

УДК 551.24

НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАРУШЕНИЯ ШЕЛЬФА БАРЕНЦЕВА МОРЯ И ИХ ГЕНЕЗИС ПО ДАННЫМ МОРФОМЕТРИИ РЕЛЬЕФА ДНА, СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ГЛУБИННОМУ СТРОЕНИЮ МАНТИИ

© 2023 г. С. Ю. Соколов^{1,*}, А. С. Абрамова¹, С. И. Шкарубо²

Представлено академиком РАН К.Е. Дегтяревым 02.11.2021 г.

Поступило 02.11.2021 г.

После доработки 07.11.2022 г.

Принято к публикации 08.11.2022 г.

В работе проведен комплексный анализ морфометрического атрибута “генеральная кривизна” для рельефа дна Баренцева моря, сейсмических и сейсмоакустических данных, содержащих в волновом поле тектонические нарушения, выходящие на поверхность, разломной сети в осадочном чехле, подтвержденной сейсморазведкой, и сейсмотомографических данных, показывающих неоднородную глубинную структуру распределения скоростей сейсмических волн в верхней мантии. Анализ этих данных показал наличие связи реологически неоднородных и подвижных блоков верхней мантии и консолидированной части земной коры с разломной сетью глубинного заложения, выходящей на поверхность дна и являющейся рельефообразующим фактором, формирующим характерные домены с разной текстурой в отображении морфометрического атрибута “генеральная кривизна”.

Ключевые слова: морфометрия, неотектоника, Баренцево море, сейсмические разрезы, разломная сеть, глубинное строение

DOI: 10.31857/S2686739722602484, EDN: THWTST

Влияние геодинамически активных процессов северо-западного обрамления Евразии на Арктические шельфы России выражается в сейсмичности, неотектонических нарушениях осадочного разреза, в особенности его верхней части, и во многих других факторах [1–3]. Детекция новейших и современных тектонических смещений дна в глубоководном обрамлении шельфа Баренцева может достоверно быть выполнена по данным сейсморазведки и особенно высокочастотного сейсмоакустического профилирования, в котором вертикальное разрешение может составлять менее 1 м. Плотность этого вида геофизических наблюдений в глубоководных частях акватории невелика и при выявлении на разрезах разломов между ними остаются значительные пространства, не представленные данными, трассировка нарушений в которых является проблематичной.

Современные цифровые модели рельефа (ЦМР) дна Арктики ИВКАО [4] среднего масштаба (1:250000 и мельче) не содержат пустот, что создает возможность трассировки нарушений по морфометрическим характеристикам рельефа. Этот подход дает достоверные результаты исключительно в совокупности с сейсмическими данными, подтверждающими связь аномалий морфометрии с разрывными нарушениями. Поскольку плотность сейсмических данных и результатов их интерпретации на шельфе Баренцева моря велика, для Российской части акватории проведено их сравнение с рельефом через морфометрический анализ. Это создает основу применения такого подхода к исследованию неотектоники в акваториях, менее изученных сейсморазведкой.

Большинство линеаментов в рельефе являются поверхностным выражением приповерхностных и глубинных разломов, структурных образований разного генезиса, размера, возраста и глубины. На сегодняшний момент существует ограниченное количество работ, связанных с морфометрическим анализом форм рельефа, характерных для тектонических структур и процессов [5–8]. Единичные работы посвящены идентификации тектонических структур в подводном рельефе с помощью морфометрии [9, 10].

В настоящей работе для анализа использована актуальная ЦМР ИВКАО [4] на сетке 200 м. Мор-

¹Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

²АО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция”, Мурманск, Россия

*E-mail: sysokolov@yandex.ru

фологическими признаками разломов являются линейные структуры в рельефе, а также структурные различия в рельефе на соседних доменах, ограниченных разломной сетью. Выделенные по морфометрическим атрибутам рельефа дна наиболее вероятные разломные структуры сравниваются с разломами, подтвержденными прямыми сейсмическими наблюдениями. На рис. 1 представлена карта генеральной кривизны (General Curvature), рассчитанная в ПО SAGA [11] по сглаженной в скользящем окне 5 км ЦМР IBCAO. Необходимость сглаживания состоит в том, что данная ЦМР является комбинацией обычных промеров, данных навигационных карт, альтиметрии с отдельными фрагментами детальной многолучевой батиметрии. Это создает артефакты на карте с пространственно неоднородной точностью данных, которые необходимо исключить из интерпретации. На рис. 1 также приведены разломные сети по данным масштаба 1:5000000 [12] и по данным листа Т-37-40 геологической карты масштаба 1:1000000 [13] с разделением по кинематическому типу, построенных по данным 2D-сейсморазведки. Анализ различных атрибутов, реализованных в ПО SAGA, показал, что в сопоставлении с разломами наиболее контрастным вариантом расчета является генеральная кривизна, которая представляет собой комбинацию вторых производных рельефа по обоим пространственным координатам.

