

УДК 550.34

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СЕЙСМОТЕКТОНИКЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ДОННЫХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ

© 2022 г. А. А. Крылов^{1,2,*}, Академик РАН Л. И. Лобковский^{1,2,3}, Д. Д. Рукавишников¹,
Б. В. Баранов¹, С. А. Ковачев¹, К. А. Дозорова¹,
Н. В. Цуканов¹, член-корреспондент РАН И. П. Семилетов²

Поступило 17.06.2022 г.

После доработки 27.06.2022 г.

Принято к публикации 24.07.2022 г.

Представлены результаты новых локальных сейсмических наблюдений в море Лаптевых с помощью донных сейсмостанций, которые были объединены с актуальными данными из глобальных и региональных каталогов землетрясений. На шельфе моря Лаптевых основная часть эпицентров землетрясений объединяется в несколько кластеров, расположенных в пределах Восточно-Лаптевской провинции горстов и грабенов и заключена между двумя detachментами растяжения. Первый маркирует восточную границу системы Усть-Ленского и Омолойского рифтов, а второй является восточной границей цепи рифтов Анисин, Заря и Бельковско-Святоносский. При этом линейная зона эпицентров, приуроченная к хребту Гаккеля, при переходе на шельф смещается вдоль Хатангско-Ломоносовской зоны разломов на северо-восток в направлении второго detachмента растяжения, который в настоящее время является единственно активным. Пространственное распределение землетрясений моря Лаптевых, построенное с учетом эпицентров микро- и слабых сейсмических событий на шельфе, не имеет достаточно четких границ, определяющих контуры ранее предполагаемой литосферной микроплиты.

Ключевые слова: море Лаптевых, землетрясения, донные сейсмостанции, тектонические структуры, рифтовая система, detachмент растяжения

DOI: 10.31857/S2686739722601582

Лаптевоморский регион является относительно малоизученным сегментом границы Евразийской и Североамериканской плит, в котором срединно-океанический спрединг в Евразийском бассейне сменяется континентальным рифтингом на шельфе моря Лаптевых. Механизм этого геодинамического процесса далек от полного понимания.

Особенностям сейсмичности и тектоники Лаптевоморского региона посвящен ряд публикаций [1–6]. Были выдвинуты предположения о существовании одной или даже двух литосферных микроплит, в основном, основываясь на сейсмологических данных, а именно распределении относительно сильных землетрясений с магниту-

дами от 4 до 6 [1, 2]. С другой точки зрения, такие “микроплиты” могут являться коровыми деформируемыми образованиями, способными совершать горизонтальные перемещения по нижнекорovому пластичному астенослою [3].

Следует подчеркнуть, что первые модели современных геодинамических процессов в Лаптевоморском регионе, в основном, основывались на распределении сильных землетрясений, причем определение эпицентров землетрясений осуществлялось по данным отдельных наземных сейсмостанций. В дальнейшем, по мере развития российских региональных сейсмологических сетей представительность каталогов землетрясений улучшалась вследствие снижения магнитудного порога и ошибок локализации гипоцентров. Тем не менее для детального анализа сейсмичности и тектоники моря Лаптевых необходимы инструментальные наблюдения локальной микросейсмичности на основной части шельфа с помощью донных сейсмостанций (ДС), которых не проводилось вплоть до недавнего времени.

В рамках настоящей работы были использованы данные наблюдений автономных ДС, выпол-

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук, Москва, Россия

² Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Российской академии наук,
Владивосток, Россия

³ Московский физико-технический институт,
Москва, Россия

*E-mail: artyomkrly@ocean.ru

ненных в серии морских экспедиций, которые проводились в 2018–2020 гг. и были направлены на комплексное изучение процесса массивного выделения пузырькового метана из морских осадков, которое сосредоточено, в основном, в окрестности сочленения хребта Гаккеля со структурами шельфа [7, 8]. Сейсмологическая программа работ была нацелена на поиск и анализ взаимосвязи тектонических процессов с разгрузкой метана из морских осадков в водную толщу, что особенно перспективно вследствие выявленного глубинного происхождения выделяемого метана на внешнем шельфе моря Лаптевых [9].

