

УДК 551.24

НЕОТЕКТЕНИКА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА БАРЕНЦЕВА МОРЯ: СЕЙСМИЧНОСТЬ, РАЗЛОМЫ И ВОЗДЕЙСТВИЕ АТЛАНТИКО-АРКТИЧЕСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

© 2024 г. С. Ю. Соколов^{а, *}, А. С. Абрамова^а, С. И. Шкарубо^б,
Р. А. Ананьев^с, Е. А. Мороз^а, Ю. А. Зарайская^а

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

^бАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция»,

ул. Софьи Перовской, 26, Мурманск, 183038 Россия

^сИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН,

Нахимовский просп., 36, Москва, 117218 Россия

*e-mail: sysokolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.04.2023 г.

После доработки 12.10.2023 г.

Принята к публикации 20.10.2023 г.

В работе проанализирована сейсмичность в пределах шельфа Баренцева моря, обрамляющих его хребтах Книповича и Гаккеля, проведено сравнение ее пространственного распределения с разломной сетью, установленной по данным сейсморазведки, и получены кинематические характеристики пространственной миграции сейсмической активности. Показано, что сейсмические события, зарегистрированные норвежской региональной сетью NORSAR в пределах Российской части шельфа Баренцева моря, группируются в линейные кластеры вдоль разломов сдвиговой кинематики. Разломная сеть смещает мезозойские сейсмокомплексы и выходит на поверхность дна, смещая четвертичные отложения, что однозначно указывает на современный возраст нарушений, вдоль которых сгруппированы линейные кластеры слабой сейсмичности. Расчет суммарного сейсмического момента в пространственно-временном измерении показал наличие миграции сейсмической активности вдоль коротких фрагментов разломов на шельфе со скоростями от 10.5 до 25.7 км/год. Отмечен всплеск общей активности в районе шельфа начиная с 2012 г. Сопоставление временной эволюции сейсмической активности на шельфе с фрагментами Атлантико-Арктической рифтовой системы дает основания полагать, что она является воздействием тектонических деформационных волн, возбуждаемых вдоль геодинамически активной межплитной границы и распространяющихся на шельф со скоростью 20–22 км/год. Менее вероятна скорость миграции со скоростями до 77 км/год. Существует возможность, что увеличение интенсивности сейсмической активности на шельфе после 2012 г. является не эмиссией от воздействия медленной деформационной волны, а результатом прямого триггерного воздействия на шельф со стороны структур хребтов Книповича и Гаккеля.

Ключевые слова: сейсмичность, хребты Книповича и Гаккеля, неотектоника, Баренцево море, сейсмические разрезы, разломная сеть, скорость миграции сейсмической активности

DOI: 10.31857/S0203030624010066, **EDN:** PUXKKM

ВВЕДЕНИЕ

Тема нашего исследования неотектоники в пределах восточной части шельфа Баренцева моря связана с наличием геодинамически активного обрамления его акватории и переходной зоны континент–океан (рис. 1).

С северо-запада вблизи континентальных окраин пассивного типа и шельфов Евразии расположены два практически перпендикулярных друг другу сегмента Атлантико-Арктической рифтовой системы (ААРС) — хребет Книповича (с трогом Лена) и хребет Гаккеля.

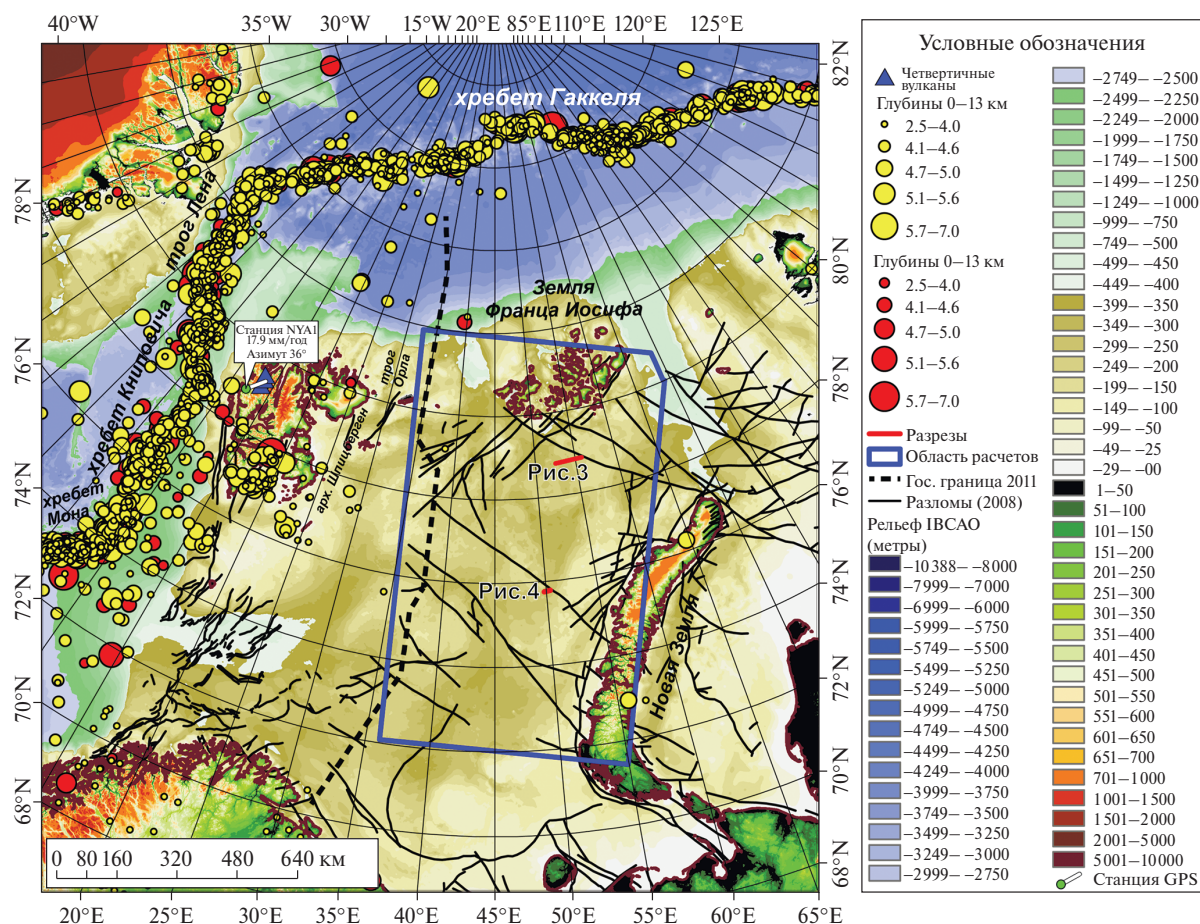


Рис. 1. Сейсмичность северо-западного обрамления шельфа Баренцева моря по данным (USGS, 2022) для событий с магнитудой >2.5 отдельно для интервалов глубин 0–13 и 13–40 км, разломная сеть по данным [Harrison et al., 2008], четвертичные вулканы по данным [Сироткин, Шарин, 2000] и параметры движения станции GPS NYA1 по данным [Heflin et al., 2020; GPS ..., 2022].

Показаны: область расчетов пространственно-временной эволюции суммарного момента слабых сейсмических событий по данным [NORSAR..., 2022] за период 2001–2020 гг. (синий прямоугольник) и положение фрагментов разрывов (красные линии). Топоснова приведена по данным IBCAO [Jakobsson et al., 2020].

По данным [USGS ..., 2022] они характеризуются интенсивным проявлением сейсмичности, типичным для структур растяжения срединно-океанических хребтов. На архипелаге Шпицберген установлены четвертичные вулканы [Сироткин, Шарин, 2000] и горизонтальные смещения на поверхности литосферы по данным GPS [Heflin et al., 2020; GPS ..., 2022] со скоростью 17.9 мм/год и азимутом 36° (см. рис. 1). Еще одним признаком активной геодинамики в пределах шельфа является наличие аномально горячей мантии под архипелагом Шпицберген и его окрестностями [Gas et al., 2016], что абсолютно нетипично для шельфовых континентальных областей Арктики [Яковлев и др., 2012]. Это подтверждается рифтогенными значениями теплового потока,

измеренного в трое Орла в 25-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов”, равного 550 мВт/м^2 , что в ~ 8 раз превышает фоновые значения для шельфов [Хуторской и др., 2009]. По региональным сейсмотомографическим данным [Bungum et al., 2005] под северо-западной угловой частью шельфа Баренцева моря расположена депрессия изоповерхности скоростей Р-волн 8.3 км/с [Соколов и др., 2023a], также указывающая на необычное реологическое состояние мантии под континентальным регионом.

