



<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0316>

AMPLITUDES OF DISJUNCTIVE DISLOCATIONS IN THE KNIPOVICH RIDGE FLANKS (NORTHERN ATLANTIC) AS AN INDICATOR OF MODERN REGIONAL GEODYNAMICS

S. Yu. Sokolov, A. S. Abramova, E. A. Moroz, Yu. A. Zарaiskaya

Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

Abstract: This article presents the first map showing the vertical amplitudes of modern disjunctive dislocations in Northern Atlantic, based on the estimated phase shifts of reflected waves recorded by high-frequency seismic acoustic surveys. The amplitude distribution pattern is mosaic with alternating areas of compression and extension in the flanks of the Knipovich rift system. The modern structure of the Knipovich Ridge, including two strike-slip faults, represents a local rift in the pull-apart setting. The asymmetry of stresses and the presence of compression in the ridge flanks is evidenced by the distribution of the focal mechanisms of strong earthquakes related to reverse faults. In the southeastern Knipovich Ridge, tectonic activity is marked by the asymmetric pattern of the epicenters of small earthquakes.

Key words: geodynamics; amplitudes of disjunctive dislocations; sedimentary cover; seismoacoustics; Knipovich Ridge; earthquake; earthquake focal mechanisms

RESEARCH ARTICLE

Recommended by V.A. Sankov

Received: November 16, 2016

Revised: May 25, 2017

Accepted: June 13, 2017

For citation: Sokolov S.Yu., Abramova A.S., Moroz E.A., Zарaiskaya Yu.A., 2017. Amplitudes of disjunctive dislocations in the Knipovich Ridge flanks (Northern Atlantic) as an indicator of modern regional geodynamics. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 769–789. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0316.

Для цитирования: 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. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0316.

АМПЛИТУДЫ ДИЗЪЮНКТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ ФЛАНГОВ ХРЕБТА КНИПОВИЧА (СЕВЕРНАЯ АТЛАНТИКА) КАК ИНДИКАТОР СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ РЕГИОНА

С. Ю. Соколов, А. С. Абрамова, Е. А. Мороз, Ю. А. Зарайская

Геологический институт РАН, Москва, Россия

Аннотация: Впервые представлена карта вертикальных амплитуд современных дизъюнктивных нарушений в глубоководной части океана по смещениям фаз отраженных волн высокочастотной сейсмоакустической записи. Полученное распределение амплитуд имеет мозаичный характер с чередованием областей сжатия и растяжения на флангах рифтовой системы Книповича. Два сдвиговых смещения формируют современную структуру хребта Книповича как локальный рифт в обстановке пулл-апарт. Асимметрия напряжений и наличие сжатия на флангах хребта подтверждаются распределением механизмов очагов сильных землетрясений взбросового типа. Наблюдается тектоническая активизация юго-восточного фланга хребта Книповича, выраженная в асимметрии эпицентров слабых землетрясений.

Ключевые слова: геодинамика; амплитуды дизъюнктивных нарушений; осадочный чехол; сейсмоакустика; хребет Книповича; землетрясение; механизмы очагов

1. ВВЕДЕНИЕ. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ И НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

В 2006–2010 гг. Геологическим институтом РАН (ГИН РАН) совместно с Норвежским нефтяным директором (NPD) были проведены четыре экспедиции на НИС «Академик Николай Страхов» на хребте Книповича (север Атлантического океана) (рис. 1). Работы проводились в рамках задач Международного полярного года (МПГ) как совместный проект России и Норвегии. В результате работ с эхолотированием и высокочастотным профилированием было пройдено около 22000 км, в том числе с сейсмоакустикой – 14000 км. В экспедициях использовалась установленная на борту гидроакустическая система фирмы RESON (Дания). Она включает в себя программно-аппаратурный комплекс SeaBat, который объединяет многолучевые эхолоты SeaBat 8111 (мелководный) и SeaBat 7150 (глубоководный); GPS; сенсоры движения; датчики скорости звука у антенн эхолота и в водной толще (SVP-70 и SVP-30 соответственно); программный пакет сбора и обработки данных PDS2000. Одновременно с работой гидроакустической системы проводилась съемка высокочастотным профилографом EdgeTech 3300 (США) и комплексом оборудования для непрерывного сейсмического профилирования разработки ГИН РАН. Первичные результаты опубликованы в работах [Zayonchek et al., 2010; Sokolov et al., 2013, 2014].

Были получены обширные данные по рельефу и верхней части разреза (до 100 м) осадочного чехла хребта Книповича и его флангов. Поскольку межгалсовое расстояние при этой съемке составляло 5–7 км для обеспечения сплошного покрытия полосой озвучивания многолучевого эхолота, корреляция отражающих горизонтов в верхней части разреза с целью построения поверхности рефлекторов проблематична. Но эти данные позволяют в режиме пикировки точечных особенностей волнового поля (event picking) в программной среде RadExPro (Россия) выявить и оцифровать пространственное положение и смещение для многочисленных современных дизъюнктивных нарушений сбросового и взбросового типа. Кроме этого, были выявлены террасы, складки, яркие и тусклые пятна акустической записи, зоны хаотизации рефлекторов, выход флюидов из осадков в воду и многое другое (рис. 2).

Ситуация, при которой геодинамически активный район, являющийся сегментом Срединно-Атлантического хребта (САХ), находится в зоне лавинной седиментации, встречается редко. Обычно спрединговые центры, где происходит горизонтальная аккреция базальтоидной океанической коры, не содержат осадочного чехла с мощностью, превышающей разрешение сейсмоакустических методов. Различить первичную «шероховатость» базальтового субстрата и рельеф, сформированный

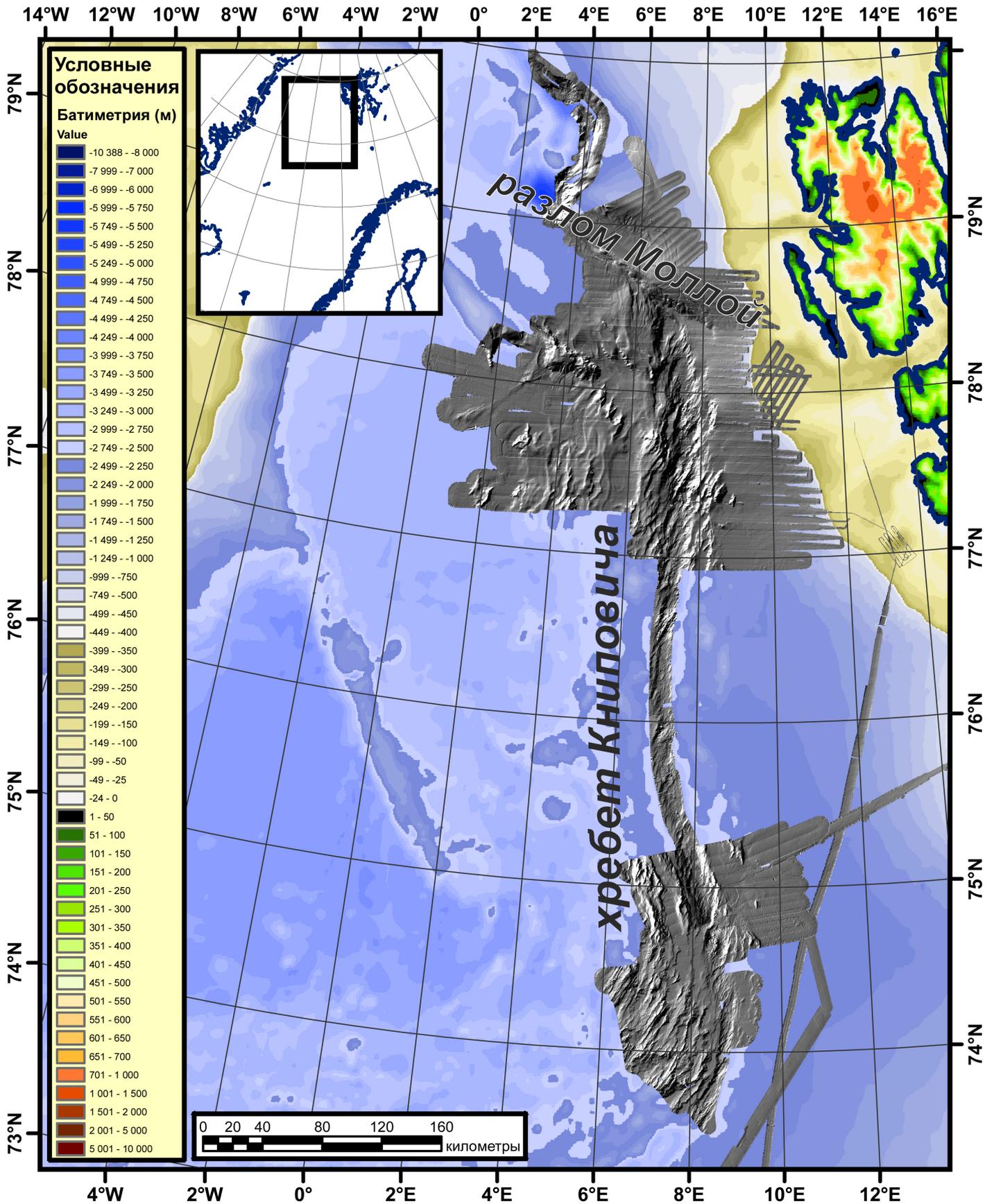


Рис. 1. Схема покрытия района работ Геологического института РАН 2006–2010 гг. многолучевым эхолотированием и высокочастотным профилированием на хребте Книповича и его флангах.

Fig. 1. Knipovich Ridge and its flanks: the area covered by the multi-beam echo-sounding and high-frequency profiling surveys conducted by the Geological Institute of RAS in 2006–2010.