Сопоставление генеральной кривизны с достоверно установленной по данным сейсморазведки разломной сетью, приведенной на изданных картах (см. рис. 1), показывает, что последняя разграничивает дно на домены с различием в характере атрибута. Наблюдаются домены с интенсивной хаотичной текстурой, большая часть которых сосредоточена в зонах между левосдвиговыми дислокациями северо-западной ориентации от центральной части Баренцева моря до верховьев трога Св. Анны на северо-востоке. В меньшей степени выражены домены с осветленной текстурой. Пересечение сдвига и хаотичного домена показано на разрезе рис. 2. Разрез содержит две отрицательные цветковые структуры, приповерхностное оперение которых выходит на поверхность дна. Главный сдвиговый разрыв уходит глубже триасового отражающего горизонта $A_3(T_3)$. В центральной части разреза в верхних 800–900 мс между двумя сдвиговыми структурами видны множественные дислокации, не только выходящие на поверхность, но и формирующие на дне небольшие положительные формы рельефа амплитудой от 10 до 25 м. Это указывает на современный возраст разрывных нарушений, смещающих мезозойские осадочные комплексы в режиме трансенсии, и их рельефообразующую роль. Вторичные нарушения могут быть проявлены во всем хаотичном домене между длинными

сдвигами (см. рис. 1). Отложения донных потоков, приспособляющихся к разломной сети, могут усиливать их рельефообразующий эффект.

Атрибут кривизны на северном обрамлении шельфа четко показывает борта трогов, выходящих к бровке шельфа. В Норвежской части Баренцева моря видны домены с хаотичной текстурой атрибута с линейными элементами (см. рис. 1), ориентированными в северо-восточном направлении и соответствующими известной системе трогов в этой части шельфа. На севере Российской части эти элементы подтверждены разломной сетью, вынесенной на карты среднего масштаба (см. рис. 1). В южной Российской части шельфа также наблюдаются домены с разной текстурой. Кроме этого, на карте [13] проведена разломная сеть северо-западной ориентации, аналогичной северной части акватории. Часть этих разломов, показанных на карте, не имеет сплошной трассировки через Южную часть Баренцева моря. Тем не менее глубинные разрезы (рис. 3) и высокочастотные профили (рис. 4) показывают признаки тектонических нарушений с выходом на поверхность дна на предполагаемой линии продолжения разлома к юго-западному окончанию Новой Земли. Особо отметим, что высокочастотный разрез (см. рис. 4) в окрестностях разлома содержит увеличение интенсивности рефлектора, находящегося на глубине ~6 м под дном, что вероятно указывает на скопление свободного газа, который по данному разлому поступает. Не исключена и другая интерпретация увеличения интенсивности, связанная с механическим разрушением в зоне разлома субгоризонтальной границы на глубине 363 мс, имеющей, скорее всего, мерзлотный генезис и служащей флюидоупором.

Система разломов северо-западной ориентации с очевидными признаками неотектонической активности охватывает всю акваторию Баренцева моря. По данным [14, 15], схема девонско-триасовой рифтовой системы и ее юрско-меловая активизация имеют систему трансформных смещений, пространственная ориентация которых совпадает с разломами, выделенными на картах [12, 13]. 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.