Особенностью восточной части шельфа также является разломная сеть [Harrison et al., 2008], надежно установленная по данным структурной сейсморазведки и полностью представленная на Государственных геологических картах

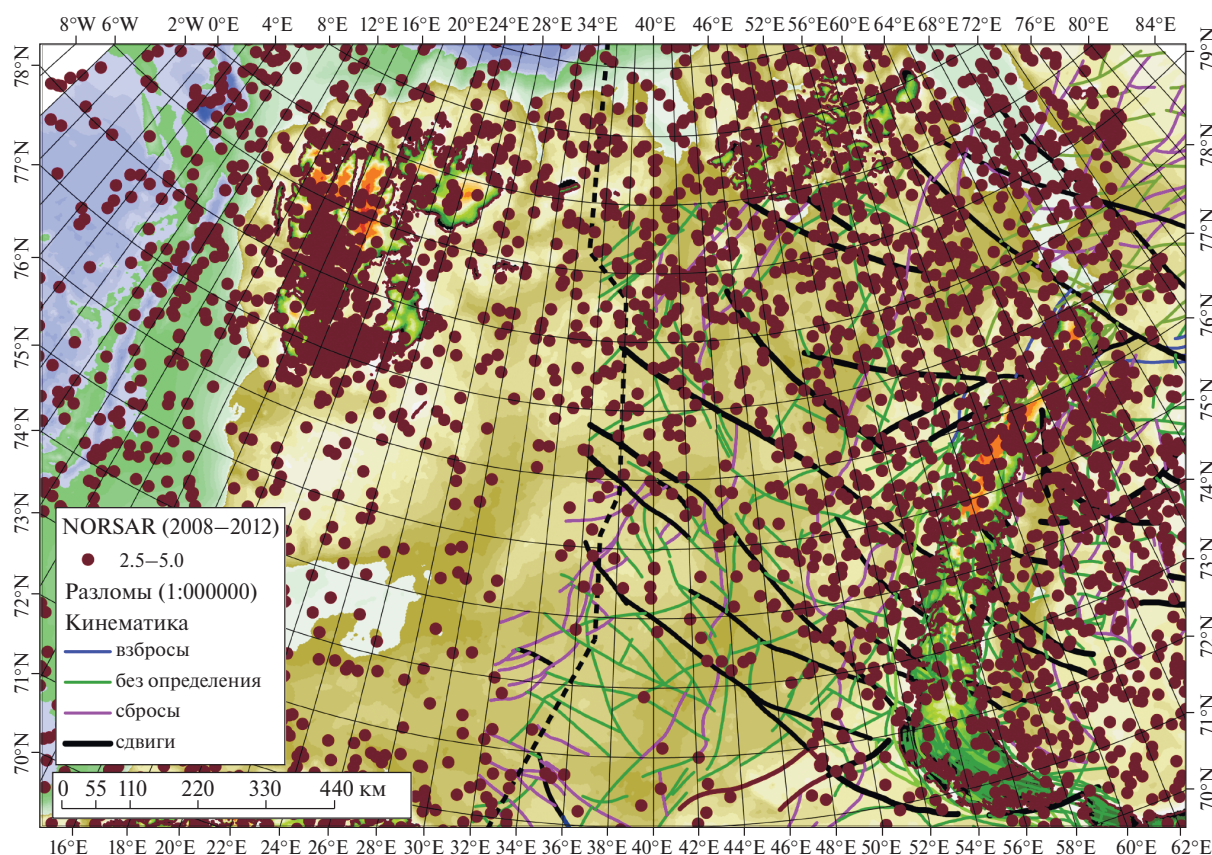


Рис. 2. Сейсмичность шельфа Баренцева моря по данным [NORSAR ..., 2022] за период с 2008 по 2012 гг. для событий с магнитудой >2.5 , разломная сеть по ГИС данным Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (новая серия) с дифференциацией разломов по кинематическому типу по [Карта ..., 2004].

масштаба 1:1000000 для восточной части Баренцева моря [Карта ..., 2004]. Она содержит протяженные левосдвиговые разломы, ориентированные под углом $\sim 45^\circ$ к континентальной окраине (см. рис. 1). Рисовка разломов в Норвежской части акватории прерывается из-за недостаточной информации, учтенной в международной геологической карте [Harrison et al., 2008]. Сравнение сдвигов с глубинными мантийными срезами томографической модели [Bungum et al., 2005], сделанное в работе [Соколов и др., 2023a], показывает связь их геометрии с мантийными неоднородностями. При рассмотрении более детальных данных о разломах [Никитин и др., 2018] видно, что они сопровождаются “плотной” опережающей сетью, которая не показана на картах 1:1000000. Исследования верхней части разреза осадков Баренцева моря и его сейсмичности [Мусатов, 1998; Крапивнер, 2007; Antonovskaya et al., 2021] показали, что его акватория содержит многочисленные элементы неотектоники, сейсмическую активность далеко за пределами дивергентных межплитных границ

(см. рис. 1) и подвержена воздействию тектонических деформационных волн. Отмеченные факты в совокупности с данными [Соколов и др., 2023b] о пространственной миграции зоны сочленения хребтов Книповича и Мона на восток указывают на геодинамическое воздействие активных структур на шельф и его возможную тектоническую активизацию, развивающуюся в восточном и юго-восточном направлении. Анализ аспектов взаимосвязи шельфовых разломов, телесеизмических данных и региональной сейсмичности по данным [NORSAR, 2022] посвящена настоящая работа.

РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ И РАЗЛОМЫ

Сейсмичность Баренцева моря по данным региональной сети [NORSAR ..., 2022] (рис. 2) указывает на существование внутриплитных событий с эпицентрами, сгруппированными параллельно бровке шельфа, с механизмами сдвига с субмеридиональной ориентацией

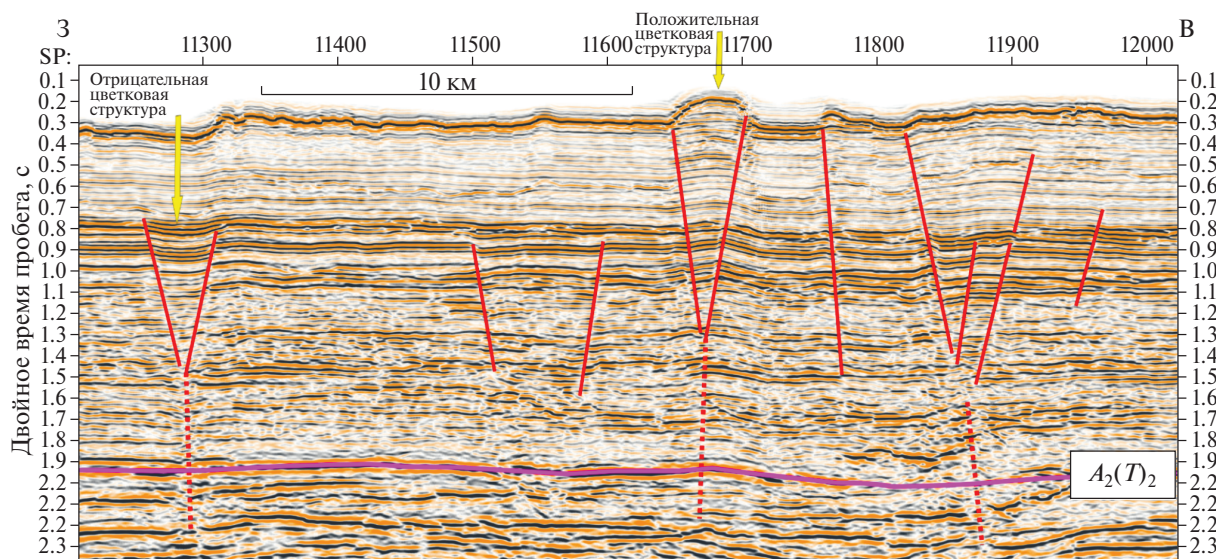


Рис. 3. Фрагмент опорного сейсмического разреза 4-АР в северной части Баренцева моря, пересекающий зону сдвиговых дислокаций северо-западной ориентации (см. рис. 1 и 2).

Сплошными красными линиями показаны уверенно выделяемые разломы и оперение отрицательных и положительных цветковых структур, выходящее к поверхности дна. Пунктирными красными линиями показаны главные сдвиговые дислокации. Фиолетовой линией показан опорный триасовый горизонт $A_2(T)_2$. Положение фрагмента показано на рис. 1.

плоскостей смещений [Olesen et al., 2000] и растяжения с субширотной ориентацией [Keiding et al., 2018]. Эти данные указывают на тектоническую активизацию шельфа вблизи его западной окраины и ее возможную миграцию на восток [Соколов и др., 2023б]. Визуализация данных [NORSAR ..., 2022] для магнитуд >2.5 за период наблюдений с 2008 по 2012 гг. показывает, что в северо-восточной части Баренцева моря эпицентры группируются в линейные цепочки северо-западной ориентации (см. рис. 2). Это единственное место в восточной части акватории, где данные NORSAR [NORSAR ..., 2022], в основном являющиеся детекцией случайных выбросов шума, показали группирование этих событий в линейные кластеры (см. рис. 2), резко отличающиеся от хаотичного распределения. Сопоставление их пространственного распределения с разломной сетью, построенной в рамках проекта Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (новая серия) [Карта ..., 2004], показывает их привязку к разломам левой сдвиговой кинематики и оперяющих их дислокаций, которые на карте данного масштаба могут быть не показаны. Отчетливо проявленный западный кластер не просто расположен вдоль разлома, но и испытывает такой

же изгиб простирания около области с координатами $\sim 44^\circ$ в.д. и $\sim 77^\circ$ с.ш. В данном случае при большой статистике на фоне детекций со случайным пространственным распределением выявлены такие же слабые события, но с четкой пространственной корреляцией, отсутствующей у событий в действительно случайном процессе, которая имеет также привязку к современному тектоническому элементу. Отметим, что частота событий, ассоциированных с разломами, увеличивается при приближении к складчато-надвиговой структуре Новой Земли и уменьшается к югу акватории. Полагаем, что ассоциация кластеров с разломами случайностью не является, и расположением источника тремора являются именно разломные структуры.