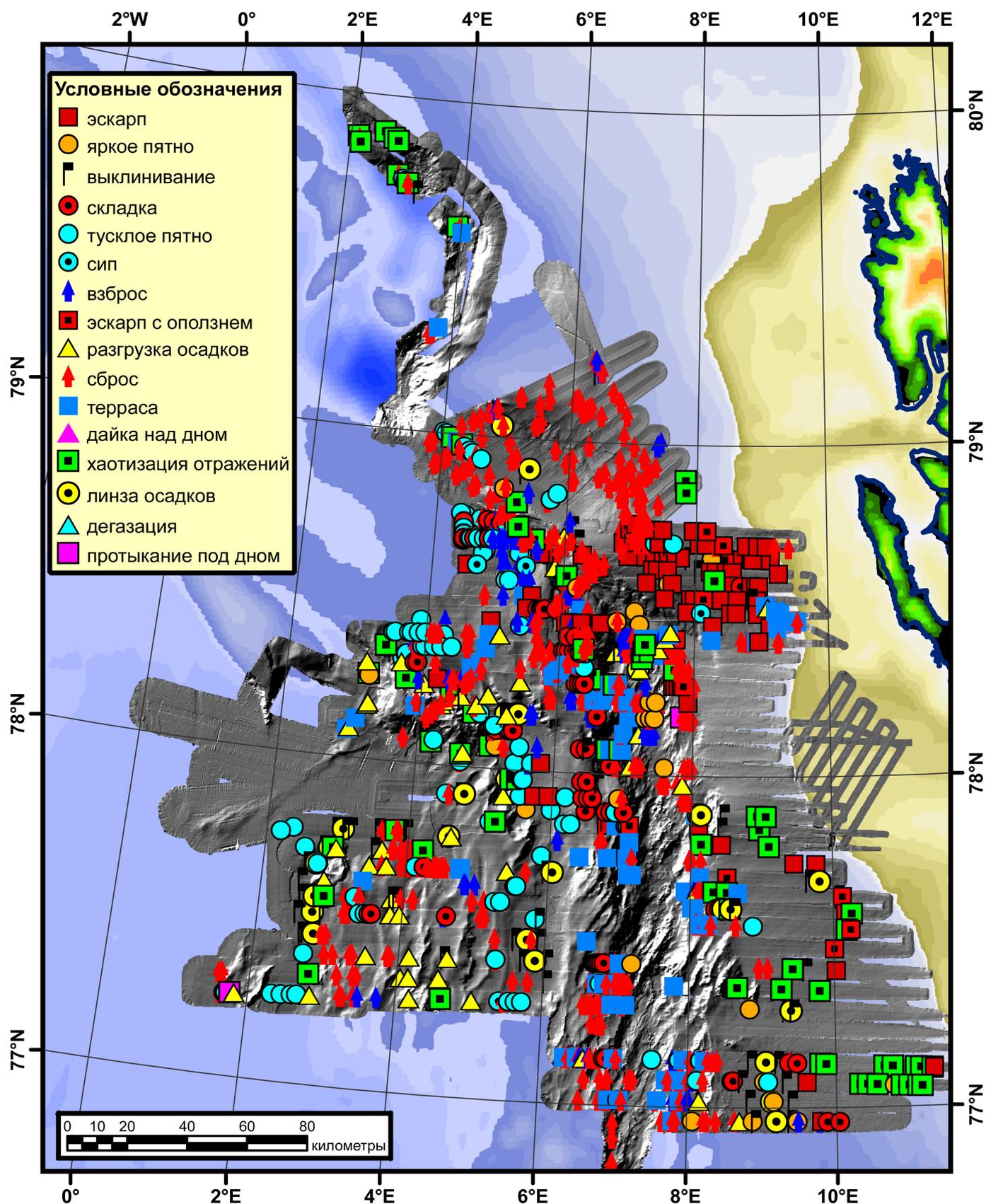


Рис. 2. Карта пространственного распределения точечных особенностей волнового поля высокочастотного профилографа в северной части хребта Книповича с соответствующей геоморфологической или тектонической интерпретацией выявленных элементов.

Fig. 2. Map showing the spatial pattern of the point features in the wave field recorded by a high-frequency profiler in the northern Knipovich Ridge, and the corresponding geomorphological and tectonic interpretation of the identified elements.

деформационными процессами при остывании литосферы, серпентинизации или неортогональном к оси рифта напряжении вдоль дивергентной границы, затруднительно. В условиях быстрого накопления слабоконсолидированных терригенных осадков вблизи шельфа как источника сноса современные тектонические деформации хорошо видны по нарушениям акустической стратификации верхней части разреза. Одной из задач серии экспедиций 2006–2010 гг. являлось исследование современных деформаций данного сегмента САХ по нарушениям в осадочном чехле. Эти деформации в данной работе картируются только по дизъюнктивным нарушениям, поскольку пликративные нарушения при высокочастотном профилировании с глубиной проникновения до 100 м довольно сложно отличить от облекания неконсолидированными осадками изначально неравномерного рельефа дна.

2. ОБЗОР ТЕКТОНИКИ РЕГИОНА И ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ

Хребтом Книповича называется сегмент САХ от 73°30' до 78°30' с.ш. (см. рис. 1). Все исследователи указывают на аномальность его тектонического строения по сравнению с зоной САХ с типичным строением структурных элементов. Эта аномальность выражена в данных стандартного набора геофизических методов съемки, проведенных в экспедициях на НИС «Академик Николай Страхов», и донного опробования и, по нашему мнению, заключается в следующем. Осевая зона хребта с ограничивающими рифт бортами по данным аномального магнитного поля [Olesen et al., 1997] имеет угловое соотношение с отрезками линейных магнитных аномалий между 35° и 50°. Этот угол слишком велик для случаев типичного косоугольного спрединга (обычно не более 15°) и указывает на иной характер динамики вдоль дивергентной границы, чем растяжение под углом к оси рифта. При таких углах между направлением аккреции и осью структуры, вероятнее всего, будет осуществляться сдвиг [Tevelev, 2005] и формирование локальной рифтовой структуры во впадине пулл-апарт. Донное опробование западного борта хребта показало наличие олигоценых аргиллитов в коренном залегании [Bugrova et al., 2001]. Это указывает на то, что хребет не является центром спрединга, при котором на флангах отлагаются и уплотняются по мере удаления от оси рыхлые осадки. На это же указывают сейсмические разрезы [Zayonchek et al., 2010; Yampol'sky, 2011], на которых установлено смещение литифицированных, имеющих акустическую стратификацию и мощность до 400 м осадоч-

ных толщ по сбросовым нарушениям в бортах рифта. По данным [Sokolov et al., 2014], углы наклона склонов в местах проявлений смещенных по сбросам осадков достигают 35°, что физически не реализуемо для накоплений рыхлых обводненных отложений в сейсмически активной зоне. Согласно работе [Zaraiskaya, 2016], кривые повторяемости сейсмических событий вдоль хребта также аномальны и находятся в промежуточном положении между типичными наклонами для рифтов и трансформных разломов. Перечисленный комплекс фактов указывает на перескок центра спрединга, который в данном случае должен был сопровождаться разворотом на 45°. Известные случаи перескока сегментов САХ происходили как субпараллельное смещение оси спрединга. Произошедший в данном случае разворот, вероятно, означает смену движения по направлению растяжения на движение по сколовым азимутам.

Одна группа опубликованных гипотез развития региона представлена схемами, по которым современная ось хребта Книповича является изначально центром косоугольного спрединга, вдоль которого по системе коротких сегментов рифта происходила аккреция коры [Shipilov, 2004; Peive, Chamov, 2008] с косым направлением наращивания океанической коры относительно нормали к современной оси хребта Книповича. Наличие структур, свойственных парагенезу сдвиговых зон, не рассматривается.

Другие гипотезы тектонического развития региона в разной мере учитывают имеющиеся несоответствия перечисленных фактов с модельными представлениями, что объясняет существующее разнообразие этих гипотез. Наиболее значимы гипотезы, склоняющиеся к тому, что это не спрединговый хребет, а сдвиговая трансформная структура с элементами раздвига [Verba et al., 2000; Crane et al., 2001; Gusev, Shkarubo, 2001], что фактически совпадает с определением структуры типа пулл-апарт. Последняя сформирована в виде цепочки амагматических депрессий, разделенных магматическими перешейками с вулканическими постройками центрального типа [Crane et al., 2001; Zaraiskaya, 2016]. Отмечается, что в районе есть четкие признаки спредингового фундамента, сейсмичности и магматизма, свойственного рифтогенезу САХ. Явлением, которое устранило бы противоречие в таком сочетании фактов без апелляции к косому спредингу как решению проблемы, может быть именно перескок активной дивергентной границы, отсутствие косоугольного спрединга в регионе и начало рифтогенеза в совершенно новом положении с деструкцией ранее сформированного спредингового субстрата. По мнению Е.А. Гусева и С.И. Шкарубо [Gusev, Shkarubo, 2001], оформление структурного плана новой рифтогенной структуры еще не за-

кончено, но старт этого процесса имел место в миоцене. К перескоку спрединга также склоняются авторы работы [Crane et al., 2001]. Отсутствие осевой магнитной аномалии вдоль всего хребта Книповича, за исключением небольшого участка на севере, по нашему мнению, указывает на то, что перескок мог произойти в четвертичное время, причем продвигался он с севера на юг [Sokolov, 2011]. На всем протяжении хребта Книповича максимумы аномального магнитного поля (АМП) смещены на западный фланг на 50–100 км, что также указывает на перескок.

В работе [Mosar et al., 2002] был предложен вполне логичный механизм тектонической эволюции региона. Он состоит в том, что спрединг, сформировавший магматический фундамент, изначально проходил в нормальном направлении с единым центром, ортогональным разлому Моллой. АМП после пересчета поля в нижнее полупространство показывает, что он проходил не в едином центре, а по системе не менее шести коротких рифтовых сегментов с большим левым смещением друг относительно друга [Sokolov, 2011]. Общая обстановка расхождения Гренландии и Евразии в неогене (с 13 аномалиями в позднем олигоцене) является сдвиговой по линии, в целом совпадающей с бровкой шельфа Баренцева моря. Взаимодействие между плитами привело к частичному спрямлению границы плит и формированию трансенсивной сдвиговой зоны с хребтом Книповича как зоной отрыва. Сходный вывод был сделан в работе [Gusev, Shkarubo, 2001] без анализа АМП и в работе [Crane et al., 2001]. Более точные временные определения для эволюции хребта Книповича отсутствуют из-за нечеткого характера АМП. Спрединг вдоль этой структуры еще не начался, но начался рифтинг в цепочке депрессий пулл-апарт. Появление таких нарушений, спрямляющих межплитную границу и компенсирующих различия скоростей и направлений движения, скорее всего, – простейшее решение для разрядки системы тектонических напряжений [Tevelev, 2005].

3. ДАННЫЕ ПО ДИЗЪЮНКТИВНЫМ НАРУШЕНИЯМ

Смещения массивов пород по плоскостям разрывов являются трехмерным параметром. Горизонтальная компонента разрывов растяжения в глубоководных частях океана и рифтовой зоне хорошо картируется по данным многолучевого эхолота и сонарным данным [Escartín et al., 1999]. Например, при средней глубине океана 4000 м и эффективном телесном угле луча 1° многолучевые эхолоты позволяют формировать матрицу (грид) глубин с шагом 100 м, значения которой являются

осредненной глубиной в пределах ячейки грида. Сонарная компонента глубоководного эхолота, имеющая пространственную детальность, на порядок превосходящую результат дискретной детекции глубин, позволяет выявить конфигурации зон зияния разломов и построить карту их пространственного распределения по интенсивности рассеивания звука дном. При этом из-за осреднения глубин в ячейках грида информация о вертикальной компоненте смещения по этим разломам сильно сглажена. Для амплитуд вертикальных смещений в первые метры по разломам на базальтовом акустическом фундаменте, имеющем сильную раздробленность, использование эхолота проблематично. Как было указано ранее, исключение составляет ситуация, когда фундамент перекрыт осадочным чехлом с признаками стратификации, разрез которого получен высокочастотным профилографом с вертикальным разрешением 1 м и более. Смещение фаз позволяет выявлять дизъюнктивные нарушения с вертикальной амплитудой, соизмеримой с аппаратным разрешением.

Полученный массив данных о точечных неотектонических элементах представлен на рис. 2. Название «точечные» является условным и используется по контрасту с традиционной пикировкой продолжительных рефлекторов с целью построения структурных карт в пределах всего полигона. Также отметим, что большинство этих элементов, конечно, имеют определенные размеры по горизонтали, которые достаточно малы при средних картографических масштабах от 1:1000000 до 1:100000. Точечными элементами, в частности, являются сбросовые и взбросовые нарушения, но они при пикировке вносятся в базу с дополнительным атрибутом амплитуды вертикального смещения: отрицательное число в метрах для сбросов и положительное – для взбросов. Для других видов точечных элементов, в зависимости от конкретного типа элемента, вводятся другие виды атрибутов – ширина, высота над дном и проч.