По данным [3], геодинамически активное обрамление шельфа Баренцева моря (хребты Книповича и Гаккеля) с переменным во времени сейсмическим циклом формирует деформационные волны, которые, распространяясь от двух взаимно перпендикулярных дивергентных зон, воздействуют на шельф. Кроме этого, исходя из постулата о том, что одним из “двигателей” тектоники

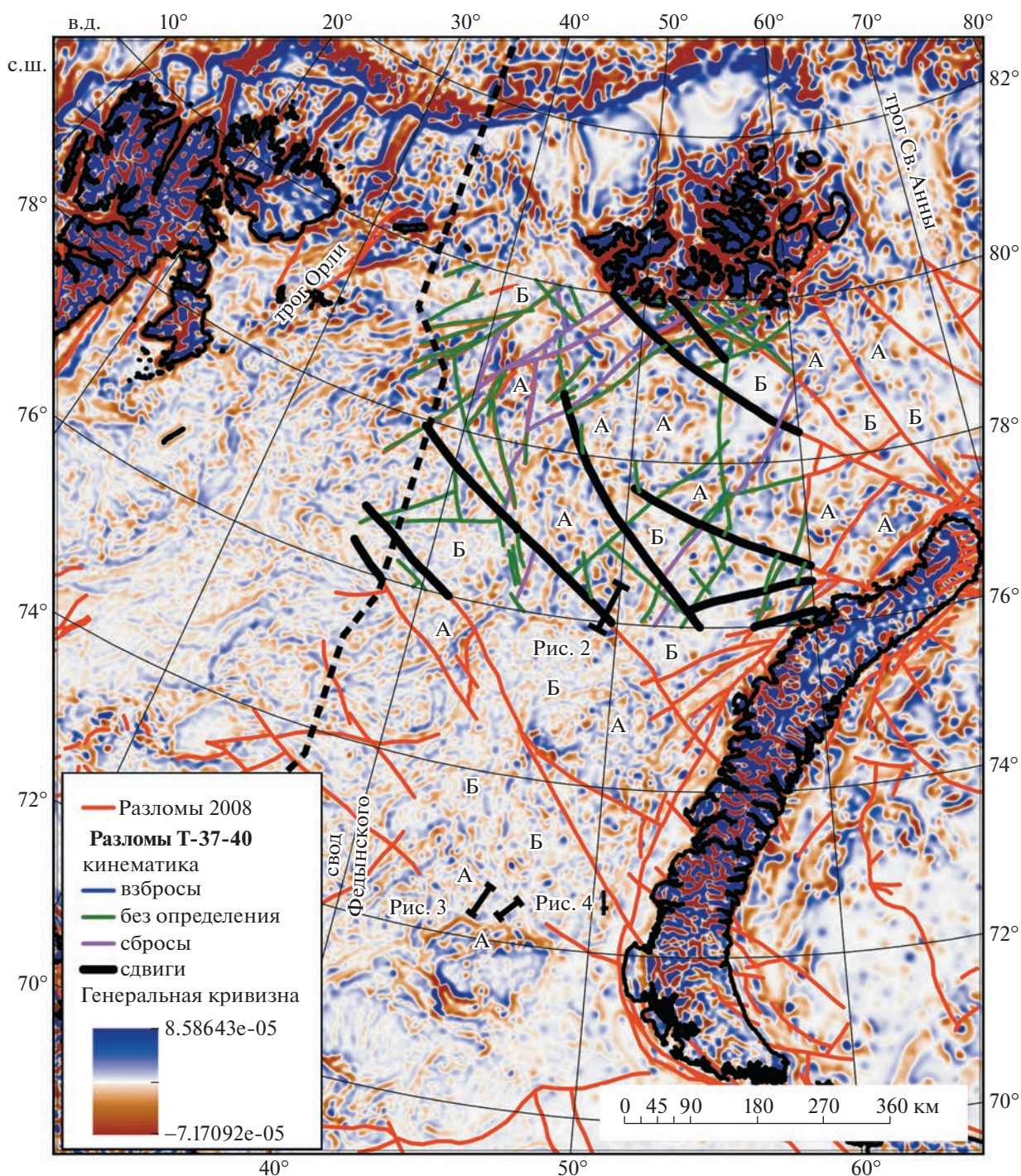


Рис. 1. Карта морфометрического атрибута “генеральная кривизна” Баренцева моря, рассчитанная по данным ИВСаО [4] в ПО SAGA [11], разломные сети масштаба 1:5000000 по данным [12] и 1:1000000 по данным листа Т-37-40 [13] с разделением по кинематическому типу. Буквами показаны домены в поле атрибута: А – с хаотичной текстурой, Б – с осветленной текстурой. Цифрами даны положения сейсмических разрезов на соответствующих рисунках.