Северная переходная зона континент—океан в Баренцевом море представлена сейсмичностью, зарегистрированной Архангельской сейсмологической сетью [Морозов и др., 2014; Morozov et al., 2015]. Эти данные представлены событиями вдоль бровки шельфа, которые А.Н. Морозов с соавторами интерпретируют как следствие изостатического отклика на осадочную нагрузку на границе континент—океан. Кроме того, в работах [Морозов и др., 2014; Morozov et al., 2015] выделены события, связанные с деструкцией

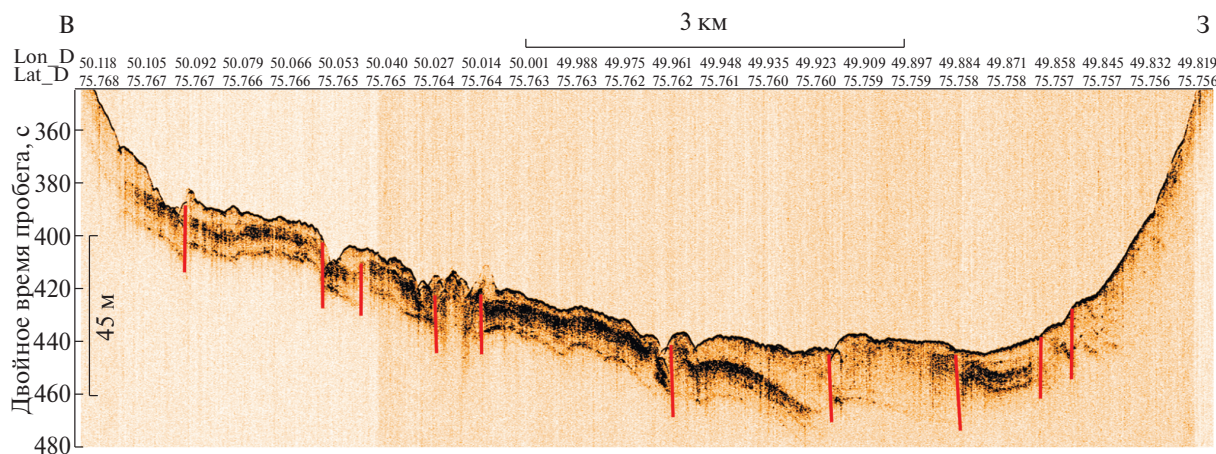


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического разреза ABP51_2209212244, полученного высокочастотным профилографом ParaSound P-35 в 51-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” (октябрь–ноябрь 2022 г., ИО РАН, ГИН РАН) в центральной части Баренцева моря, пересекающий зону сдвиговых дислокаций северо-западной ориентации. Красными линиями показаны сбросы и взбросы, нарушающие верхнюю часть разреза и выходящие к поверхности дна. Положение фрагмента показано на рис. 1.

коры в области северных трогов, которые ассоциированы с тепловым потоком, имеющим рифтогенные значения [Хуторской и др., 2009]. Этот процесс связан с наличием аномально горячей мантии в северо-западном обрамлении шельфа Баренцева моря [Bungum et al., 2005], также объясняющей четвертичный вулканизм на архипелаге Шпицберген [Сироткин, Шарин, 2000] и интенсивную сейсмичность на его южном обрамлении [ISC ..., 2023], которая анализируется в настоящей работе.

В рамках проекта геологического картирования в масштабе 1:10000000 обрабатывался значительный объем данных структурной 2D сейсморазведки, в разрезах которого разломные нарушения установлены абсолютно достоверно. На рис. 3 приведен фрагмент разреза, на котором выделяется система разломов, выходящих на поверхность дна. Причем в пределах короткого фрагмента выделены цветковые структуры положительного и отрицательного знака, указывающие на существование сложной мозаики из режимов локальной транстенсии и транспрессии вблизи сдвиговой зоны. Аналогичные нарушения выделяются около сдвигов в более южной части Северо-Восточной части Баренцева моря [Соколов и др., 2023a]. Прослеживание разломов до поверхности дна акватории с большой вероятностью указывает на современный возраст дислокаций и их продолжающееся действие, имеющее рельефообразующий эффект

(см. рис. 3). Детальное исследование самой верхней части разреза осадков (ВЧР) (рис. 4), выполненное в 51 рейсе НИС “Академик Борис Петров”, отчетливо показывает выходы разломов на поверхность дна, определяемые по сочетанию неровностей рельефа и смещениям высокоамплитудного придонного рефлектора, и имеющие разнонаправленную кинематику. Если разрешающая способность сейсмических данных и эффективная длительность донного отражения составляет ~40–50 мс (см. рис. 3), то в сейсмоакустических разрезах (см. рис. 4) эффективная длительность сейсмограммы с дислокациями в разрезе полностью укладывается в этот интервал. Это демонстрирует в высокочастотных разрезах характер выхода глубинных разломов на поверхность без маскировки интенсивным донным отражением по данным глубинной 2D сейсморазведки.

ВЧР осадочной толщи в разных частях Баренцева моря [Solheim et al., 1998] характеризуется сильной переменнойностью состава, мощностью рыхлых четвертичных отложений и диамиктона [Крапивнер, 2018; Дунаев и др., 1995]. Они залегают на эродированных мезозойских комплексах [Шипилов, Шкарубо, 2010], смещения которых по глубинной разломной сети передается в ВЧР. Мерзлые породы [Крапивнер, 2018] и BSR (bottom simulated reflector – псевдодонный рефлектор на подошве газовых гидратов) являются флюидоупором для свободного газа и

усиливают динамику придонных рефлекторов около глубинных разломов, выходящих на поверхность, по которым осуществляется дегазация. Скопления газа увеличивают амплитудную контрастность смещенных рефлекторов и повышают надежность определения разломов. Привязка тремора данных [NORSAR ..., 2022] к этим разломным структурам очевидна (см. рис. 2), но имеет неочевидную интерпретацию его происхождения.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для иллюстрации сейсмичности вдоль ААРС использовались данные каталога [USGS ..., 2022], полученные для исследуемого региона с использованием океанической скоростной модели, показывающей положение облака эпицентров без смещения от оси рифтовой системы (см. рис. 1). Для расчетов характеристик сейсмического процесса в западной части Баренцева моря использовались данные каталога [ISC ..., 2023]. События регионального каталога [NORSAR ..., 2022] (см. рис. 2) получены в автоматическом режиме детекции времени и координат с использованием детальной скоростной модели NORSAR3D [Ritzmann et al., 2007], характерной для континентального строения шельфов и учитывающей разделение коры на осадочный и кристаллический этажи. Интервал 2008–2012 гг. для рис. 2 был выбран не случайно, поскольку в 2008 г. 21 февраля на юге Шпицбергена произошло событие с $M_w = 6.1$, вызвавшее значительный микросейсмический отклик в пределах архипелага. Эта активность в пределах шельфа уникальна и геодинамические аспекты ее появления в данном районе обсуждаются в работах [Соколов и др., 2023а, 2023б]. Региональная сеть NORSAR регистрирует события с магнитудой от -2 в пределах всей акватории Баренцева моря методом автоматической детекции, который в основном формирует ложные срабатывания. Появление пространственной корреляции (см. рис. 2) показывает, что в массиве автоматически выделенных хаотичных событий присутствует доля таких же слабых, но имеющих геометрическую привязку к разломам с проявлением неотектоники, событий, которые могут быть интерпретированы как следствие процессов вдоль этих нарушений в земной коре. Кроме того, как

будет показано далее, для этих разломов существует тенденция пространственно-временного смещения, которая полностью отсутствует на большей части исследуемого района. Линейные кластеры событий появляются не только по пространственным координатам, но и по времени. Это исключает случайный характер конфигурации сейсмичности [NORSAR ..., 2022] для исследованной части акватории.

Для нашего исследования была сделана выборка в период с 2001 по 2020 гг., в котором число событий, зарегистрированных двумя и более станциями, составляет ~550 тысяч. Такой объемом автоматически выявленных событий делает результаты их линейной пространственной привязки статистически значимым, несмотря на наличие неверных определений. Иллюстрация выхода глубинных разломов к поверхности дна проведена с использованием материалов Российского Геологического Фонда. Иллюстрация разломов в ВЧР проведена с использованием данных высокочастотного профилографа ParaSound P-35 в 51-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” (октябрь–ноябрь 2022 г., ИО РАН, ГИН РАН).