В результате съемки в данном сегменте САХ в области лавинной седиментации были обнаружены многочисленные дизъюнктивные нарушения верхней части осадочного чехла: взбросы (рис. 3) со средней амплитудой 5–8 м и отдельными смещениями до 20 м, сбросы (рис. 4) со средней амплитудой 17 м и отдельными смещениями по осадкам более 100 м. В тех случаях, где по плоскости сместителя в рифте обнажаются базальты, амплитуды могут составлять более 300 м. В указанных примерах (см. рис. 3; рис. 4) хорошо видно, что признаком, отличающим взбросовое смещение по слабоконсолидированным осадкам от сбросового, является наличие на поднятом крыле небольшой антиклинали, указывающей на действие сжатия.

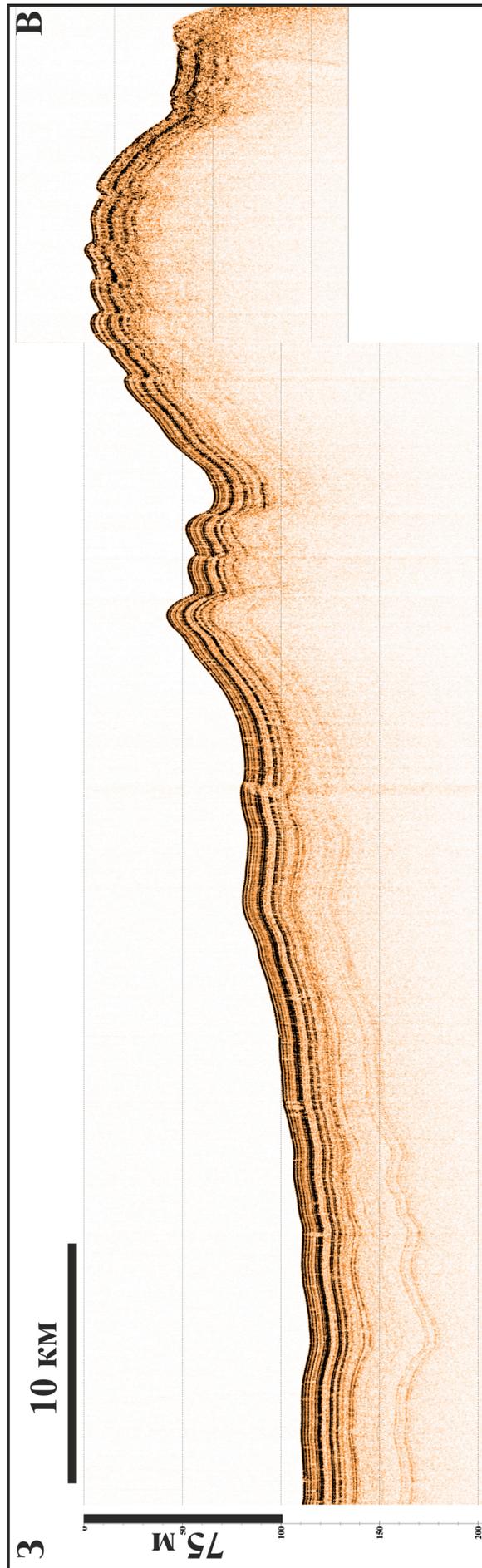


Рис. 3. Фрагмент профиля S24-P1-06, полученного высокочастотным профилографом EdgeTech 3300 в 24-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, Норвежский нефтяной директорат, 2006), иллюстрирующего взбросовые нарушения на западном фланге хребта Книповича. По вертикальной оси обозначена относительная временная шкала в миллисекундах и ее соответствие глубинному масштабу.

Fig. 3. Fragment of profile S24-P1-06 recorded by an EdgeTech 3300 profiler in Cruise 22 of the R/V Akademik Nikolai Strakhov (GIN RAS, The Norwegian Petroleum Directorate, 2006). It illustrates the reverse faults in the western Knipovich Ridge. The vertical axis shows the relative time scale in milliseconds and its correlation to the depth scale.

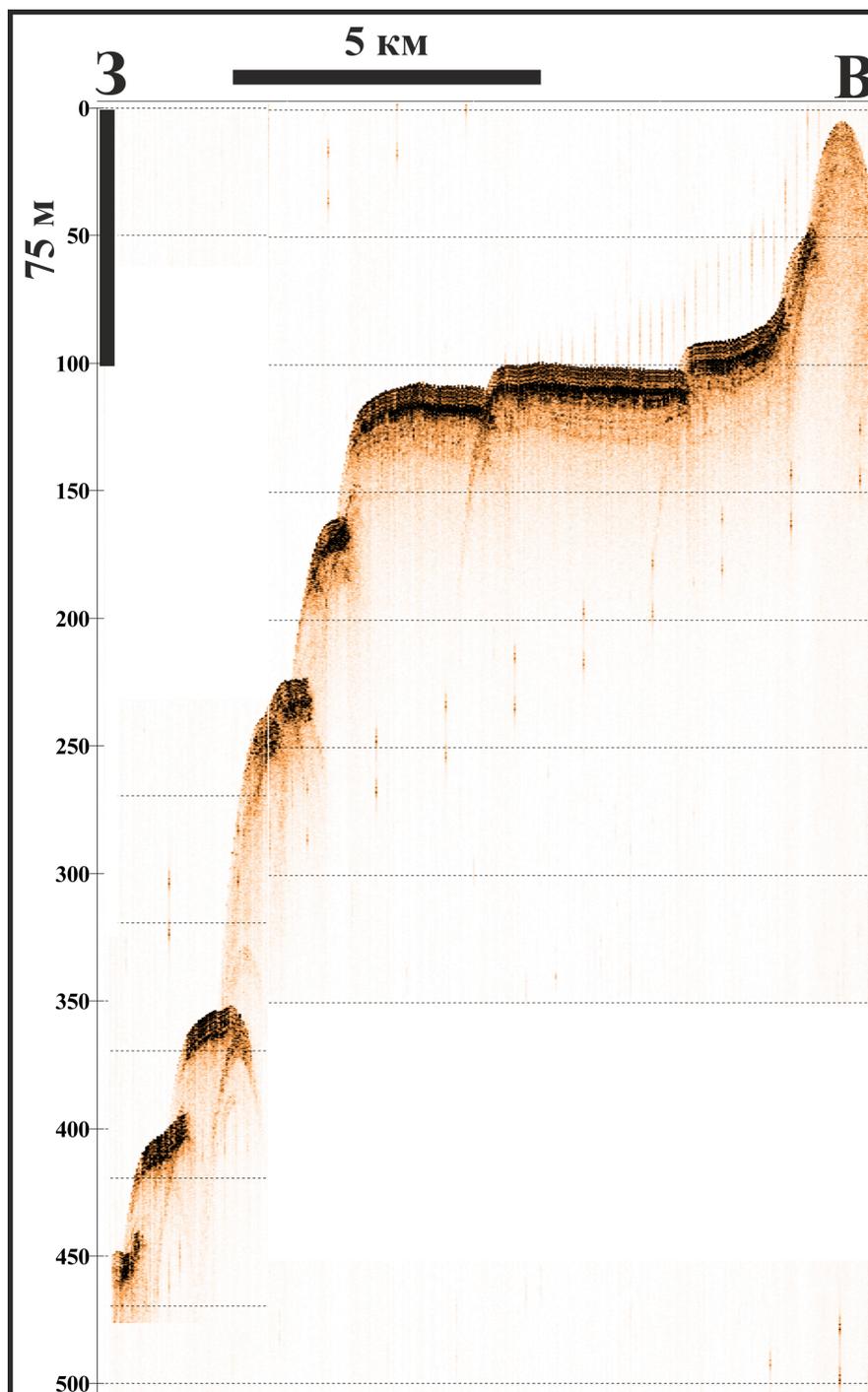


Рис. 4. Фрагмент профиля S25-P5-08, полученного высокочастотным профилографом EdgeTech 3300 в 25-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, Норвежский нефтяной директорат, 2007), иллюстрирующего сбросовые нарушения на восточном борту хребта Книповича. По вертикальной оси обозначена относительная временная шкала в миллисекундах и ее соответствие глубинному масштабу.

Fig. 4. Fragment of profile S25-P5-08 recorded by an EdgeTech 3300 profiler in Cruise 25 of the R/V Akademik Nikolai Strakhov (GIN RAS, The Norwegian Petroleum Directorate, 2007). It illustrates the normal faults in the eastern Knipovich Ridge. The vertical axis shows the relative time scale in milliseconds and its correlation to the depth scale.

Проникновение сигнала по осадкам на 50–70 м недостаточно для того, чтобы значимо подсечь латеральное отклонение плоскости сместителя, если оно имеется.

Для анализа современных деформаций наиболее информативным является пространственное распределение дизъюнктивных нарушений верхней части осадочного чехла (рис. 5, 6). Интерпретация

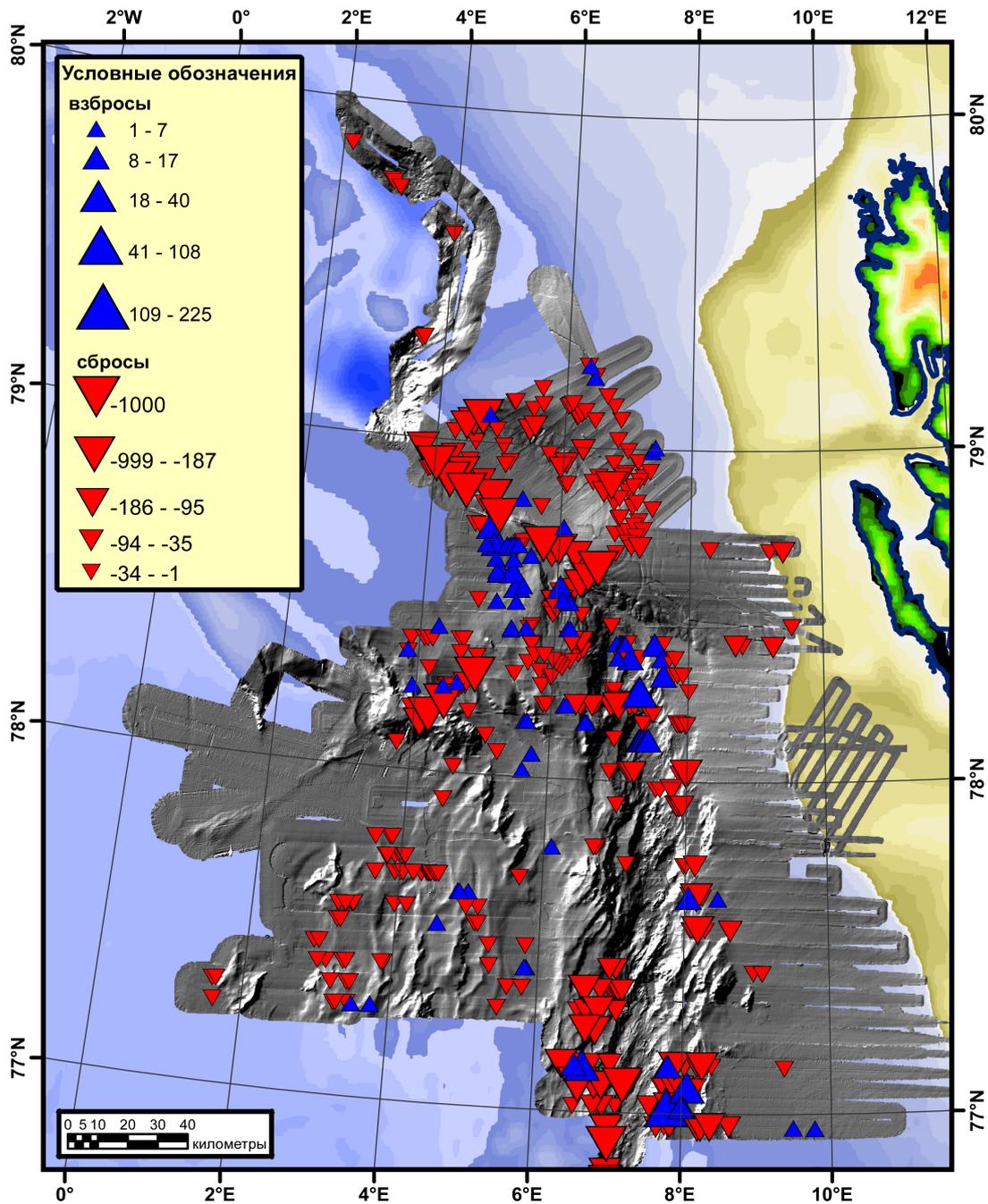


Рис. 5. Распределение взбросов и сбросов верхней части разреза осадочного чехла на северном сегменте хребта Книповича, по данным высокочастотного профилографа. Амплитуды нарушений указаны в метрах. Для сбросов значения отрицательны.