плит является давление со стороны хребта, на шельфе имеет место суперпозиция двух источников давления. Они могут влиять на внутриплитную динамику, активизируя систему разломов,

расположенную под углом $\sim 45^\circ$ к обоим направлениям распространения деформационных волн.

Другим фактором геодинамики является наличие anomalно горячей мантии под архипелагом Шпицберген и его окрестностями. Это

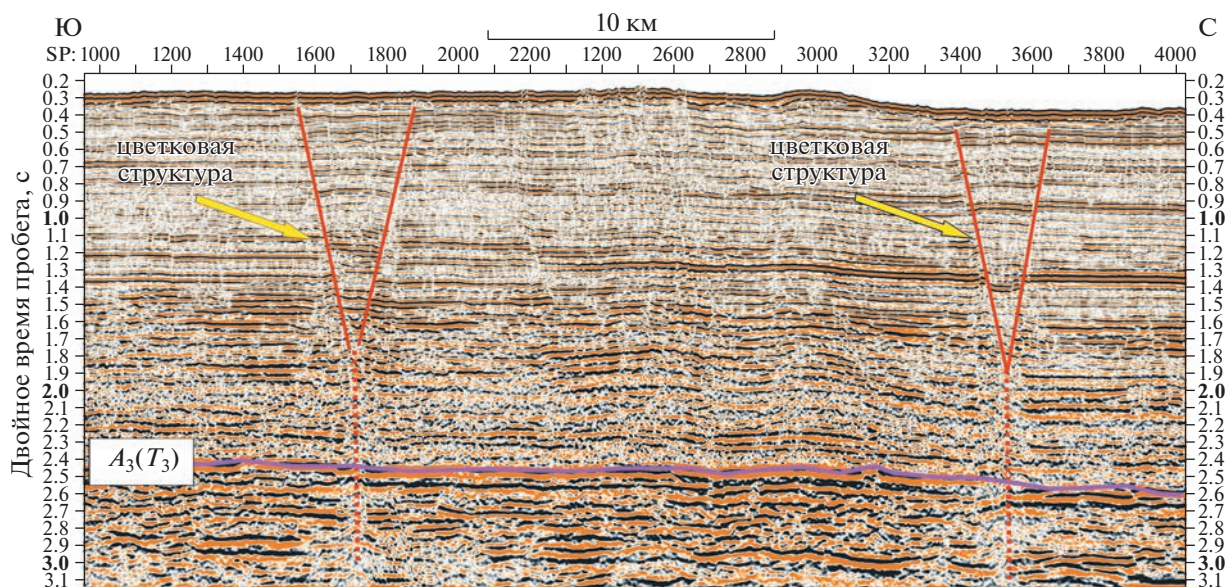


Рис. 2. Фрагмент разреза ОГТ TF102 в северной части Баренцева моря, пересекающий зону сдвиговых дислокаций северо-западной ориентации. Сплошными красными линиями показано оперение отрицательных цветковых структур, выходящее к поверхности дна. Пунктирными красными линиями показаны главные сдвиговые дислокации. Положение фрагмента показано на рис. 1.