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Наличие данных о сейсмических событиях за 20 лет в количестве ~550 тысяч позволяет получить статистически значимую картину их пространственного распределения в акватории Баренцева моря, в том числе в ее Российской части. Нами рассчитывался суммарный сейсмический момент как для осевой части ААРС (раздельно для хребтов Книповича и Гаккеля) по данным USGS, так и для событий в пределах шельфа по данным NORSAR по известной эмпирической зависимости момента от магнитуды событий Гуттенберга-Рихтера. Для расчетов были выбраны коэффициенты по [Болдырев, 1998], где исследовался сейсмический процесс в Северной Атлантике. Для указанных сегментов ААРС вычислялись суммы выделившегося момента по годам начиная с 1950 г. Для шельфовой области расчет велся для района, расположенного преимущественно в Российской части, который показан на рис. 1. Суммы вычислялись для пространственных ячеек 10×10 км и с интервалом в 1 год с 2001 по 2020 гг. В результате был сформирован трехмерный массив (куб)

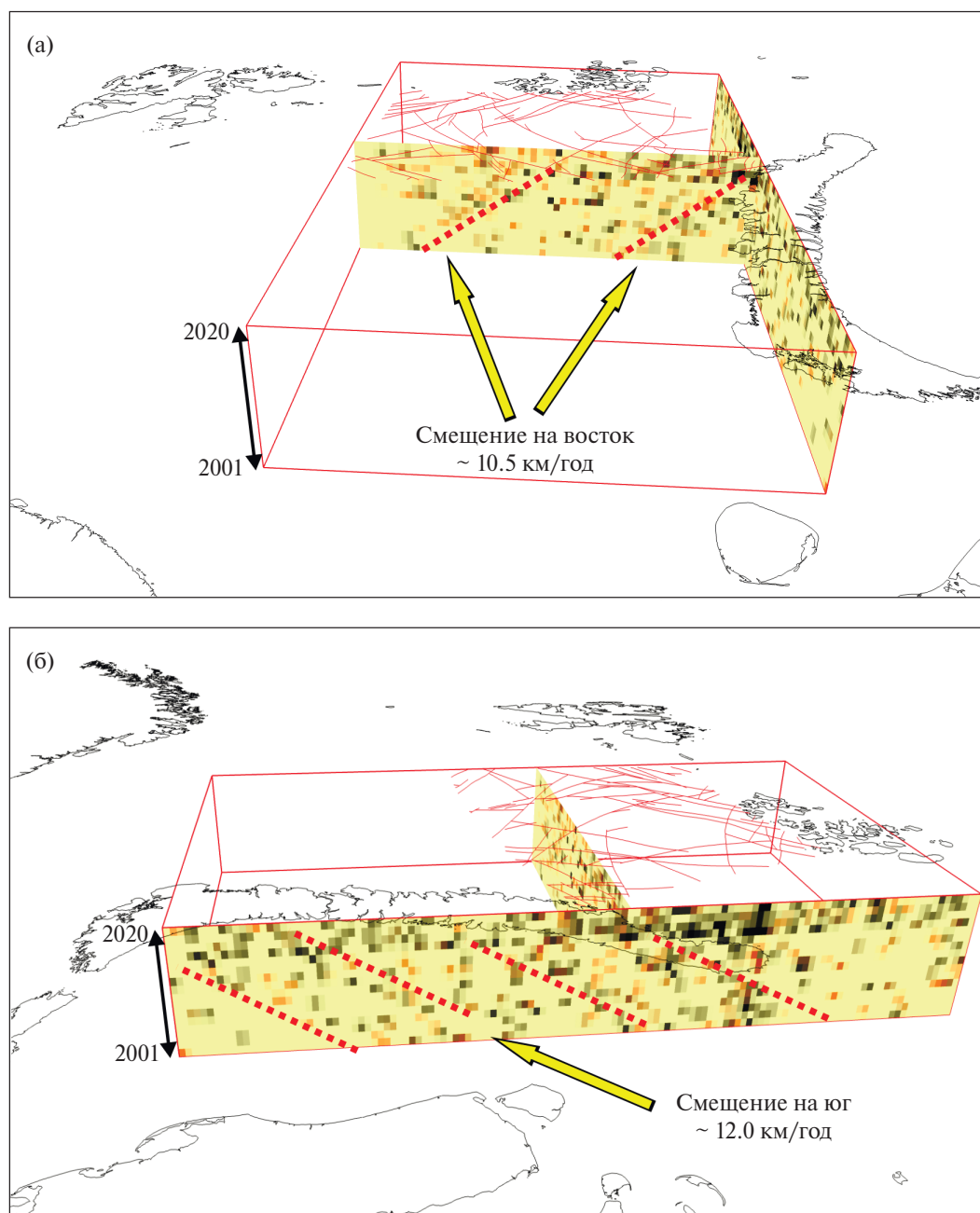


Рис. 5. Суммарный сейсмический момент (от 0 до 155×10^{13} Дж) в восточной части Баренцева моря по ячейкам $(10 \times 10 \text{ км}) \times (1 \text{ год})$ по данным NORSAR [NORSAR ..., 2022] за период 2001–2020 гг. Учитывались события с магнитудой от -2 . Разломная сеть 1:1000000 по данным листа Т-37-40 [Карта ..., 2004]. Стрелками показаны тренды пространственно-временного смещения энерговыделения с кажущимися скоростями вдоль плоскостей вертикального сечения трехмерного массива. а — обзор с юга на север на субширотное сечение суммарного сейсмического момента, б — обзор с востока на запад на субмеридиональное сечение суммарного сейсмического момента.

данных, что позволило представить результаты суммарного момента в 3D виде с возможностью формирования 2D вертикальных срезов в его ортогональных сечениях. Вертикальные срезы куба показаны на рис. 5. Каталог NORSAR, содержащий в районе расчета (см. рис. 1) ~240

тыс. событий с магнитудой от -2 , обрабатывался специально написанным для решения данной задачи программным модулем на языке FORTRAN-90. Проводилось суммирование моментов от каждого события в 3D массив, в котором оси X и Y являются координатами

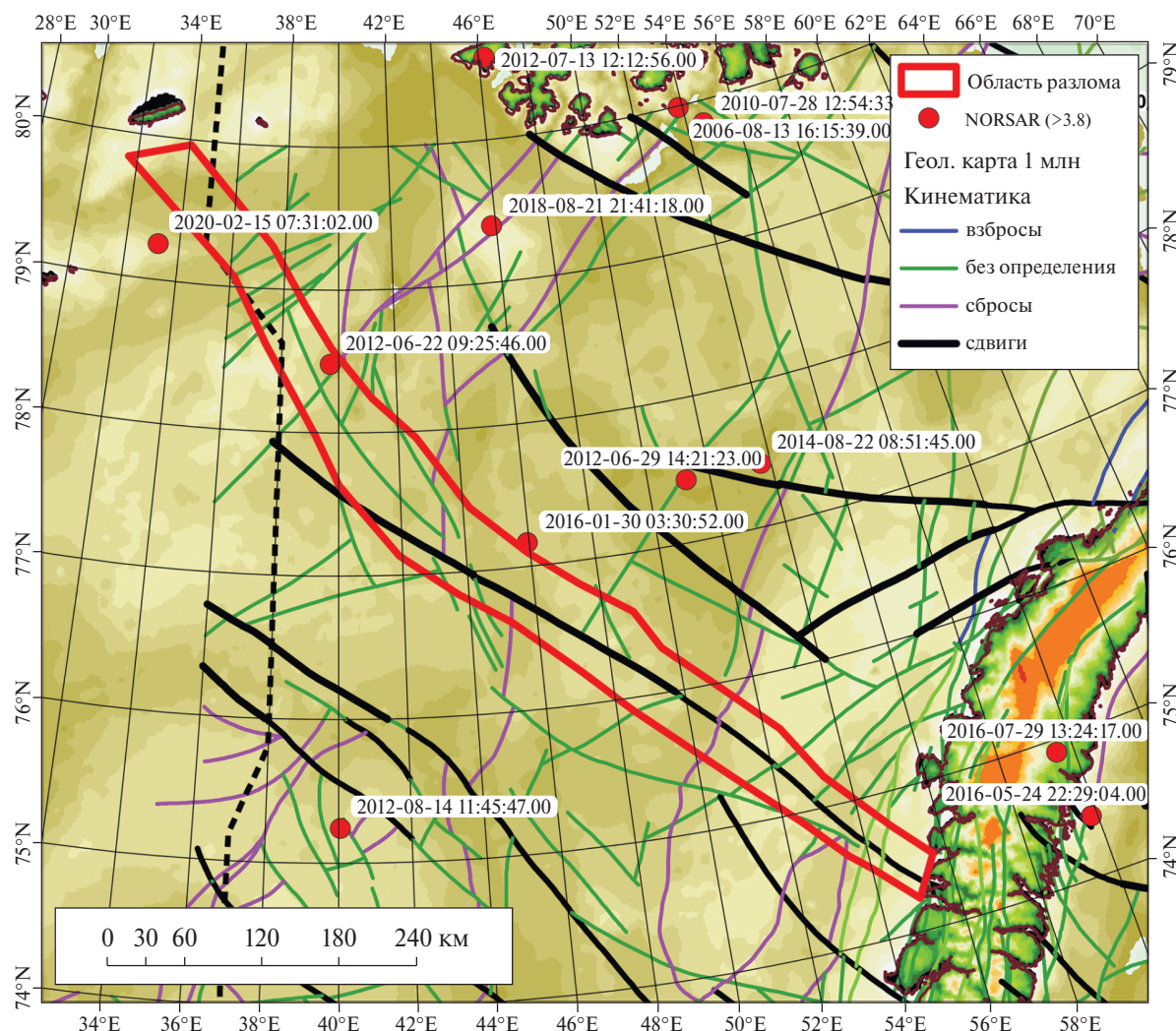


Рис. 6. Область анализа сейсмичности по данным [NORSAR ..., 2022] вдоль зоны с линейным группированием эпицентров (см. рис. 2) по разломной сети Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (новая серия) с дифференциацией разломов по кинематическому типу по [Карта ..., 2004]. Показаны положения эпицентров для магнитуд >3.8 .