Fig. 5. The pattern of reverse and normal faults in the upper section of the sedimentary cover in the northern Knipovich Ridge, according to the high-frequency profiling data. Fault amplitudes are given in meters. The normal faults show the negative values.

распределения других точечных элементов выходит за рамки данной работы. Отметим, что субширотная ориентация галсов делает невозможным адекватное картирование нарушений, имеющих также субширотную ориентацию. 3D образ рельефа показал, что пропуски значимых деформаций из-за неполной системы наблюдений отсутствуют. Ос-

новные структуры дна расположены субперпендикулярно системе наблюдений.

Распределение сбросов и взбросов верхней части разреза северного и южного сегментов хребта Книповича (см. рис. 5; рис. 6) показывает, что дизъюнктивные нарушения группируются в мозаичные зоны, внутри которых они представлены преиму-

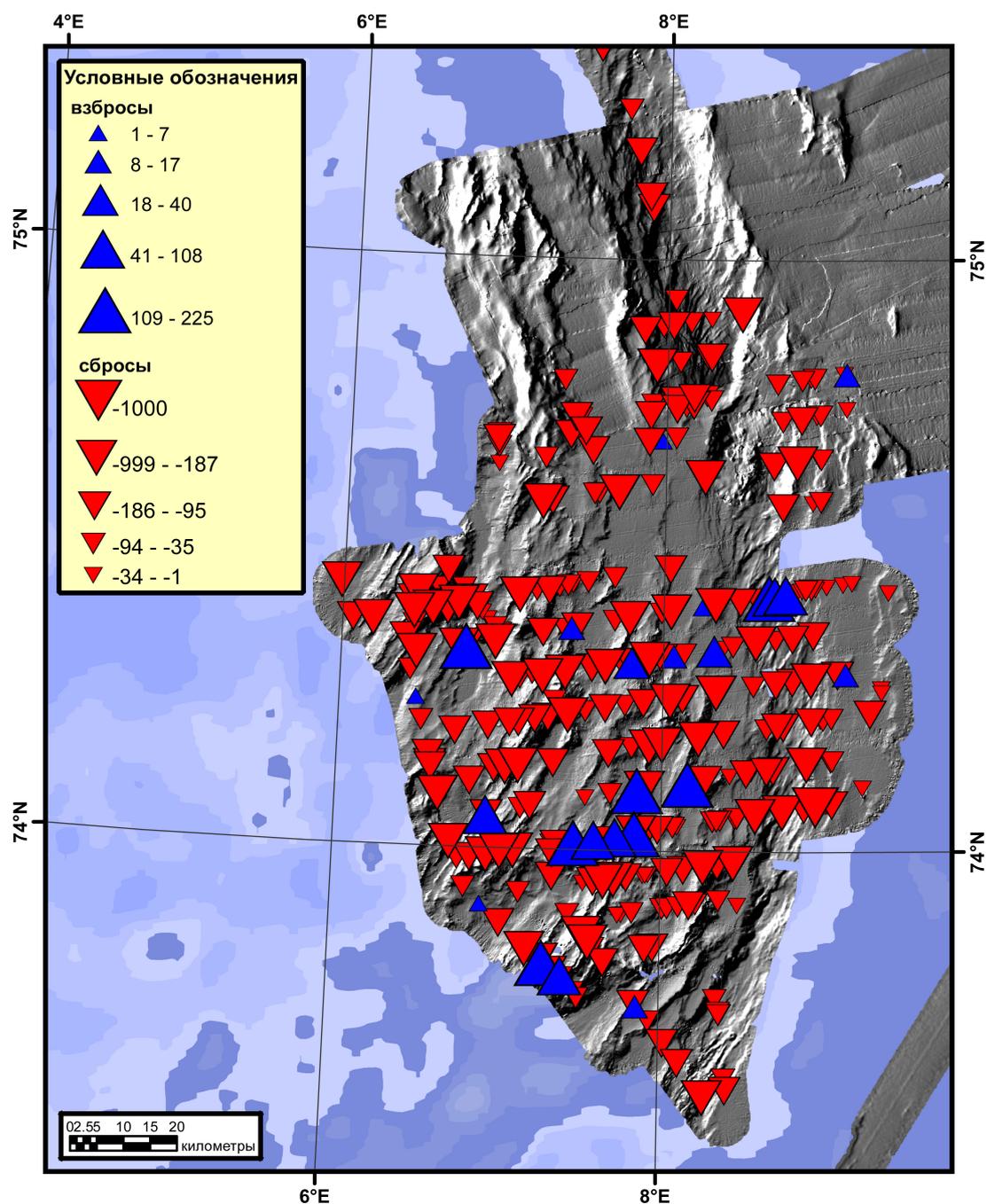


Рис. 6. Распределение взбросов и сбросов верхней части разреза осадочного чехла на южном сегменте хребта Книповича, по данным высокочастотного профилографа. Амплитуды нарушений указаны в метрах. Для сбросов значения отрицательны.

Fig. 6. The pattern of reverse and normal faults in the upper section of the sedimentary cover in the southern Knipovich Ridge, according to the high-frequency profiling data. Fault amplitudes are given in meters. The normal faults show the negative values.

щественно одним из двух типов [Sokolov et al., 2014]. Групп сбросов больше, чем групп взбросов, что вполне логично для района с рифтовой системой. Наиболее крупное скопление взбросов расположено на западном склоне хребта Книповича в зоне, примыкающей к активной части разлома Моллой на широте $\sim 78^{\circ}40'$ с.ш. Описанное распре-

деление групп с преимущественным типом (бинарное состояние – либо сброс, либо взброс) в рамках первичного представления материала [Sokolov et al., 2014] является неполной характеристикой закартированных нарушений. Необходим переход от карты типов к карте амплитуд дизъюнктивных нарушений. Для этой цели при оцифровке разло-

мов осуществлялось измерение амплитуд смещения фаз около плоскости сместителя.

4. ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ АМПЛИТУД ДИЗЪЮНКТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Главной сложностью расчета грида амплитуд (набора значений на регулярной пространственной сетке) является неравномерная пространственная плотность значений, полученных при оцифровке параметров разломной сети. Грид рельефа, например при расположении галсов, дающем сплошное покрытие дна полосой озвучивания, при размере ячейке грида 100×100 м в условиях абиссали обеспечен измерениями глубин в количестве от одной до пяти точек на ячейку. Внутри ячейки измерения осредняются. Такая плотность данных позволяет получать цифровую модель высокого качества без заполнения узлов грида интерполяцией между удаленными значениями. Другими словами, редкая плотность данных приводит к заполнению грида несуществующими значениями, для чего используются различные алгоритмы интерполяции. Поскольку данные почти всегда отличаются неполнотой той или иной степени, интерполяционный подход к построению цифровой модели является нормой. При использовании амплитуд дизъюнктивных нарушений для расчета грида наблюдается ситуация, в которой даже в условиях сплошной съемки рельефа дна координаты и амплитуды выявленных нарушений распределены неравномерно (см. рис. 5; рис. 6). В связи с этим создание цифровой модели вынужденно сопровождается заполнением большого числа ячеек грида интерполяцией между ячейками, обеспеченными данными. Для недопущения «аннигиляции» значений при осреднении в пределах ячейки близкорасположенных нарушений с разным знаком был выбран размер ячейки грида 1000 м. Он достаточно мал для площади $\sim 150 \times 150$ км, где минимальное расстояние между нарушениями составляет 2.0–2.5 км. Это позволяет избегать попадания в ячейку значений с разными знаками.

Среди множества алгоритмов интерполяции неравномерного облака значений на грид особо выделяется кригинг (kriging), разработанный специально для случаев с наличием пустот в облаке значений и больших пространств без данных. Реализация данного алгоритма в программном пакете Surfer (Golden Software, USA) весьма эффективна, но нуждается в устранении краевых эффектов в зонах, находящихся за пределами облака точек. Эта проблема легко устраняется при помощи обнуления соответствующих участков грида. Шаг пространственной дискретизации грида выбирается таким

образом, чтобы он был приблизительно в два раза плотнее, чем средние расстояния между оцифрованными нарушениями. Это соответствует подходу, основанному на теореме отсчетов Котельникова и распространенному на 2D данные, но без предварительной фильтрации высоких частот. Таким образом, обосновывается шаг по гриду, равный 1000 м. Полученные карты амплитуд дизъюнктивных нарушений для северной и южной части хребта Книповича представлены, соответственно, на рисунках 7 и 8.

Для карт параметров с сильной пространственной неравномерностью исходных данных и большим процентом ячеек с интерполированными значениями является необходимым показ исходного облака точек, использованных в расчетах, непосредственно на карте или отдельно от нее. По этой причине карты цифровых моделей рис. 7 и 8 предваряются картами данных рис. 5 и 6 с масштабированием амплитуд нарушений размером знака. Геодинамическая интерпретация может проводиться по обоим видам отображений.

Данный результат докладывался на конференциях [Sokolov, Abramova, 2015; Abramova et al., 2016], но в представленном виде публикуется впервые. Пока неясно, можно ли корректно пересчитать амплитуды вертикальной компоненты дизъюнктивных нарушений в карту скоростей вертикальных движений дна геодинамически активного района, поскольку разломы проникают на разную глубину, и временной диапазон действия разрывов не определен.

5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Борта хребта Книповича с обеих сторон осложнены группами дизъюнктивных нарушений (см. рис. 2–4) – сбросов и взбросов. Эти тектонические элементы, выявленные по данным высокочастотного профилографа, сгруппированы в области с характерным размером в первые десятки километров, внутри которых превалирует какой-либо один тип нарушения. Подобное распределение указывает на то, что в пределах этих областей может доминировать соответствующий тип напряжений. В данных условиях выявленные группы тектонических элементов представляют собой сложную суперпозицию зон сжатия и растяжения (см. рис. 7; рис. 8), которые формируются на спрединговом океаническом субстрате. Поскольку область расположена в зоне лавинной седиментации, неотектонические движения, нарушающие первичную стратификацию отложений, легко устанавливаются по нарушениям верхней части осадочного чехла.

