осадочном комплексе, по данным МОВ ОГТ, расположены над выступами акустического фундамента, что находится в соответствии с гипотезой связи с серпентинизацией. Среднее значение остаточных аномалий Буге под сейсмическими аномалиями ниже, как минимум, на 1 мГал

(до 3 мГал) общего среднего значения этой трансформанты около нуля. Это указывает на наличие зон разуплотнения коры и/или верхней мантии, связанных с серпентинизацией. Среднее значение аномального магнитного поля в местоположениях сейсмических аномалий составляет +72 нТл и находится практически целиком в положительном диапазоне вне зависимости от расстояния до хребта, и, следовательно, от возраста. Это указывает на то, что сопровождающаяся образованием магнетита серпентинизация может быть для всего района одновозрастным современным процессом, формирующим наложенный хомогенный магнитоактивный слой в верхней мантии. Это может объяснить мозаичный рисунок аномального магнитного поля и потерю коррелируемости классических спрединговых магнитных линейных аномалий, характерную для флангов хребта Книповича [Olesen et al., 1997].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Восточный фланг хребта Книповича испытывает тектоническую активизацию вдоль структур фундамента, являющихся северным продолжением разлома Сенья и несовпадающих с ориентацией как рифтовых сегментов хребта, так и трансформных смещений. Эти структуры выражены в высокочастотной компоненте аномалий Буге и – по сейсмическим данным – сопровождаются деформациями осадочного чехла, налегающего на фундамент.

2. Выделенные по сейсмическим данным аномалии типа “яркое” или “плоское пятно”, имеющие дегазационную природу, расположены в районах с отрицательными значениями остаточных аномалий Буге и положительными аномалиями магнитного поля. Это указывает на привязку аномалий к зонам разуплотнения, которые могут иметь серпентинизационный генезис. Серпентинизация сопровождается формированием метана и возникновением наложенной хомогенной намагниченности, которая искажает первичный линейный рисунок магнитных аномалий спредингового фундамента. Положительный знак аномального магнитного поля указывает на современный возраст этих процессов.

3. Вертикальные смещения блоков коры и верхней мантии на флангах, приводящие к деформациям осадочного чехла и внеосевой сейсмичности, могут быть объяснены увеличением объема породы в результате серпентинизации и тектоническими срывами на флангах, после которых увеличивается доступ воды, необходимой для этого процесса, изменяющего физические

свойства пород – источников геофизических полей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Российскому Федеральному Геологическому Фонду [<https://rfgf.ru>] за доступ к фондовым материалам, которые были необходимы для проведения исследований, и АО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция” (МАГЭ) – за предоставленные цифровые данные МОВ ОГТ. Авторы также признательны двум анонимным рецензентам, чьи замечания помогли улучшить текст и графику статьи.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батулин Д.Г.* Структура осадочного чехла и развитие Шпицбергенской континентальной окраины // *Осадочный чехол Западно-Арктической метаплатформы*. Мурманск, 1993. С. 35–47.
- Зайончек А.В., Брекке Х., Соколов С.Ю., Мазарович А.О., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Кохан А.В., Мороз Е.А., Пейве А.А., Чамов Н.П., Ямпольский К.П.* Строение зоны перехода континент–океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24, 25 и 26 рейсов НИС “Академик Николай Страхов”, 2006–2009 гг.) // *Строение и история развития литосферы. Вклад России в Международный Полярный Год*. Т. 4. М.: Paulsen, 2010. С. 111–157.
- Пейве А.А., Чамов Н.П.* Основные черты тектоники хребта Книповича (Северная Атлантика) и история его развития на неотектоническом этапе // *Геотектоника*. 2008. № 1. С. 38–57.
- Соколов С.Ю.* Тектоническая эволюция хребта Книповича по данным аномального магнитного поля // *Докл. РАН*. 2011. Т. 437. № 3. С. 378–383.
- 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.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика)*. Справочник геофизика / Ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.
- Чамов Н.П., Соколов С.Ю., Костылева В.В., Ефимов В.Н., Пейве А.А., Александрова Г.Н., Былинская М.Е., Радионова Э.П., Ступин С.И.* Строение и состав осадочного чехла района рифта Книповича и впадины Моллой (Норвежско-Гренландский бассейн) // *Литология и полез. ископаемые*. 2010. № 6. С. 594–619.