в проекции UTM37 с возможностью регулировать шаг дискрета, а ось Z – третье измерение с временным дискретом в 1 год. Результаты расчетов загружались в ПО, позволяющее осуществить трехмерную визуализацию данных, а также получение интегральной выборки вдоль одной из осей и ее осреднение в плавающем окне.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственно-временные тренды сейсмического момента прослеживаются только в некоторых частях куба: в северной части района около сдвигов северо-западной ориентации и в восточной части района около сочленения

сдвигов со структурами Новой Земли (см. рис. 2). На рис. 5 показаны субширотное и субмеридиональное сечения куба значений суммарного момента, на которых четко видны тренды этой пространственно-временной миграции максимумов момента со скоростью ~ 10.5 км/год от хребта Книповича на восток (см. рис. 5а) и со скоростью ~ 12.0 км/год от хребта Гаккеля на юг в пределах района Новой Земли (см. рис. 5б). Остальной объем куба представлен преимущественно хаотичным распределением отдельных суммарных пиков. Отметим возрастание сейсмического момента по сравнению с фоновыми значениями начиная с 2015 г. Это возрастание наиболее ярко

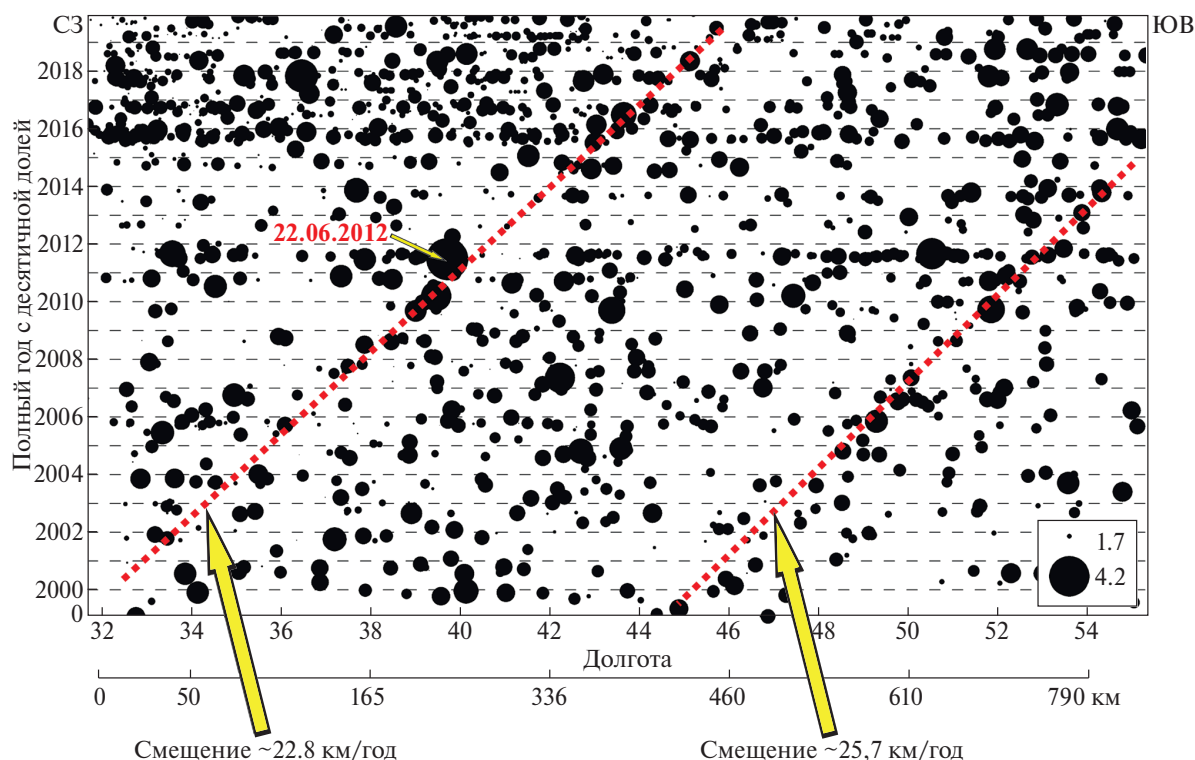


Рис. 7. Пространственно-временная структура сейсмичности по данным [NORSAR ..., 2022] вдоль области анализа (см. рис. 6) в полосе около разлома с линейным группированием эпицентров.

Горизонтальная шкала долгот дополнена расстоянием вдоль области в километрах. Стрелками и цифрами указаны линии трендов и скорости смещения энерговыделения вдоль них.

выражено около северо-западного обрамления Новой Земли, где архипелаг стыкуется с системой сдвигов (см. рис. 2).

В акватории наиболее выраженным линейным кластером событий (см. рис. 2) является группа, расположенная вдоль наиболее длинного сдвига в северо-восточной части Баренцева моря и переходящая к северу в разломы неустановленной кинематики с изменением азимута на $10\text{--}15^\circ$ ближе к северу. На рис. 6 выделена область этого кластера, для которого был сделана отдельная выборка из общего массива данных в период с 2001 по 2020 гг. Пространственно-временное распределение событий в этой области показано на рис. 7. Выделяются две зоны смещения сейсмической активности на юго-восток со скоростями ~ 22.8 и ~ 25.7 км/год. Компоненты этих скоростей в проекции на ось X будут иметь значения, близкие к выделенным на ортогональном субширотном сечении рис. 5а. Около южной зоны видна пауза в сейсмичности длительностью ~ 4 года, в пределах которой активность затухает. В 2012 г.

в пределах всей зоны разлома выделяется синхронный всплеск активности, совпадающий с событием 22.06.2012 с магнитудой 4.18 (см. рис. 6). Начиная с 2016 г. синхронная активность вдоль всей зоны разлома становится более частой. Как показано на рис. 6, зарегистрировано несколько событий 2016, 2018 и 2020 гг. с магнитудами >3.8 , с которыми связано проявление синхронной активности (см. рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные тренды смещения сейсмической активности на восток от хребта Книповича и на юг от хребта Гаккеля (см. рис. 5а, 5б) хорошо укладываются в гипотезу о существовании суперпозиции тектонических деформационных волн от двух геодинамически активных сегментов ААРС, обрамляющих Северо-Западный Арктический шельф [Antonovskaya et al., 2021]. Вместе с тем геометрия активных сегментов ААРС в указанных выше хребтах такова, что эти два сегмента сочленяются почти под углом 90° (см. рис. 1). Если исходить из того,

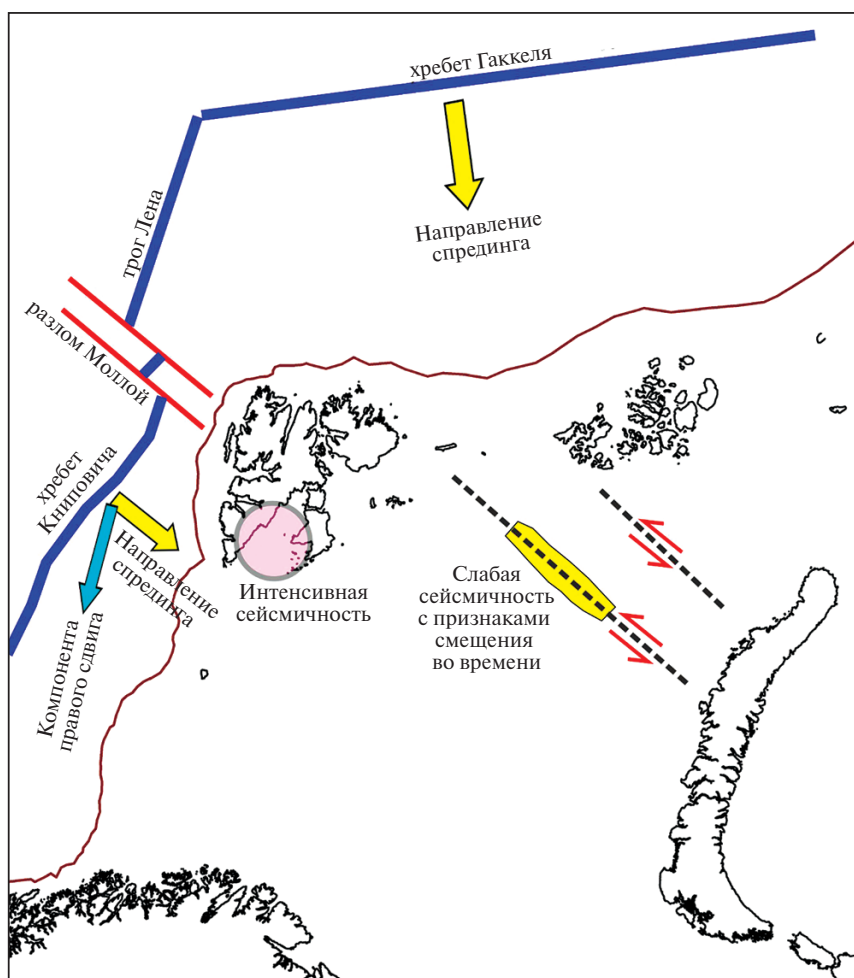


Рис. 8. Схема геодинамики района исследований с элементами, необходимыми для интерпретации тектоники внутри шельфа Баренцева моря.