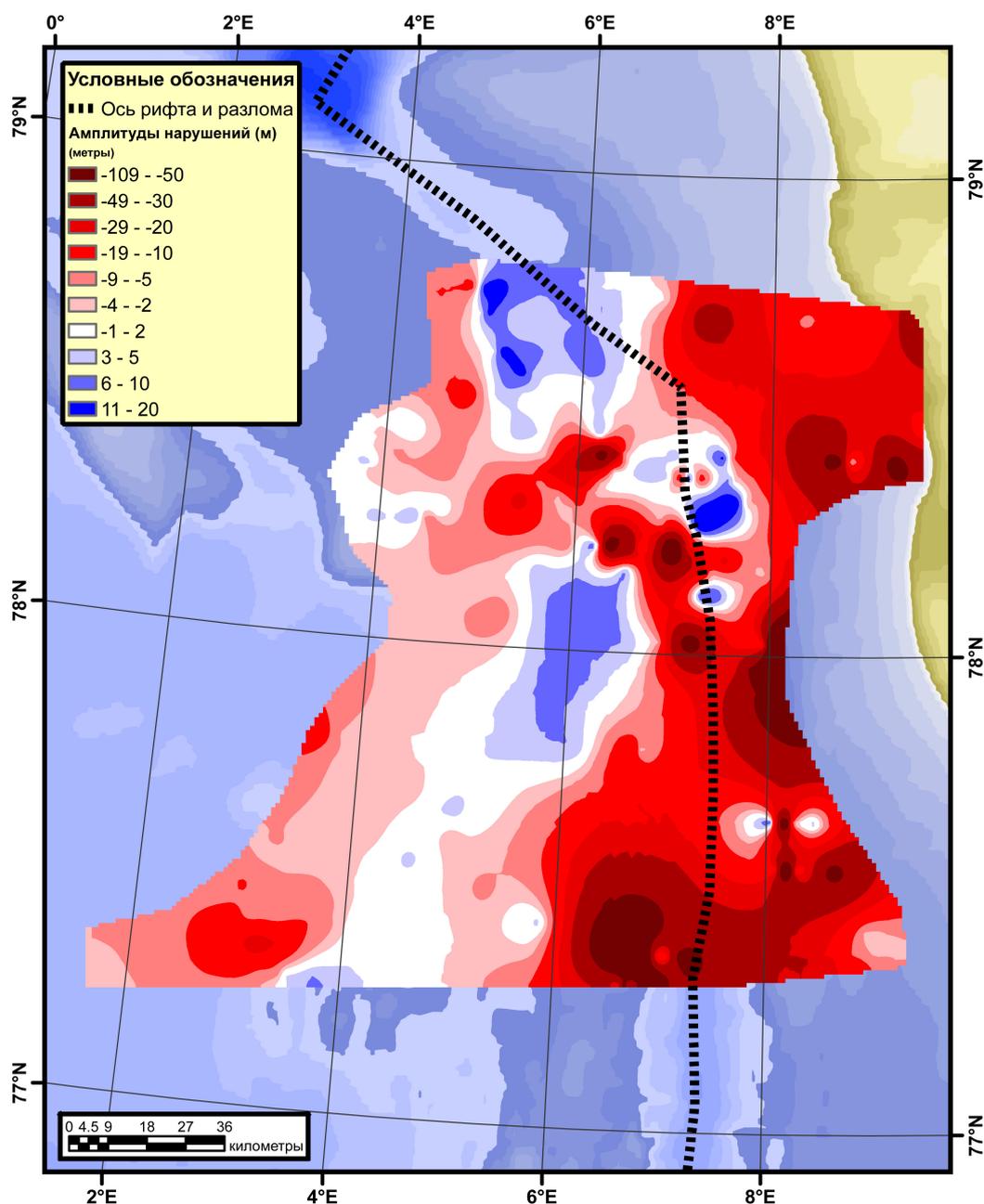


Рис. 7. Карта амплитуд дизъюнктивных нарушений верхней части осадочного чехла северной части хребта Книповича. Пунктиром показано положение оси САХ и офсетной части разлома Моллой.

Fig. 7. Map of the amplitudes of disjunctive dislocations in the upper sedimentary cover of the northern Knipovich Ridge. The dashed line shows the Mid-Atlantic Ridge axis and the offset portion of the Molloy fault.

Наличие в области стандартных элементов САХ – рифта и трансформной зоны – усложненной картины поля напряжений может быть проиллюстрировано механизмами очагов сильных землетрясений (рис. 9). Кроме обычного проявления сдвиговых механизмов вдоль трансформного разлома и механизмов растяжения вдоль оси САХ, являющегося фоновым типом сейсмичности, на юго-восточном и северо-западном флангах хребта Книповича проявлены взбросовые события. Азимут плоско-

стей смещения большинства событий растяжения вдоль хребта не совпадает с его осью. Наблюдается перпендикулярная ориентация трансформного разлома Моллой относительно хребта. Все это указывает на существенную асимметрию и неортогональное к САХ направление напряжений в этом сегменте дивергентной зоны Атлантики. Одним из способов объяснения данной картины может быть наличие и суперпозиция более чем одного фактора движения литосферных блоков.

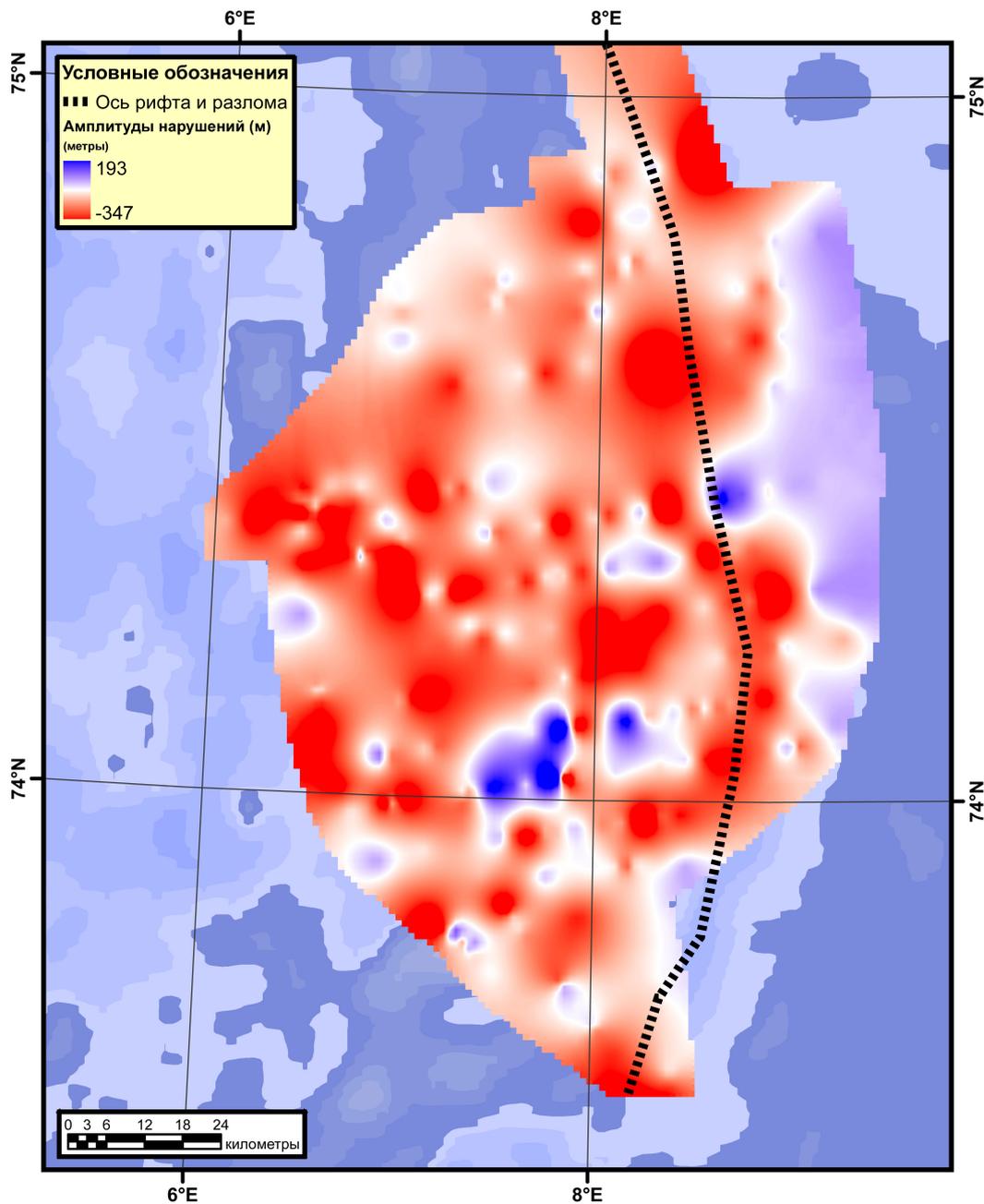


Рис. 8. Карта амплитуд дизъюнктивных нарушений верхней части осадочного чехла южной части хребта Книповича. Пунктиром показано положение оси САХ.

Fig. 8. Map of the amplitudes of disjunctive dislocations in the upper sedimentary cover of the southern Knipovich Ridge. The dashed line shows the Mid-Atlantic Ridge axis.

Известно, что вдоль линии простого сдвига образуется динамопара в виде сопряженного набора структур сжатия и растяжения около окончаний активной части с поворотной симметрией второго порядка [Kirmasov, 2011] (рис. 10). Исходя из этого, правосдвиговая природа трансформного разлома Моллой не вызывает дискуссий. Но в этом случае не ясно происхождение самого крупного скопления взбросов (см. рис. 7), которое находится в пределах углового поднятия на юго-восточном фланге ди-

намопары. В этом районе в пределах углового поднятия должны были быть структуры растяжения, а не структуры сжатия. Это, скорее всего, указывает на наличие дополнительной компоненты движения блоков плит, формирующей сложную суперпозицию вместе со смещением по активной части трансформного разлома Моллой. По нашему мнению, геодинамика района определяется двумя правосдвиговыми смещениями: вдоль разлома Моллой по направлению, существовавшему до перескока