- Шутилов Э.В., Шкарубо С.И., Разницин Ю.Н.* Неотектоника северной части Норвежско-Гренландского бассейна (особенности строения и развития хребта Книповича и Поморского периокеанического прогиба) // Докл. РАН. 2006. Т. 410. № 4. С. 506–511.
- Шкарубо С.И.* Особенности спрединга в северной части Норвежско-Гренландского бассейна // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 1. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1996. С. 101–114.
- Ямпольский К.П., Соколов С.Ю.* Осадочный чехол и аномалии Буге в северной части хребта Книповича // Докл. РАН. 2012. Т. 442. № 4. С. 531–535.
- Amundsen I., Blinova M., Hjelstuen B., Mjelde R., Haflidason H.* The Cenozoic western Svalbard margin: sediment geometry and sedimentary processes in an area of ultraslow oceanic spreading // Mar. Geophys. Res. 2011. V. 32. P. 441–453.
- Balmino G., Vales N., Bonvalot S., Briais A.* Spherical harmonic modeling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies // J. Geod. 2012. V. 86. P. 499–520.
- Bougault H.* Hydrogène et Méthane hydrothermal: Enjeux scientifiques Une ressource potentielle nouvelle? // Mines et Carrières. Industrie Minérale. 2012. № 196. P. 73–80.
- Charlou J.L., Fouquet Y., Bougault H., Donval J.P., Etoubleau J., Jean-Baptiste P., Dapoigny A., Appriou P., Rona P.* Intense CH<sub>4</sub> 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., Tamaki K., Kurevits D., Okino K., Sato H., Baranov B.V., Egorov A.V., German K., Crane K., Sushchevskaya N.M.* The Knipovich Ridge Rift Zone: evidence from the Knipovich-2000 expedition // Dokl. Earth Sci. 2001. V. 378. P. 420–423.
- Delescluse M., Chamot-Rooke N.* Serpentinization pulse in the actively deforming Central Indian Basin // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 276. P. 140–151.
- Dmitriev L.V., Bazylev B.A., Silantiev S.A., Borisov M.V., Sokolov S.Yu., Bougault H.* Hydrogen and methane formation with serpentinization of mantle hyperbasite of the ocean and oil generation // Russ. J. Earth Sci. 1999. V. 1. № 6. P. 511–519.
- Gernigon L., Franke D., Geoffroy L., Schiffer C., Foulger G.R., Stoker M.* Crustal fragmentation, magmatism, and the diachronous opening of the Norwegian-Greenland Sea // Earth-Sci. Rev. 2020. V. 206. 102839. P. 1–37.
- Johnson J.E., Mienert J., Plaza-Faverola A., Vadakkepuli-yambatta S., Knies J., Bünz S., Andreassen K., Ferré B.* Abiotic methane from ultraslow-spreading ridges can charge Arctic gas hydrates // Geology. 2015. V. 43(5). P. 371–374.
- 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., Pedersen R.B., Okino K., Murai Y.* 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., Petrick G., Sültenfuß J., Fürhapter K.* 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.
- Kvarven T., Hjelstuen B., Mjelde R.* Tectonic and sedimentary processes along the ultraslow Knipovich spreading ridge // Mar. Geophys. Res. 2014. V. 35. P. 89–103.
- Maus S., Barendhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Milligan P., Mogren S., Müller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebault E., Tontini F.C.* EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosys. 2009. V. 10. № 8. P. 1–12.
- Mosar J., Eide E.A., Osmundsen P.T. et al.* Greenland-Norway separation. A geodynamic model for the North Atlantic // Norwegian J. Geol. 2002. V. 82. P. 281–298.
- NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin. 2012. Available from <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/regional/> [last accessed 15.11.2012]
- Olesen O.G., Gellein J., Habrekke H. et al.* Magnetic Anomaly Map, Norway and adjacent ocean areas, Scale 1 : 3 million. Geological Survey of Norway. 1997.
- Plaza-Faverola A., Keiding M.* Correlation between tectonic stress regimes and methane seepage on the western Svalbard margin // Solid Earth. 2019. V. 10. P. 79–94.
- 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.
- Rebesco M., Wahlin A., Laberg J.S. et al.* Quaternary contourite drifts of the Western Spitsbergen margin // Deep-Sea Res. I. 2013. V. 79. P. 156–168.
- Rebesco M., Hernández-Molina F.J., Van Rooij D., Wählin A.* Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations // Mar. Geol. 2014. V. 352. P. 111–154.
- Straume E.O., Gaina C., Medvedev S., Hochmuth K., Gohl K., Whittaker J.M. et al.* GlobSed: Updated total sediment thickness in the world's oceans // Geochem. Geophys. Geosys. 2019. V. 20. P. 1756–1772.
- 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 // Geochem. Geophys. Geosys. 2018. V. 19. P. 2325–2341.

## Degasation Manifestations in Sedimentary Cover of South-Eastern Flank of Knipovich Ridge (North Atlantic)

S. Yu. Sokolov<sup>1,\*</sup>, G. D. Agranov<sup>1,2</sup>, S. I. Shkarubo<sup>3</sup>, A. V. Zayonchek<sup>1</sup>, A. S. Abramova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*The Earth Sciences Museum, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

<sup>3</sup>*JSC "Marine Arctic Geological Expedition", Sofia Perovskaya str., 26, Murmansk, 183038 Russia*

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

The paper analyzes anomalies of seismic data such as "bright spot" and "flat spot" on the southeastern flank of the Knipovich ridge associated with the accumulation of free gas in the sedimentary cover above the oceanic basement. Spatially the identified anomalies are associated with negative values of residual Bouguer anomalies and positive magnetic field anomalies. This indicates zones of decompression of the crust and upper mantle, which may have serpentinization genesis, which also forms superimposed chemogenic magnetization, probably of modern age and distorting the primary linear pattern of the oceanic basement magnetic anomalies in the research area. Serpentinization also explains the vertical displacements of the crustal and upper mantle blocks on the flanks, leading to deformations of the sedimentary cover with an increase in the volume of the rock. Off-axis seismicity indicates tectonic disruptions on the flanks of the ridge, in which the access of water necessary for serpentinization increases, followed by a change in the physical properties of rocks reflected in geophysical fields. The eastern flank of the Knipovich Ridge is experiencing tectonic activation along the basement structures that are the northern extension of the Senja fault. The consequence of these processes are the detected accumulations of free gas in the sedimentary cover.

*Keywords:* Knipovich ridge, gas accumulations, serpentinization, "bright spot" seismic anomalies, Bouguer anomalies, anomalous magnetic field.