Размеры векторов воздействия на плиту имеют условный характер.

что давление со стороны хребта (ridge push) является одной из трех основных сил, обеспечивающих действие механизма тектоники плит [Хаин, Ломизе, 2005], то ситуация должна приводить к формированию особого рисунка структурно-тектонических элементов сжатия в шельфовом квадранте, ограниченном этими сегментами ААРС, на направлениях под углом $\sim 45^\circ$ к обоим хребтам (рис. 8). В реальности подобных одинаково направленных от сегментов ААРС деформаций не наблюдается. Геодинамическая обстановка в районе хребта Книповича является транстенсией (растяжение со сдвигом) [Верба и др., 2000; Crane et al., 2001; Гусев, Шкарубо, 2001; Зыков, Балусев, 2008; Кутинов и др., 2015; Соколов и др., 2017; Зарайская, 2017; Соколов и др., 2023б], что указывает на неодинаковое воздействие хребтов Гаккеля и Книповича на Баренцевоморский шельф. Тот факт,

что спрединг хребта Книповича имеет неортогональное направление к оси растяжения и на его флангах наблюдаются проявления деформаций сдвигового парагенеза, означает, что упрощенная рисовка направлений воздействия, обычно показываемая для активных рифтовых структур, в данном случае неприменима. Геодинамика района получает более реалистичную интерпретацию вместе с правосдвиговой компонентой смещения плиты к востоку от хребта Книповича (см. рис. 8). Это делает левосдвиговую кинематику разломов северо-западной ориентации в восточной части акватории вполне объяснимой. Система левых сдвигов (см. рис. 1, 2, 8), ориентированная на северо-запад под углом $\sim 45^\circ$ к обоим хребтам, является надежно установленной на всей акватории Баренцева моря и с ней ассоциирована сейсмичность (см. рис. 2). По данным [Шипилов, 2004, 2015;

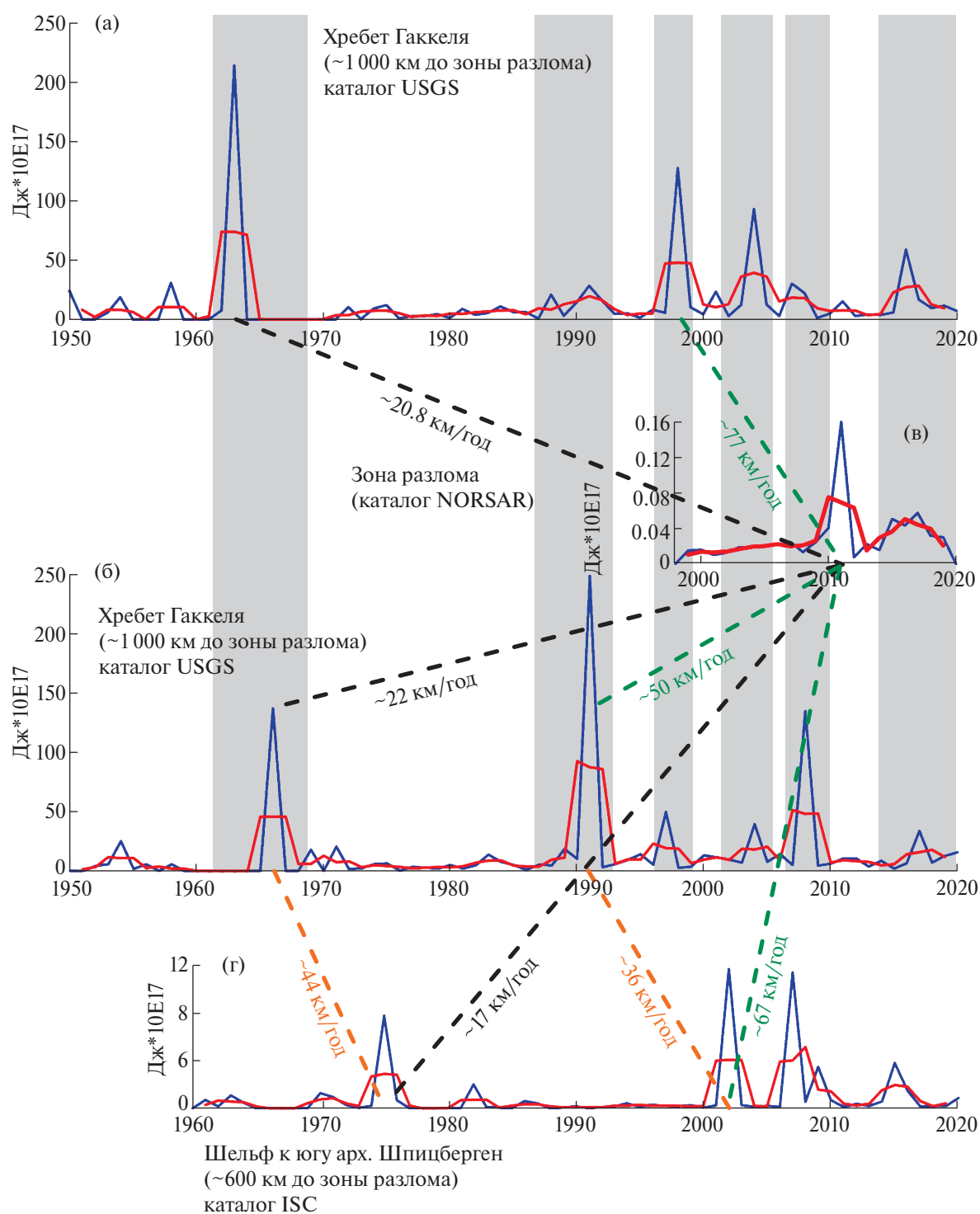


Рис. 9. Временная структура суммарного сейсмического момента хребтов Гаккеля (а) и Книповича (б) по данным [USGS, 2022], вдоль области анализа (см. рис. 6) в полосе около разлома с линейным группированием эпицентров (в) по данным [NORSAR ..., 2022] и в области шельфа к югу от архипелага Шпицберген (г) по данным [ISC ..., 2023].

Синими линиями показаны графики суммарного момента по годам. Красными линиями показаны графики, сглаженные в окне шириной 3 года. Расстояние от хребтов и внутриплитной сейсмичности указано до середины области разлома перпендикулярно осям спрединга. Цифры около наклонных кривых дают оценку скорости смещения экстремумов момента в пространстве. Серые области показывают некоторые зоны синхронных экстремумов с разными амплитудами.

Виноградов и др., 2005] схема девонско-триасовой рифтовой системы и ее юрско-меловая активизация имеют систему трансформных смещений, пространственная ориентация которых совпадает с разломами, выделенными на картах [Карта ..., 2004]. Это указывает на генетическую связь областей современной неотектоники с палеозойскими и мезозойскими структурными неоднородностями, но поднимает вопрос о геодинамическом механизме воздействия на плиту с блоковым строением в настоящее время. Обнаруженные тренды могут происходить как от подвижек вдоль разломов из-за несимметричного давления со стороны сегментов ААРС, так и вследствие эмиссии при прохождении деформационных волн через разломную неоднородность. Вероятнее всего имеет место комбинация факторов. Отделить их друг от друга в настоящий момент не представляется возможным, но имеющиеся данные позволяют определить некоторые количественные характеристики и возможные причинно-следственные связи между ними. В частности, сопоставим скорости пространственно-временной миграции сейсмической активности, которая сформирована тектоническими деформационными волнами внутри шельфа, с сегментами ААРС.

Скорость волн тектонических деформаций, сопровождающихся сейсмическим тремором, на коротких сегментах разломов по данным [Быков, 2005, 2018] может достигать 10–15 км/год и увеличиваться до первых сотен километров в год на протяженных тектонических элементах типа зон субдукции. Основой для определения скоростей является пространственно-временное отображение сейсмического процесса, которое в пределах разломной зоны шельфа (см. рис. 5а, 5б) дает в проекции на оси X и Y значения ~10.5 и ~12.0 км/год соответственно, а вдоль разлома ~22.8 и ~25.7 км/год (см. рис. 7). Особо выделяется активизация выделения сейсмической энергии в 2012 г. и в период с 2016 по 2020 гг. Нами были рассчитаны суммарные моменты по годовым дискретам для шельфовой разломной зоны по данным [NORSAR ..., 2022] и сопоставлены с суммарными моментами для хребтов Книповича и Гаккеля по данным [USGS ..., 2022] и области внутришельфовой сейсмичности около архипелага Шпицберген по данным [ISC ..., 2023 (без данных по Новой

Земле)] (рис. 9) по методике сопоставления смещенных во времени минимумов, представленной в работе [Antonovskaya et al., 2021], только по смещению максимумов.