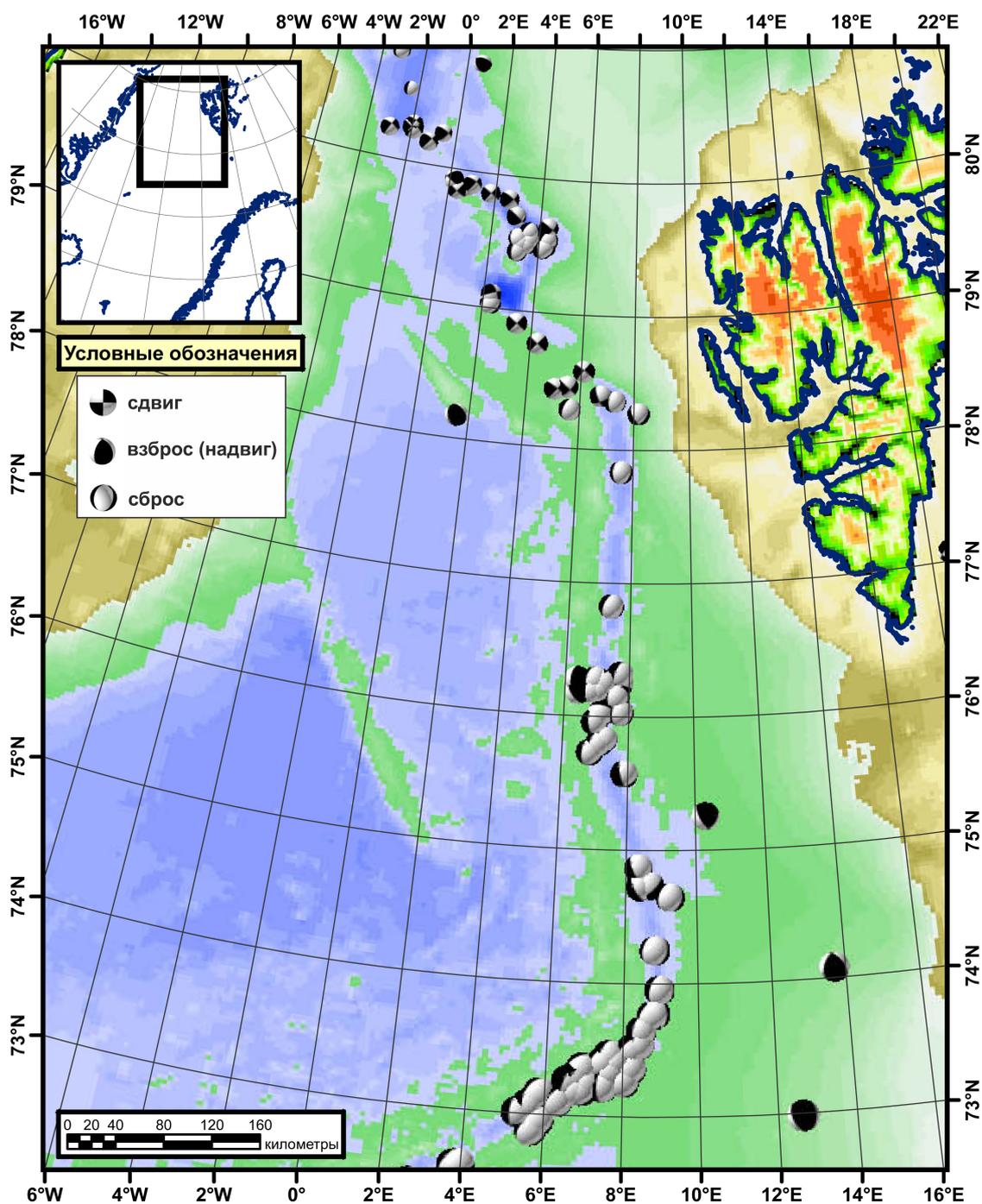


Рис. 9. Механизмы очагов сильных ($M > 4.7$) землетрясений по данным [Global Centroid Moment Tensor Project, 2014] в северном сегменте Атлантики.

Fig. 9. Mechanisms of strong earthquake foci ($M > 4.7$) in the North Atlantic sector, based on the data from [Global Centroid Moment Tensor Project, 2014]

активной части САХ, и вдоль линии, соединяющей спрединговые центры Мона и Гаккеля.

Рассмотрим литературные данные о физическом моделировании, которое может быть применено к геодинамической обстановке района. Заранее отметим, что модель сочетания двух сдвиговых смещений отсутствует. Кроме того, модель всегда

является сильным упрощением реальной обстановки и содержит неопределенность, связанную с отсутствием детальной структурной информации. В работе [Kokhan et al., 2012] приведены результаты эксперимента, в котором зона хребта Книповича рассматривалась как проявление косо́го спрединга. При заранее заданной ослабленной зоне,



Рис. 10. Динамопара в виде сопряженного набора структур сжатия и растяжения вдоль простого сдвига [Kirmasov, 2011].

Fig. 10. Dynamopair: a conjugate set of compression and extension structures along a simple strike-slip fault [Kirmasov, 2011].

соответствующей рифту, проводилось растяжение под разными углами от 10 до 50° между направлением растяжения и осью рифта. Структурным результатом в заданной зоне растяжения является система сдвиго-раздвигов, в которой доля сдвигов падает с увеличением угла. Этот эксперимент очень точно воспроизвел грядовый рельеф, сформированный эшелонированной системой трещин, закартированных внутри реального трога хребта Книповича (см. рис. 1) под углом к оси трога ~20°. Но при этом в реальности отсутствуют какие-либо признаки сдвиговых смещений этих гряд, полученные в ходе моделирования. Поскольку моделирование разных направлений растяжения рифта показало, что при больших углах доля сдвигов уменьшается, для реальной ситуации это может означать, что направление растяжения близко к перпендикулярно к хребту и ориентировано под углом ~45° к разлому Хорнсунн. Другими словами, рифт данного сегмента САХ является трещиной отрыва в сдвиговой зоне, и моделирование это подтверждает. С учетом того, что возраст пород, поднятых с борта рифта, указывает на невозможность существования спредингового центра в хребте Книповича, возникает вопрос, каким именно образом возникла эта ослабленная зона, по которой прошла трещина, вскрывшая олигоценные отложения, залегающие на спрединговом фундаменте. Этот вопрос эксперимент не раскрывает, поскольку

ослабленная зона может задаваться изначально как структура, имеющая разные углы к направлению растяжения.

Общую ориентацию и форму трещины, сходную с конфигурацией хребта Книповича относительно действующих сил, демонстрирует другой эксперимент, в котором проведен анализ данных распределения компонент поля напряжений в сдвиговых зонах [Bondarenko, Luchitsky, 1985], полученных несоосным приложением встречных сосредоточенных сил. На рис. 11 показаны формы трещин отрыва и мозаичный характер распределения амплитуд при использовании оптически активных материалов. Воспроизведены обстановки с увеличением ширины зоны сдвигания, образующейся в результате модельной ситуации. Судя по приведенным в работе [Bondarenko, Luchitsky, 1985] данным, при соотношении между шириной зоны и расстоянием между штампами, деформирующими среду, равном 1:3, формируется конфигурация трещины отрыва, сходная с формой трога хребта Книповича и углом его осевой части с направлением действия сил около 35°. Это значение близко к наблюдаемому в реальности (см. рис. 1), если считать приложением штампов давление от северного спредингового сегмента хребта Мона и смещение континентального блока к югу от спредингового сегмента Гаккеля (рис. 12) с шириной сдвиговой зоны между ними до 200 км. Приведенные экспериментальные данные точно воспроизводят сигмоидально изогнутую трещину отрыва, имеющую место в реальной структуре хребта Книповича, а также области максимальных амплитуд напряжений, в которых ожидается проявление дизъюнктивных нарушений. На наш взгляд, использование модели с противоположно направленными штампами для имитации обстановки хребта Книповича вполне оправданно, поскольку в тектонике плит одной из главных действующих сил тектогенеза срединно-океанического хребта (СОХ) считается давление хребта (ridge push) [Khain, Lomize, 2005]. Эта точка зрения в настоящий момент поддерживается многими, хотя основные положения теории часто модифицируются. Модель [Bondarenko, Luchitsky, 1985] не объясняет, почему на северо-западном обрамлении хребта Книповича в области максимума напряжений сформированы именно взбросовые нарушения. Но мы не ожидаем точного воспроизведения в модели всех реальных условий, особенно для случая взаимодействия двух сдвиговых смещений.

Таким образом, рассмотрение физических модельных аналогов указывает на то, что рифт хребта Книповича является не просто частью системы простого правого сдвига субмеридиональной ориентации с элементами растяжения [Crane et al., 2001; Sokolov et al., 2014] и другими элементами

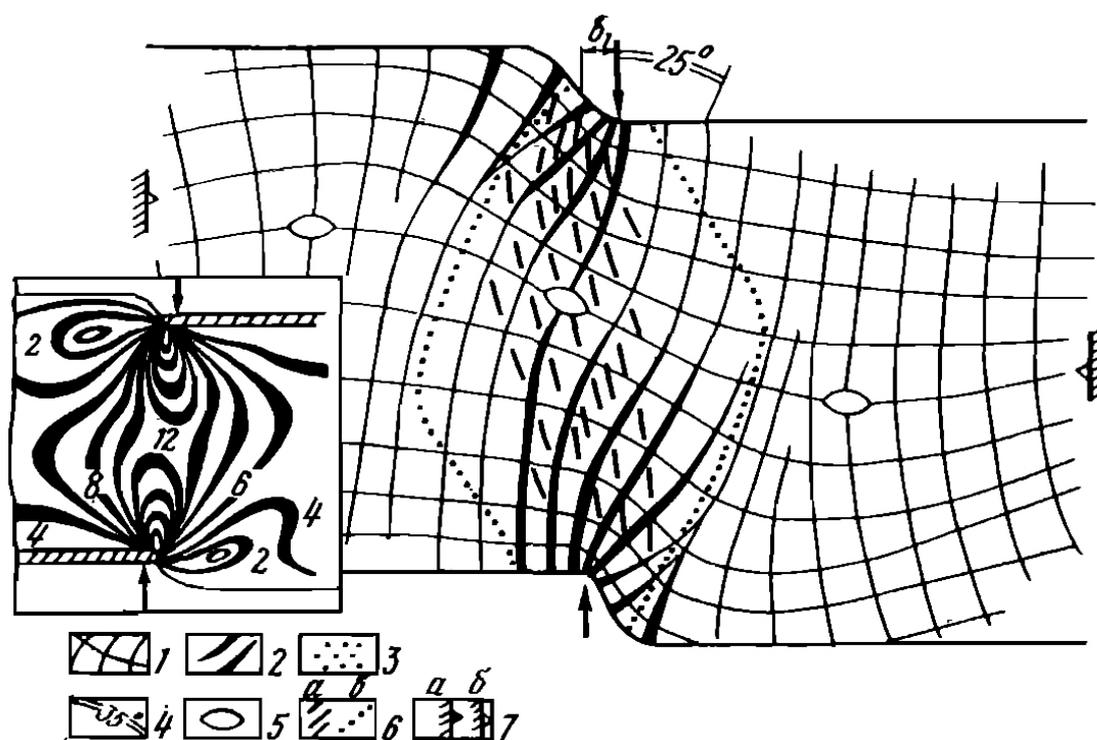


Рис. 11. Положение зоны скалывания в модели сдвига, образующегося в результате несоосного приложения встречных сосредоточенных сил при малой ширине зоны сдвига без бокового сжатия [Bondarenko, Luchitsky, 1985] с изменениями. На врезке показана картина изохром и их порядок.

1 – траектории нормальных напряжений; 2 – положение возможных трещин растяжения; 3 – область концентрации наибольших скалывающих напряжений, обусловленных парой сил (зона скалывания); 4 – углы между осевой зоной области сдвига и направлением действующих усилий при различной ширине зоны сдвига (b_{1-3}); 5 – положение осей эллипсоида напряжений; 6 – направление трещин скалывания (а) и границы зон скалывания (б); 7 – боковое сжатие (а) и неподвижная боковая поддержка (б).