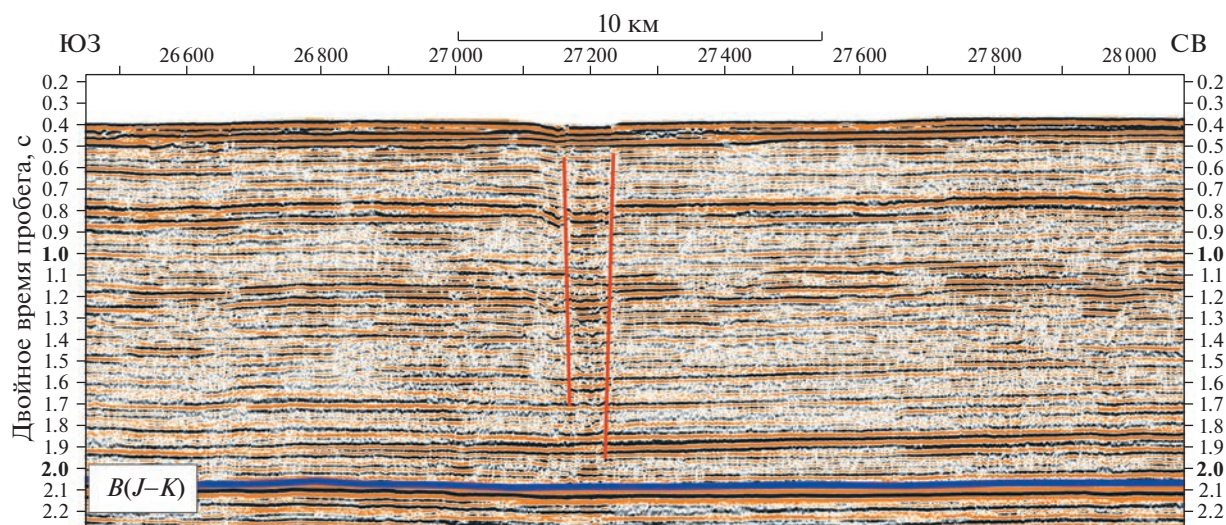


Рис. 3. Фрагмент разреза ОГТ KS103 в южной части Баренцева моря по данным [19], пересекающий зону предполагаемых дислокаций северо-западной ориентации. Сплошными красными линиями показаны разломы, выходящие к поверхности дна. Положение фрагмента показано на рис. 1.

подтверждается рифтогенными значениями теплового потока, измеренного в трое Орли в 25-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” [16]. Из рис. 5 а по форме изоповерхности сейсмических скоростей 8.3 км/с видно, что северо-западная часть Свальбардской плиты до глубин 250 км имеет полость с пониженными значениями скоростей, ориентированную в северо-восточном направлении. На юго-западном обрамлении ар-

хипелага Земля Франца Иосифа (рис. 5 б) на поверхности этой полости проявлена плотная сеть разломов северо-восточной ориентации, которые по данным интерпретации опорного разреза 4-АР [17] также выходят на поверхность дна. Это указывает на то, что динамика плиты с блоковым строением, кроме стандартных факторов тектоники плит, подвержена влиянию относительно более прогретой и подвижной области мантии,

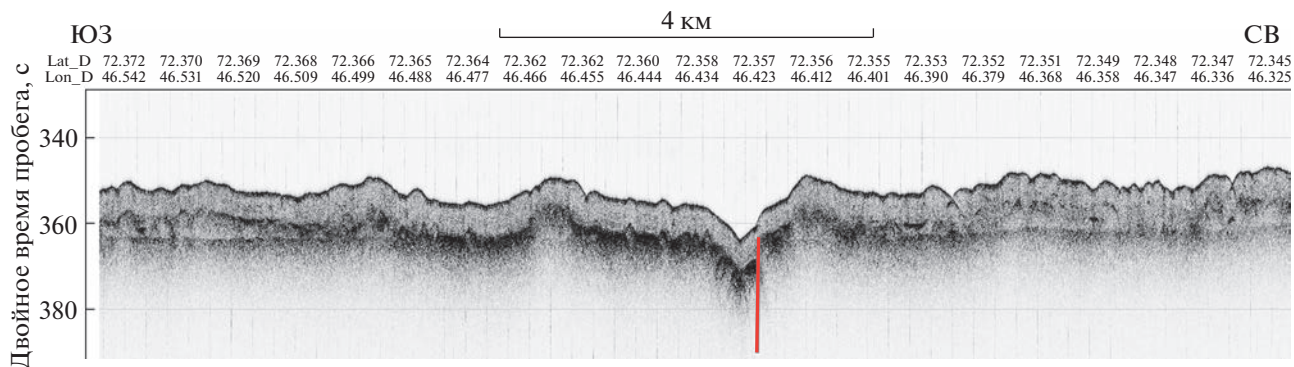


Рис. 4. Фрагмент разреза ANS_to_W44, полученного высокочастотным профилографом в 41-м рейсе нис “Академик Николай Страхов” в южной части Баренцева моря, пересекающий зону предполагаемых дислокаций северо-западной ориентации. Сплошной красной линией показан разлом, выходящий к поверхности дна. Положение фрагмента показано на рис. 1.