На графиках представлены как суммы по годам, так и осредненные значения в плавающем окне длительностью 3 года, которые показывают эволюцию выделения момента в более сглаженном виде. Увеличивать длительность окна сглаживания до 5 лет и более нецелесообразно, поскольку при этом начинают появляться ложные минимумы в тех интервалах времени, где на исходных данных находятся локальные максимумы момента. Одной из главных особенностей графиков момента для почти ортогональных сегментов ААРС является синхронность максимумов (см. рис. 9). Серыми полосами показаны области синхронных пиков для хребтов Книповича и Гаккеля. Особо отметим также совпадающую на обоих графиках область тишины с 1968 по 1988 гг. Такой характер выделения сейсмической энергии указывает на наличие общего планетарного фактора, являющегося триггером для разрядки тектонических напряжений (или подъема магмы) на сегментах ААРС, расположенных в ~1000 км друг от друга без временного смещения.

Рисунок 9в показывает суммарный момент для зоны разлома (см. рис. 6), вдоль которой были установлены тренды миграции активности (см. рис. 5а, 7). Его особенностью является 12-летняя область “тишины” до пика 2012 г., которому в ААРС (см. рис. 9а, 9б) нет аналога. Максимум 2016–2020 гг. имеет аналог в максимумах ААРС и на шельфе по данным [ISC ..., 2023] (см. рис. 9г). Это также может указывать на общий триггер для всех областей в указанный период времени. Если мы предположим, что график суммарных значений момента в зоне разлома вызван запаздывающим воздействием от сегментов ААРС, то целесообразно его сопоставление с пиками, которым предшествует достаточно длительный период тишины. Если предположить, что это пики 1963 и 1966 гг. на хребтах Гаккеля и Книповича соответственно, то мы получим значения скоростей ~20.8 и ~22.0 км/год, которые хорошо совпадают с определяемой по многим точкам скоростью миграции в зоне разлома (см. рис. 5а, 7). Если мы сопоставим график рис. 9в с пиками 1991

и 1998 гг., то получим значения скоростей ~ 50 и ~ 77 км/год, которые также являются правдоподобными. В работах [Гарагаш, Лобковский, 2021; Лобковский и др., 2023] определена скорость миграции волн тектонических деформаций, равная ~ 100 км/год для районов Арктики и Антарктики, возникающих из-за воздействия сильнейших событий в зонах субдукции. В обрамлении акватории Баренцева моря таковые отсутствуют, но учитывая планетарный характер этих событий и вызванных ими деформационных волн, можно допустить их влияние и на ААРС, и на область шельфов.

При расчетах моментов, показанных на рис. 9б, не учитывалась внутриплитная сейсмичность к югу от архипелага Шпицберген, как не имеющая отношения к рифтовой структуре ААРС. Данные по этой области были получены из каталога [ISC, 2023] и расчет моментов по годам представлен на рис. 9г. К сожалению, данный каталог не содержит сильных событий на район разлома северо-западной ориентации, для которого мы использовали каталог [NORSAR ..., 2022]. Применив к пику 2012 г. рис. 9в описанный выше подход для сопоставления с максимумами каталога ISC 1976 и 2003 гг. с периодами тишины перед ними (см. рис. 9г), мы получаем значения скоростей предполагаемого смещения ~ 17 и ~ 67 км/год соответственно, которые дают сходный диапазон со значениями от максимумов от ААРС (см. рис. 9а, 9б).

Если процесс распространения деформационной волны от ААРС, запускающей локальную сейсмичность вдоль разлома, проходя через внутриплитную область с сильными событиями, влияет также и на нее, то скорости распространения от ААРС до зоны к югу от архипелага Шпицберген также должны быть сопоставимы с теми, которые мы определили при сопоставлении с зоной разлома. Пики на рис. 9г 1976 и 2023 гг. не попадают в общую картину синхронного энерговыделения вдоль ААРС, хотя географически эти районы близки. Из этого может следовать возможное влияние ААРС на сейсмический процесс в западной части шельфа. Полученные оценки скоростей для этих пиков по смещениям от сходных пиков вдоль ААРС составляют ~ 44 и ~ 36 км/год соответственно (см. рис. 9г). Возможным

объяснением этих значений может быть то, что деформационная волна проходит океаническую часть пути со скоростями в 2 раза большими, чем шельфовую часть.

Представляется, что в случае Баренцева моря более предпочтительным является решение со скоростями, близкими значениям 10–22 км/год, поскольку они подтверждаются на коротких фрагментах разломов с непрерывной трассировкой от года к году на пространственной сетке 10 км, как, например, на рис. 5а или рис. 7. Сопоставление между пиками удаленных друг от друга структур может стать источником ошибки, поскольку между ними отсутствует непрерывное прослеживание. В сейсморазведке удовлетворительная коррелируемость рефлекторов достигается в том случае, когда от трассы к трассе перекрытие зоны Френеля составляет не менее 50%. Аналогично этому примеру, для сейсмически активных структур уверенное прослеживание возможного продвижения деформационной волны необходимо осуществлять на серии более плотно расположенных объектов, так как на удалении в 1000 км есть возможность неправильного сопоставления максимумов момента. Полагаем, что в случае прямого давления со стороны рифтовой структуры (ridge push) на крылья сдвига или триггерного воздействия сильного события пики сейсмического момента на ААРС и на шельфе должны быть синхронны, без смещений во времени. Подобное совпадение наблюдается только для периода с 2016 по 2020 гг.

ВЫВОДЫ

1. Слабые сейсмические события, зарегистрированные региональной сетью NORSAR в пределах Российской части шельфа Баренцева моря в период с 2001 по 2020 гг., группируются в линейные кластеры вдоль разломов сдвиговой кинематики, надежно установленных структурной 2D сейсморазведкой и ориентированных под углом $\sim 45^\circ$ к геодинамически активным сегментам Атлантико-Арктической рифтовой системы — хребтам Книповича и Гаккеля, обрамляющим шельф с запада и севера.

2. Разломная сеть, установленная по данным структурной сейсморазведки и высокочастотного профилирования, смещает мезозойские сейсмокомплексы и выходит на поверхность

дна, смещая четвертичные отложения и одно-значно указывая на современный возраст нарушений, вдоль которых сгруппированы линейные кластеры слабой сейсмичности.

3. Расчет суммарного сейсмического момента в пространственно-временном измерении показал наличие миграции сейсмической активности вдоль коротких фрагментов разломов на шельфе в субширотном направлении на восток со скоростью 10.5 км/год и в субмеридиональном направлении на юг со скоростью 12.0 км/год. Миграция сейсмической активности вдоль зоны разлома с наиболее выраженным линейным кластером слабых событий составляет от 22.8 до 25.7 км/год. Отмечен всплеск общей активности в районе шельфа начиная с 2012 г.

4. Сопоставление временной эволюции сейсмической активности на шельфе с аналогичными графиками для фрагментов ААРС и активной зоны внутри шельфа дает основания полагать, что она является воздействием тектонических деформационных волн, возбуждаемых вдоль геодинамически активной межплитной границы и распространяющихся в пределах шельфа со скоростью 20–22 км/год. Менее вероятно воздействие со стороны рифтовой системы, распространяющееся со скоростями от 50 до 77 км/год, поскольку области сравнения удалены на большое расстояние, а в пределах зоны шельфового разлома скорость от 22.8 до 25.7 км/год достоверно установлена по непрерывному смещению значений момента на коротких пространственных сегментах.

5. Увеличение интенсивности сейсмической активности на шельфе после 2012 г. скорее всего не является эмиссией от воздействия медленной деформационной волны, проходящей через структурную неоднородность, установленную сейсморазведкой. Этот максимум момента в зоне разлома на шельфе синхронизирован с аналогичными максимумами в рифтовых структурах ААРС и на шельфе к югу от архипелага Шпицбергена, что указывает на возможность прямого триггерного воздействия на шельф со стороны структур ААРС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны экипажу судна НИС “Академик Борис Петров” и научному составу 51-го рейса (октябрь–ноябрь 2022 г.) за самоотверженный труд

в тяжелых условиях, сделавший возможным получение полевых материалов, использованных в настоящей работе. Авторы также выражают благодарность Российскому Федеральному Геологическому Фонду (<https://rfgf.ru>) за доступ к сейсмическим данным северной части Баренцева моря.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Проекта РНФ № 22-27-00578 “Новейшая и современная геодинамика Западной Арктики: эволюция и воздействие активных тектонических процессов на структурные элементы и осадочный чехол глубоководных котловин и шельфов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдырев С.А.* Сейсмогеодинамика Срединно-Атлантического хребта. М.: НГК РФ, 1998. 124 с.
- Быков В.Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176–1190.
- Быков В.Г.* Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0369
- 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. № 4. С. 3–13.
- Виноградов А.Н., Верба М.Л., Верба В.В. и др.* Основные черты геологического строения Евро-Арктического региона // Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. С. 16–39.
- Гарагаш И.А., Лобковский Л.И.* Деформационные тектонические волны как возможный триггерный механизм активизации эмиссии метана в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 42–50. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-42-50
- Гусев Е.А., Шкарубо С.И.* Аномальное строение хребта Книповича // Российский журнал наук о Земле. 2001. Т. 3. № 2. С. 165–182.
- Дунаев Н.Н., Левченко О.В., Мерклин Л.Р., Павлидис Ю.А.* Приновоземельский шельф в позднечетвертичное время // Океанология. 1995. Т. 35. № 3. С. 440–450.
- Зарайская Ю.А.* Особенности сегментации и сейсмичности ультрамедленных срединно-океанических