Fig. 11. Shear zone in the strike-slip fault model. In this model, faulting is caused by the counter-oriented concentrated forces; the force axes are misaligned; the shearing zone is small; lateral compression is lacking (modified after [Bondarenko, Luchitsky, 1985]). The inset shows isochromatic curves and their order.

1 – normal stress trajectories; 2 – positions of possible extension fractures; 3 – area wherein the highest shear stresses caused by a pair of forces (shear zone) are concentrated; 4 – angles between the axial zone of the shear area and the directions of the active forces for different widths of the strike-slip zone (b_{1-3}); 5 – positions of the stress ellipsoid axes; 6 – directions of shear fractures (a) and boundaries of shear zones (b); 7 – lateral compression (a) and fixed lateral support (b).

сдвигового парагенеза [Kirmasov, 2011]. Указанная обстановка реализуется в весьма широкой (до 200 км) зоне, внутри которой, кроме формирования рифта, происходит процесс активизации структур восточного борта хребта Книповича. В модельной обстановке в северо-западной части зоны субмеридионального сдвига образуется локальная аномалия напряжений (см. рис. 11, врезка). Такую же зону мы получили в результате анализа дизъюнктивных взбросовых нарушений верхней части осадочного разреза (см. рис. 7). Это подтверждает наличие сложной тектонической структуры в результате суперпозиции в северной части хребта Книповича двух сдвиговых систем.

Для узловых областей сдвиговой системы, согласно имеющимся съёмочным данным (см. рис. 1),

были рассчитаны карты амплитуд нарушений (см. рис. 7, 8), их положение показано на принципиальной тектонической схеме (рис. 12), в которой представлен синтез различных фактов, рассмотренных в нашей работе. Геометрия большой сдвиговой зоны между хребтами Гаккеля и Мона в сочетании с относительно более мелкой сдвиговой зоной по трансформному разлому Моллой такова [Sokolov, 2011], что объяснение распределения амплитуд нарушений в областях картирования становится рациональным при следующих положениях. Рифт хребта Книповича является трещиной отрыва сдвиговой зоны шириной до 200 км, расположенной под углом в $\sim 35-45^\circ$ к магистральному направлению сдвига между сегментами СОХ от хребта Мона до хребта Гаккеля. При этом в нем в

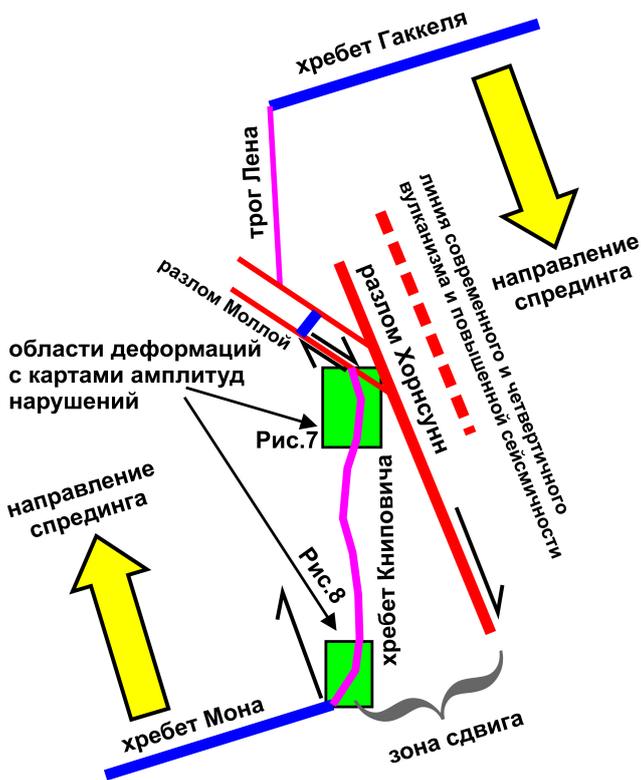


Рис. 12. Принципиальная схема современной тектоники дивергентных структур северной части Атлантики и Арктики (по [Sokolov et al., 2014], с изменениями).

Fig. 12. Schematic diagram showing the modern tectonics of the divergent structures in North Atlantic and Arctic (modified after [Sokolov et al., 2014]).

обстановке пулл-апарт формируется локальный рифт, состоящий из нескольких впадин. На северо-западный фланг хребта Книповича наложено действие сдвига по разлому Моллой как дополнительного тектонического фактора. Это объясняет преимущественную концентрацию сбросовых нарушений вдоль флангов хребта Книповича и взбросовых – на угловом поднятии к югу от разлома Моллой. Таким образом, современное распределение поля напряжений в северной части хребта Книповича является сложной суперпозицией двух праводвиговых систем – активной части разлома Моллой и хребта Книповича, создающих наблюдаемую мозаику поля напряжений, выраженную в сети дизъюнктивных нарушений. В южной части хребта Книповича значимых отклонений от теоретического распределения деформаций и дизъюнктивных нарушений не обнаружено.

Согласно концепции тектоники района, представленной на рисунке 12, текущий момент развития заключается в переходе трансферных элементов между спрединговыми центрами Мона и Гаккеля к наиболее короткой траектории между их окончаниями. Данная логика развития региона обосновывалась в работе [Crane et al., 2001], что вполне рационально с точки зрения устранения несоответствия угловых соотношений тектонических элементов разломов Моллой и Шпицберген и ограниченного ими короткого рифтового сегмента со структурами трога Лена и хребта Книповича. Спрявлению должен подвергнуться сегмент САХ к

северу от разлома Моллой, а окончание хребта Мона должно выдвинуться на восток [Crane et al., 2001]. По нашим данным, включающим, в отличие от других работ, сейсмоакустические разрезы верхней части осадочного чехла и площадное картирование его нарушений, на это указывают сбросовые деформации осадочного чехла восточного борта хребта Книповича, проникающие до 60 км на восток от оси хребта [Zayonchek et al., 2010]. Указанные последствия этой концепции трудно проверить, но современное асимметричное распределение сейсмичности на восточном борту хребта Книповича (рис. 13), по данным [NORSAR..., 2012], свидетельствует о том, что этот фланг испытывает существенную тектоническую активизацию между современной осью хребта и линией, ортогонально соединяющей крупные спрединговые центры.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карта амплитуд современных дизъюнктивных нарушений по результатам работ с высокочастотным профилографом в глубоководной части океана по площадной системе наблюдений представлена впервые. Полученная картина амплитуд нарушений иллюстрирует мозаичное распределение областей сжатия и растяжения на флангах рифтовой системы Книповича. При этом отмечается чередование высокоамплитудных сбросов и взбросов. Нетривиальной особенностью распределения ампли-

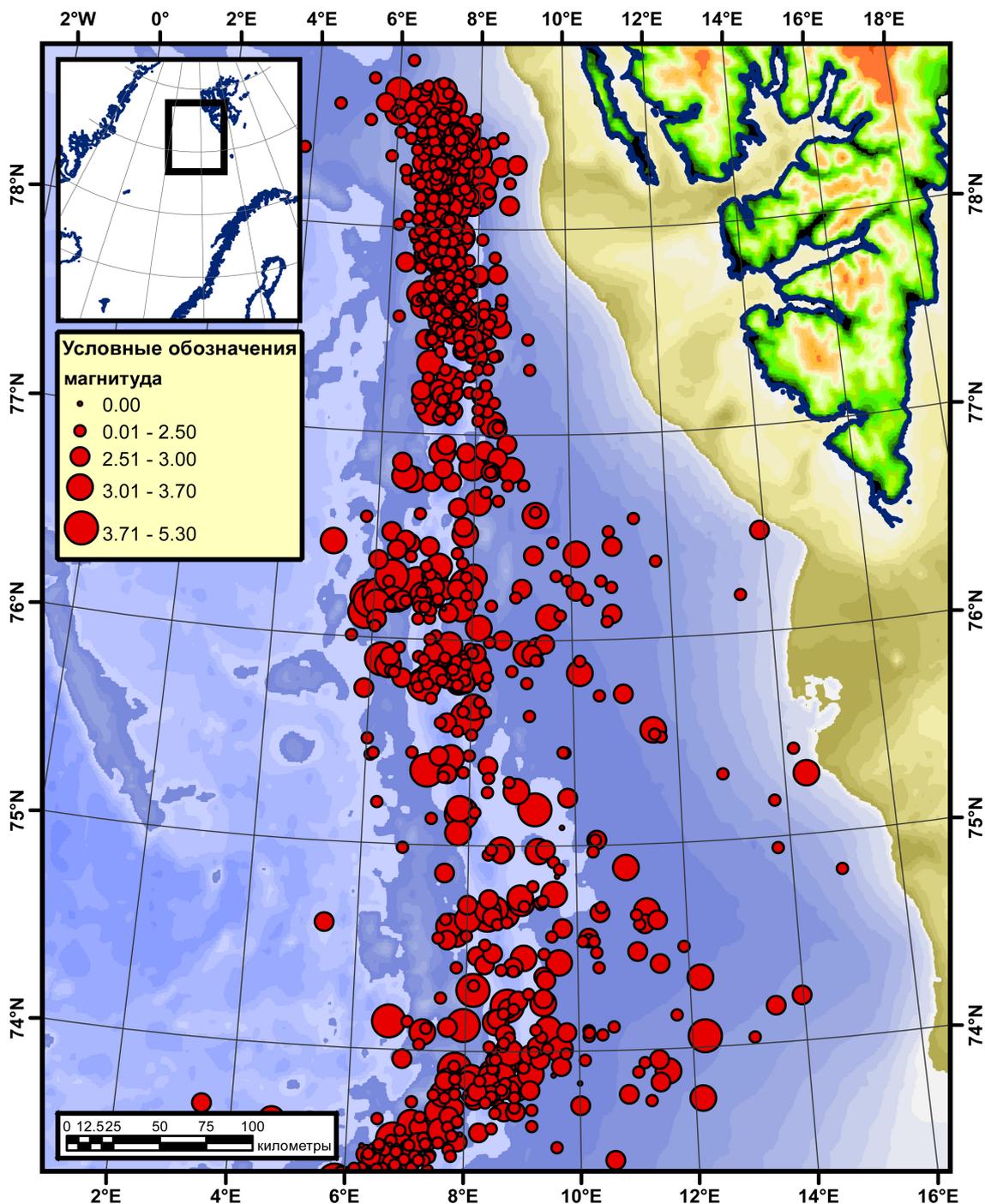


Рис. 13. Эпицентры землетрясений по данным [NORSAR..., 2012] в районе хребтов Книповича и Мона.

Fig. 13. Earthquake epicenters in the Knipovich and Mona ridges [NORSAR..., 2012].

туд является положительная область на юго-восточном фланге разлома Моллой.

Картина напряжений сформирована сочетанием двух правосдвиговых смещений: вдоль трансформного разлома Моллой и вдоль правосдвиговой широкой зоны между разломом Хорнсун и северным флангом хребта Мона. Эти смещения формируют современную структуру хребта Книповича как локальный рифт в обстановке пулл-апарт.

Зарождающийся по трещине отрыва хребта Книповича новый спрединговый центр в текущий момент, вероятно, будет иметь косую ориентацию и нетрансформную зону перехода между структурами хребтов Книповича и Мона.

Механизмы очагов сильных землетрясений взбросового типа на флангах хребта Книповича указывают на зоны возможного формирования складок в структурном парагенезе сдвиговой зоны.