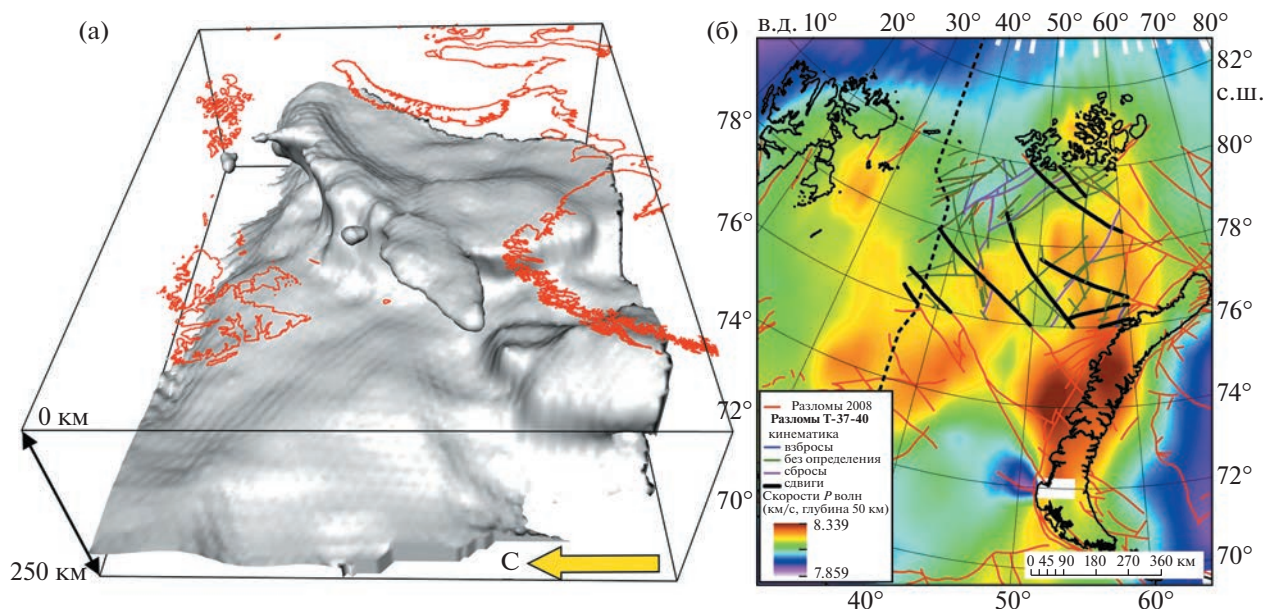


Рис. 5. Глубинное строение Баренцева моря по сейсмотомографическим данным [20]. а – 3D-блок-диаграмма изоповерхности скорости Р-волн со значением 8.3 км/с в интервале глубин от 250 км до поверхности. б – карта распределения скоростей Р-волн на глубине 50 км, разломные сети масштаба 1:5000000 по данным [12] и 1:1000000 по данным листа Т-37-40 [13] с разделением по кинематическому типу.

которая дополнительно воздействует на сложившуюся разломную сеть, а также проявлена четвертичным вулканизмом на Шпицбергене [18]. Изоповерхность рис. 5 а имеет небольшие углубления с северо-западной ориентацией, а также отчетливое ответвление низкоскоростной полости к Кольскому полуострову под высокоскоростным “козырьком” на глубине ~75 км под сводом Федынского.

Сопоставление разломной сети со скоростным срезом мантии на глубине 50 км (см. рис. 5 б) показывает, что нарушения с неотектонической активностью достаточно четко сегментируют ско-

ростные неоднородности как в северо-западном, так и в северо-восточном направлении. Это указывает на подвижность блоков плиты вплоть до глубинных областей, приводящую к неотектоническим деформациям на поверхности. В связи со сдвиговой кинематикой многих разломов вопрос о механизме тангенциального воздействия на блоки плиты, формирующего сколы с углами ~45° к геодинамически активным зонам обрамления Баренцева моря, остается открытым.

Таким образом, анализ глубинного скоростного строения мантии, разломной сети и морфометрии рельефа дна Баренцева моря показал наличие

связи реологически неоднородных и подвижных блоков верхней мантии и консолидированной части земной коры с разломной сетью глубинного заложения, выходящей на поверхность дна и являющейся рельефообразующим фактором, формирующим характерные домены с разной текстурой в отображении морфометрического атрибута “генеральная кривизна”. Подтверждена причинно-следственная цепочка тектонических процессов от глубинных разделов литосферы к поверхности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны И.В. Флоринскому за рекомендации по теме работы, экипажу НИС “Академик Николай Страхов” за самоотверженный труд в тяжелых условиях, сделавший возможным получение полных материалов. Авторы также выражают благодарность Российскому федеральному геологическому фонду (<https://rfgf.ru>) за доступ к сейсмическим данным.