- хребтов Книповича и Гаккеля // Геотектоника. 2017. № 2. С. 67–80.
- Зыков Д.С., Балугев А.С. Характер и причины проявления неотектонических деформаций в северо-западной части Баренцевоморской плиты (Свальбардский архипелаг) // Бюлл. МОИП. Отдел геол. 2008. Т. 83. Вып. 6. С. 20–26.
- Карта дочетвертичных образований. Т-37-40 (Земля Франца-Иосифа, южные острова). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (новая серия). Лист 1 / Отв. редактор Б.Г. Лопатин. СПб.: МАГЭ, ПМГРЭ, ВНИИОкеангеология, 2004.
- Крапивнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.
- Крапивнер Р.Б. Кризис ледниковой теории: аргументы и факты. М.: ГЕОС, 2018. 320 с.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беленович Т.Я. Арктическая окраинно-планетарная зона // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4 (20). С. 38–47.
- Лобковский Л.И., Баранов А.А., Рамазанов М.М., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Алексеев Д.А. Возможный сейсмогенно-триггерный механизм эмиссии метана, разрушения ледников и потепления климата в Арктике и Антарктике // Физика Земли. 2023. № 3. С. 33–47. DOI: 10.31857/S0002333723030080
- Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Конечная Я.В. Сейсмичность северной акватории Баренцева моря в районе трогов Франц-Виктория и Орла // Геотектоника. 2014. № 3. С. 78–84.
- Мусатов Е.Е. Структура кайнозойского чехла и неотектоника Баренцево-Карского шельфа по сейсмоакустическим данным // Российский журнал наук о Земле. 1998. Т. 1. № 2. С. 157–183.
- Никитин Д.С., Горских П.П., Хуторской М.Д., Иванов Д.А. Структурно-тектонические особенности Северо-Восточной части Баренцевоморской плиты по данным численного моделирования потенциальных полей // Геотектоника. 2018. № 2. С. 58–75. DOI: 10.7868/S0016853X18020042
- Сироткин А.Н., Шарин В.В. Возраст проявлений четвертичного вулканизма в районе Бокк-фьорда (архипелаг Шпицберген) // Геоморфология. 2000. № 1. С. 95–106.
- 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
- Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Шкарубо С.И. Неотектонические нарушения шельфа Баренцева моря и их генезис по данным морфометрии рельефа дна, сейсморазведки и глубинному строению мантии // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2023. Т. 509. № 1. С. 62–68. DOI: 10.31857/S2686739722602484
- Соколов С.Ю., Агранов Г.Д., Шкарубо С.И., Грохольский А.Л. Юго-Восточный фланг хребта Книповича (Северная Атлантика): структура фундамента и неотектоника по геофизическим данным и экспериментальному моделированию // Геотектоника. 2023. № 1. С. 1–18. DOI: 10.31857/S0016853X2301006X
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
- Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В. и др. Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // Докл. РАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 318–323.
- Шипилов Э.В. К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин Арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника. 2004. № 5. С. 26–52.
- Шипилов Э.В., Шкарубо С.И. Современные проблемы геологии и тектоники осадочных бассейнов Евразийско-Арктической континентальной окраины. Т. 1. Литолого-сейсмостратиграфические комплексы осадочных бассейнов Баренцево-Карского шельфа. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 266 с.
- Шипилов Э.В. Позднемезозойский магматизм и кайнозойские тектонические деформации Баренцевоморской континентальной окраины: влияние на распределение углеводородного потенциала // Геотектоника. 2015. № 1. С. 60–85.
- Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1261–1272.
- Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Vaganova N.V. et al. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic // Seismol. Res. Lett. 2021. V. 92. P. 2876–2890. DOI: 10.1785/0220210024
- Bungum H., Ritzmann O., Maercklin N. et al. Three-Dimensional Model for the Crust and Upper Mantle in the Barents Sea Region // Eos. 2005. V. 86. № 16. P. 1–3.
- Crane K., Doss S., Vogt P., Sundvor E., Cherkashov I.P., Devorah J. The role of the Spitsbergen shear zone in determining morphology, sedimentation and evolution of the Knipovich Ridge // Marine Geophysical Researches. 2001. V. 22. P. 153–205.
- Gac S., Klitzke P., Minakov A., Faleide J.J., Scheck-Wenderoth M. Lithospheric strength and elastic thickness of

- the Barents Sea and Kara Sea region // *Tectonophysics*. 2016. V. 619. DOI: 10.1016/j.tecto.2016.04.028
- GPS Time Series Data. 2022. Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology. <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>
- Harrison J.C., St-Onge M.R., Petrov O.V. et al. Geological Map of the Arctic 1:5000000 // Geological Survey of Canada. 2008. Open file report 5816.
- Heflin M., Donnellan A., Parker J., Lyzenga G., Moore A., Ludwig L.G., Rundle J., Wang J., Pierce M. Automated Estimation and Tools to Extract Positions, Velocities, Breaks, and Seasonal Terms from Daily GNSS Measurements: Illuminating Nonlinear Salton Trough Deformation // *Earth and Space Science*. 2020. V. 7. e2019EA000644. DOI: 10.1029/2019EA000644
- ISC Bulletin: event catalogue search. 2023. (Выборка 2023.07.11). <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/> (doi: 10.31905/D808B830)
- Jakobsson M., Mayer L.A., Bringensparr C. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // *Nature. Scientific Data*. 2020. V. 7. № 176. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9>
- Keiding M., Olesen O., Dehls J. Neotectonic map of Norway and adjacent areas. Scale 1:3000000. Geological Survey of Norway. 2018.
- Morozov A.N., Vaganova N. V., Konechnaya Y.V., Asming V.E. New data about seismicity and crustal velocity structure of the “continent–ocean” transition zone of the Barents–Kara region in the Arctic // *Journal of Seismology*. 2015. V. 19. P. 219–230.
- NORSAR Seismic Bulletins. 2022. (Выборка 2022.03.01). <https://doi.org/10.21348/b.0001> <https://www.norsar.no/seismic-bulletins/>
- Olesen O., Riis F., Lindholm C.D., Dehls J.F., Hicks E.C., Bungum H. Neotectonic map, Norway and adjacent areas. Scale 1:3000000 // Geological Survey of Norway. 2000.
- Ritzmann O., Maercklin N., Faleide J.I., Bungum H., Mooney W.D., Detweiler S.T. A 3D geophysical model for the crust in the greater Barents Sea region: Database compilation, model construction and basement characterization // *Geoph. J. Int.* 2007. V. 170. P. 417–435. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03337.x
- Solheim A., Musatov E., Heintz N. Geological aspects of Franz Josef Land and the northernmost Barentz Sea // *Meddelelser*. 1998. № 151. Oslo: Norsk Polarinstitut, 120 p.
- USGS Search Earthquake Catalog. 2022. (Выборка 2022.01.17). <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Neotectonics of the Barents Sea shelf eastern part: seismicity, faults and impact of the Atlantic-Arctic Rift System

S. Yu. Sokolov^{1, *}, A. S. Abramova¹, S. I. Shkarubo²,
R. A. Ananiev³, E. A. Moroz¹, Yu. A. Zaiskaya¹

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

²*JSC Marine Arctic Geological Expedition,
Sophia Perovskaya str., 26, Murmansk, 183038 Russia*

³*Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences,
Nakhimovsky prosp., 36, Moscow, 117218 Russia*

*e-mail: sysokolov@yandex.ru

The paper analyzes seismicity within the Barents Sea shelf, Knipovich and Gakkel ridges framing it, compares its spatial distribution with the fault network defined from seismic data, and kinematic characteristics of seismic activity spatial migration are obtained. It is shown that seismic events recorded by the Norwegian NORSAR regional network within the Russian part of the Barents Sea shelf are grouped into linear clusters along shear kinematics faults. The fault network displaces Mesozoic seismic complexes and reaches the bottom surface, displacing quaternary deposits, which clearly indicates the modern age of displacements along which linear clusters of weak seismicity are grouped. The calculation

of the total seismic moment in the space-time dimension showed the presence of seismic activity migration along short fragments of faults on the shelf with velocities from 10.5 to 25.7 km/year. There has been a surge in general activity in the shelf area since 2012. A comparison of the temporal evolution of seismic activity on the shelf with fragments of the Atlantic-Arctic Rift system suggests that it is the effect of tectonic deformation waves triggered along the geodynamically active intraplate boundary and propagating to the shelf at a speed of 20–22 km/year. Migration rates with speeds up to 77 km/year are less likely. There is a possibility that the increase in the intensity of seismic activity on the shelf after 2012 is not an emission from the effects of a slow deformation wave, but the result of a direct trigger effect on the shelf from the structures of the Knipovich and Gakkel ridges.

Keywords: seismicity, Knipovich and Gakkel ridges, neotectonics, Barents Sea, seismic sections, fault network, migration rate of seismic activity