Логика тектонической эволюции рассмотренного сегмента такова, что он, по всей видимости, будет трансформирован в единый сдвиговый разрыв, перпендикулярный главным срединным центрам Мона и Гаккеля. Это подтверждается тектонической активизацией юго-восточного фланга хребта Книповича, выраженной в асимметрии эпицентров слабых землетрясений, и характером нарушений верхней части осадочного чехла на восточном фланге.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны экипажу НИС «Академик Николай Страхов» за самоотверженную работу в

тяжелых условиях Крайнего Севера, в которых был получен использованный в статье материал. Работа выполнена в рамках темы «Оценка связи рельефа дна Атлантического и запада Северного Ледовитого океана, деформаций осадочного чехла, процессов дегазации и опасных геологических явлений с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии» (государственная регистрация № 01201459183), а также при поддержке РФФИ (проекты № 15-05-05888, 16-35-00596 и 16-35-00591 мол_а), программ Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» (П.3П) и «Мировой океан – многомасштабность, многофазность, многопараметричность» (3П).

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Abramova A.S., Sokolov S.Yu., Moroz E.A.*, 2016. Mapping of neotectonic elements in the mid-ocean ridge based on high-frequency profiling data. In: D.E. Dorechkina (Ed.), *New data on geology and geophysics of Arctic, Antarctic and Global ocean. Proceedings of the 5th international conference of young scientists and specialists, dedicated to the 100th jubilee of V.N. Sokolov.* VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, p. 80–81 (in Russian) [*Абрамова А.С., Соколов С.Ю., Мороз Е.А.* Картирование неотектонических элементов в условиях срединно-океанического хребта по данным высокочастотного профилографа // Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана: Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 100-летию со дня рождения В.Н. Соколова / Ред. Д.Е. Доречкина. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2016. С. 80–81].
- Bondarenko P.M., Luchitsky I.V.*, 1985. Strike-slip faults and shear zones in tectonic stress fields. In: I.V. Luchitsky, P.M. Bondarenko (Eds.), *Experimental tectonics in theoretical and applied geology.* Nauka, Moscow, p. 159–182 (in Russian) [*Бондаренко П.М., Лучицкий И.В.* Сдвиги и зоны скалывания в тектонических полях напряжений // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии / Ред. И.В. Лучицкий, П.М. Бондаренко. М.: Наука, 1985. С. 159–182].
- Bugrova E.M., Gusev E.A., Tverskaya L.A.*, 2001. Oligocene rocks of Knipovich Ridge. In: *Geology of seas and oceans. Abstracts of the 14th International School of Marine Geology. Vol. I.* GEOS, Moscow, p. 28–29 (in Russian) [*Бугрова Э.М., Гусев Е.А., Тверская Л.А.* Олигоценовые породы хребта Книповича // Геология морей и океанов: Тезисы докладов XIV Международной школы морской геологии. М.: ГЕОС, 2001. Т. I. С. 28–29].
- Crane K., Doss H., Vogt P., Sundvor E., Cherkashov G., Poroshina I., Joseph D.*, 2001. The role of the Spitsbergen shear zone in determining morphology, segmentation and evolution of the Knipovich Ridge. *Marine Geophysical Researches* 22 (3), 153–205. <https://doi.org/10.1023/A:1012288309435>.
- Escartín J., Cowie P.A., Searle R.C., Allerton S., Mitchell N.C., MacLeod C.J., Slootweg A.P.*, 1999. Quantifying tectonic strain and magmatic accretion at a slow spreading ridge segment, Mid-Atlantic Ridge, 29°N. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104 (B5), 10421–10437. <https://doi.org/10.1029/1998JB900097>.
- Global Centroid Moment Tensor Project*, 2014. On-line Bulletin. Available from: <http://www.globalcmt.org> (last accessed June 10, 2014).
- Gusev E.A., Shkarubo S.I.*, 2001. The anomalous structure of Knipovich Ridge. *Russian Journal of Earth Sciences* 3 (2), 145–161. <https://doi.org/10.2205/2001ES000056>.
- Khain V.E., Lomize M.G.*, 2005. *Geotectonics and Fundamentals of Geodynamics.* KDU, Moscow, 560 p. (in Russian) [*Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.].
- Kirmasov A.B.*, 2011. *Fundamentals of Structural Analysis.* Nauchny Mir, Moscow, 368 p. (in Russian) [*Кирмасов А.Б.* Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.].
- Kokhan A.V., Dubinin E.P., Grokholsky A.L., Abramova A.S.*, 2012. Kinematics and characteristic features of the morphostructural segmentation of the Knipovich Ridge. *Oceanology* 52 (5), 688–699. <https://doi.org/10.1134/S0001437012050098>.
- Mosar J., Eide E.A., Osmundsen P.T., Sommaruga A., Torsvik T.H.*, 2002. Greenland–Norway separation: a geodynamic model for the North Atlantic. *Norwegian Journal of Geology* 82 (4), 281–298.
- NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin*, 2012. Available from: <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/regional/> (last accessed September 22, 2012).

- Olesen O.G., Gellein J., Habrekke H., Kihle O., Skilbrei J.R., Smethurst M.A., 1997. Magnetic Anomaly Map, Norway and Adjacent Ocean Areas. Scale 1:3000000. Geological Survey of Norway, Trondheim.
- Peive A.A., Chamov N.P., 2008. Basic tectonic features of the Knipovich Ridge (North Atlantic) and its neotectonic evolution. *Geotectonics* 42 (1), 31–47. <https://doi.org/10.1134/S0016852108010044>.
- Shipilov E.V., 2004. Tectono-geodynamic evolution of Arctic continental margins during epochs of young ocean formation. *Geotectonics* 38 (5), 343–365.
- Sokolov S.Y., 2011. Tectonic evolution of the Knipovich Ridge based on the anomalous magnetic field. *Doklady Earth Sciences* 437 (1), 343–348. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11030275>.
- Sokolov S.Y., Abramova A.S., 2015. Mapping of vertical amplitudes of faults in the deep ocean according to high-frequency profiling data. In: *Geology of seas and oceans. Proceedings of the 21st International Scientific Conference (School) on Marine Geology. Vol. V. GEOS, Moscow, p. 252–255 (in Russian)* [Соколов С.Ю., Абрамова А.С. Картирование вертикальных амплитуд разломов в глубоководной части океана по данным высокочастотного профилографа // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. М.: ГЕОС, 2015. С. 252–255].
- Sokolov S.Y., Abramova A.S., Mazarovich A.O., Zaraiskaya Yu.A., Dobrolyubova K.O., 2013. Geodynamic interpretation of faults in the northern Knipovich Ridge. In: *Geologic history, possible mechanisms and problems of formation of depressions with suboceanic and anomalously thin crust in provinces with continental lithosphere. Proceedings of the 45th Tectonic Meeting. GEOS, Moscow, p. 212–214 (in Russian)* [Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Мазарович А.О., Зарайская Ю.А., Добролюбова К.О. Геодинамическая интерпретация разломов северной части хребта Книповича // Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой: Материалы XLV Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2013. С. 212–214].
- Sokolov S.Y., Abramova A.S., Zaraiskaya Yu.A., Mazarovich A.O., Dobrolyubova K.O., 2014. Recent tectonics in the northern part of the Knipovich Ridge, Atlantic ocean. *Geotectonics* 48 (3), 175–187. <https://doi.org/10.1134/S0016852114030066>.
- Tevelev A.V., 2005. *Tectonics of Shearing. Publishing House of Moscow State University, Moscow, 254 p. (in Russian)* [Тевелев А.В. Сдвиговая тектоника. М.: Изд-во МГУ, 2005. 254 с.].
- Verba V.V., Avetisov G.P., Sholpo L.Ye., Stepanova T.V., 2000. Basalts geodynamics and magnetism of the Knipovich underwater ridge (Norway – Greenland basin). *Russian Journal of Earth Sciences* 2 (3–4), 303–312 (in Russian) [Верба В.В., Аветисов Г.П., Шолпо Л.Е., Степанова Т.В. Геодинамика и магнетизм базальтов подводного хребта Книповича (Норвежско-Гренландский бассейн) // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 3–4. С. 303–312]. <https://doi.org/10.2205/2000ES000047>.
- Yampol'sky K.P., 2011. New data on the structure of the Knipovich Ridge, North Atlantic. *Geotectonics* 45 (2), 113–126. <https://doi.org/10.1134/S0016852111020063>.
- Zaraiskaya Yu.A., 2016. *Geomorphology, Seismicity and Neotectonics of the Mid-Oceanic Ridge in the Norwegian-Greenland Basin and the Fram Strait. Brief Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). GIN RAS, Moscow, 31 p. (in Russian)* [Зарайская Ю.А. Геоморфология, сейсмичность и неотектоника срединно-океанического хребта в Норвежско-Гренландском бассейне и проливе Фрама: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 2016. 31 с.].
- Zayonchek A.V., Brekke H., Sokolov S.Yu., Mazarovich A.O., Dobrolyubova K.O., Efimov V.N., Abramova A.S., Zaraiskaya Yu.A., Kokhan A.V., Moroz E.A., Peive A.A., Chamov N.P., Yampolsky K.P., 2010. Structure of the continent-ocean transition zone in the northwestern Barents Sea frame (according to the data collected in cruises 24, 25 and 26 of the R/V Akademik Nikolai Strakhov in 2006–2009). In: Yu.G. Leonov (Ed.), *Structure and evolution of the lithosphere. Russia's contribution to the International Polar Year. Vol. 4. Paulsen, Moscow. P. 111–157 (in Russian)* [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. Структура зоны перехода континент-океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24, 25 и 26-го рейсов НИС «Академик Николай Страхов», 2006–2009 гг.) // Структура и история развития литосферы. Вклад России в Международный Полярный Год. Том. 4 / Ред. Ю.Г. Леонов. М.: Paulsen, 2010. С. 111–157].



Соколов Сергей Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.
Геологический институт РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия
Тел.: +7-926-5675640; ✉ e-mail: sokolov@yandex.ru

Sokolov, Sergey Yu., Candidate of Physics and Mathematics, Lead Researcher
Geological Institute of RAS
7 Pyzhevsky Lane, Moscow 119017, Russia
Tel.: +7-926-5675640; ✉ e-mail: sokolov@yandex.ru



Абрамова Анастасия Сергеевна, м.н.с.
Геологический институт РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия
Тел.: +7-909-9282827; e-mail: abramanastas@gmail.com

Abramova, Anastasia S., Junior Researcher
Geological Institute of RAS
7 Pyzhevsky Lane, Moscow 119017, Russia
Tel.: +7-909-9282827; e-mail: abramanastas@gmail.com



Мороз Евгений Андреевич, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Геологический институт РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия
Тел.: +7-965-2071460; e-mail: morozzea@gmail.com

Moroz, Evgenii A., Researcher
Geological Institute of RAS
7 Pyzhevsky Lane, Moscow 119017, Russia
Tel.: +7-965-2071460; e-mail: morozzea@gmail.com



Зарайская Юлия Андреевна, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Геологический институт РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия
Тел.: +7-926-8471691; e-mail: geozar@yandex.ru

Zarayskaya, Yulia A., Junior Researcher
Geological Institute of RAS
7 Pyzhevsky Lane, Moscow 119017, Russia
Tel.: +7-926-8471691; e-mail: geozar@yandex.ru