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

1. *Крапивнер Р.Б.* Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.
2. *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.
3. *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. <https://doi.org/10.1785/0220210024>
4. *Jakobsson M., Mayer L.A., Bringsenparr 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>
5. *Florinsky I.V.* Quantitative topographic method of fault morphology recognition // Geomorphology. 1996. V. 16. № 2. P. 103–119.
6. *Jordan G.* Morphometric analysis and tectonic interpretation of digital terrain data: a case study // Earth Surface Processes and Landforms. 2003. V. 28 (8). P. 807–822. <https://doi.org/10.1002/esp.469>
7. *Jordan G., Meijninger B.M.L., Hinsbergen D.J., et al.* Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2005. V. 7 (3). P. 163–182. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.03.003>
8. *Ramli M.F., Yusof N., Yusoff M.K., et al.* Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review // Bull. Eng. Geol. Environ. 2010. V. 69. № 2. P. 215–233.
9. *Kokinou E., Panagiotakis C.* Automatic Pattern Recognition of Tectonic Lineaments in Seafloor Morphology to Contribute in the Structural Analysis of Potentially Hydrocarbon-Rich Areas // Remote Sensing. 2015. V. 12 (10). 1538. <https://doi.org/10.3390/rs12101538>
10. *Panagiotakis C., Kokinou E.* Linear Pattern Detection of Geological Faults via a Topology and Shape Optimization Method // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. № 1. P. 3–11. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2363080>
11. *Conrad O., Bechtel B., Bock M., et al.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
12. *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.
13. Карта дочетвертичных образований. Т-37-40 (Земля Франца-Иосифа, южные острова). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (новая серия). Лист 1. МАГЭ, ПМГРЭ, ВНИИОкеангеология, 2004. Отв. редактор Б.Г. Лопатин.
14. *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.
15. *Шипилов Э.В.* К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника. 2004. № 5. С. 26–52.
16. *Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В. и др.* Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // ДАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 318–323.
17. *Старцева К.Ф., Никишин А.М., Малышев Н.А. и др.* Геологическая и геодинамическая реконструкция Восточно-Баренцевого мегабассейна на основе анализа регионального сейсмического профиля 4-АР // Геотектоника. 2017. № 4. С. 51–67.
18. *Сироткин А.Н., Шарин В.В.* Возраст проявлений четвертичного вулканизма в районе Бокк-фьорда (архипелаг Шпицберген) // Геоморфология. 2000. № 1. С. 95–106.
19. *Казанин Г.С., Павлов С.П., Шлыкова В.В. и др.* Сейсмо-геологическое строение Печорского и юго-восточной части Баренцева морей на основе интерпретации каркасной сети сейсмических профилей МОВ ОГТ 2Д // Геология и геоэкология кон-

- тинентальных окраин Евразии. Выпуск 3. М.: 20. *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.
- ГЕОС, 2011. С. 59–81.

NEOTECTONIC DISLOCATIONS AT THE BARENTS SEA SHELF AND THEIR GENESIS ACCORDING TO THE MORPHOMETRY OF BATHYMETRY, SEISMIC SECTIONS AND THE DEEP MANTLE STRUCTURE

S. Yu. Sokolov^{a, #}, A. S. Abramova^a, and S. I. Shkarubo^b

^a*Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*JSC “Marine Arctic Geological Expedition”, Murmansk, Russian Federation*

[#]*E-mail: sysokolov@yandex.ru*

The paper provides a comprehensive analysis of the morphometric attribute “general curvature” for the bathymetry of the Barents Sea, seismic and seismoacoustic data containing in the wave field patterns tectonic faults emerging to the surface, a fault network of the sedimentary cover confirmed by seismic surveys, and seismotomographic data showing the heterogeneous deep structure by the distribution of seismic wave velocities in the upper mantle. The analysis of these data showed the presence of a causal relation between rheologically heterogeneous and mobile blocks of the upper mantle and the crystalline part of the Earth’s crust with the deep fault network, emerging on the bottom surface and being a relief-forming factor that forms characteristic domains with different textures performed by the morphometric attribute “general curvature”.

Keywords: morphometry, neotectonics, Barents sea, seismic sections, fault network, deep structure