На рис. 1 представлены конструкция и внешний вид донных сейсмостанций МПССР, использованных в наблюдениях в море Лаптевых, а также схема постановки и расположение станций нескольких модификаций в экспериментах 2018–2020 гг. МПССР являются полностью автономными приборами, укомплектованными блоками широкополосных молекулярно-электронных и высокочастотных электродинамических сейсмических датчиков, а также гидрофоном. Регистрируемый диапазон частот 0.016–50 Гц. При обработке сейсмических записей также привлекались данные широкополосной сейсмостанции в п. Тикси, относящейся к сети ЕГС РАН [10]. Эти материалы были включены в подготовленный авторами наиболее представительный и актуальный каталог землетрясений моря Лаптевых, объединяющий электронные базы данных ЕГС РАН [10], ISC [11] и USGS [12] и использованный в работе при описании сейсмичности этого региона.

Распределение эпицентров землетрясений и схема основных тектонических структур в акватории моря Лаптевых показаны на рис. 2 а. В распределении землетрясений можно выделить узкую полосу их эпицентров на спрединговом хребте Гаккеля и область эпицентров между п-овом Таймыр, дельтой р. Лена и Новосибирскими островами, которая охватывает основные структуры шельфа моря Лаптевых.

Зона многочисленных эпицентров, приуроченная к Лено-Таймырской зоне пограничных поднятий [1], протягивается по южному обрамлению моря Лаптевых от п-ва Таймыр через Анабарский и Оленёкский заливы к дельте Лены и заливу Буор-Хая. Другая отчетливая зона концентрации событий прослеживается от хребта Гаккеля в направлении Янского залива. Она приурочена к т.н. Восточно-Лаптевской провинции горстов и грабенов (ВЛПГГ) и заключена между двумя detachmentами растяжения, т.е. главными пологими или субгоризонтальными сбросами/срывами, по которым реализуются деформации простого сдвига в вертикальной плоскости [13]. ВЛПГГ рассматривается как регион, затронутый деформациями растяжения [2]. Преобла-

дание деформаций растяжения в пределах ВЛПГГ подтверждается известными механизмами очагов землетрясений [4]. Восточный detachment растяжения является восточной границей цепи рифтов Анисин, Заря и Бельковско-Святоносский, а западный detachment растяжения маркирует восточную границу системы Усть-Ленского и Омолойского рифтов. На рис. 2 б приведен сейсмогеологический разрез по профилю, проходящему через Усть-Ленскую рифтовую систему (УЛР), ВЛПГГ и рифтовую зону Анжу (РЗА) [5], демонстрирующий положение упомянутых detachmentов растяжения в вертикальной плоскости.

В распределении эпицентров в пределах ВЛПГГ (рис. 2 а) можно отметить несколько особенностей. Во-первых, эпицентры землетрясений этой структуры не являются непосредственным продолжением полосы событий, приуроченных к хребту Гаккеля, а смещаются от нее в северо-восточном направлении. Смещение маркируется облаком эпицентров субширотного простирания и происходит в том месте, где Хатангско-Ломоносовская зона разломов (ХЛЗР) отделяет Евразийскую океаническую котловину от внутриконтинентальной Лаптевоморской рифтовой системы. Положение ХЛЗР также отражается в аномальных геофизических полях и в волновой сейсмической картине на разрезах [14, 15].

Во-вторых, в пределах ВЛПГГ эпицентры землетрясений не распределяются равномерно, а образуют несколько крупных зон скопления очагов. Визуально можно выделить как минимум три крупных кластера: самый северный протягивается от ХЛЗР в субдолготном направлении на юг вплоть до 76° с.ш.; центральный кластер примыкает к о. Бельковский с западного и северо-западного направления; южный кластер, наиболее протяженный, расположен юго-западнее о. Бельковский и вытянут в направлении к дельте р. Лена. Кластеризация пояса сейсмичности, приуроченного к ВЛПГГ, может быть связана с возможным пересечением этой провинции сдвиговыми разломами, на присутствие которых указывается в некоторых работах [2], и соответственной сегментацией восточного detachmentа растяжения.

В-третьих, от места сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых в юго-западном направлении прослеживаются две линейные цепочки эпицентров: одна протягивается вдоль ХЛЗР до Хатангского залива, вторая – немного южнее, параллельно ХЛЗР, до Анабарского залива. В структурном плане очаги этих землетрясений приурочены к УЛР. Они проявляются на отдельных разломах этой рифтовой системы вблизи ее пересечения с ХЛЗР. Это может свидетельствовать о продолжающейся активности этой структуры.

Анализ полученной картины сейсмичности и ее сравнение с распределением основных разлом-

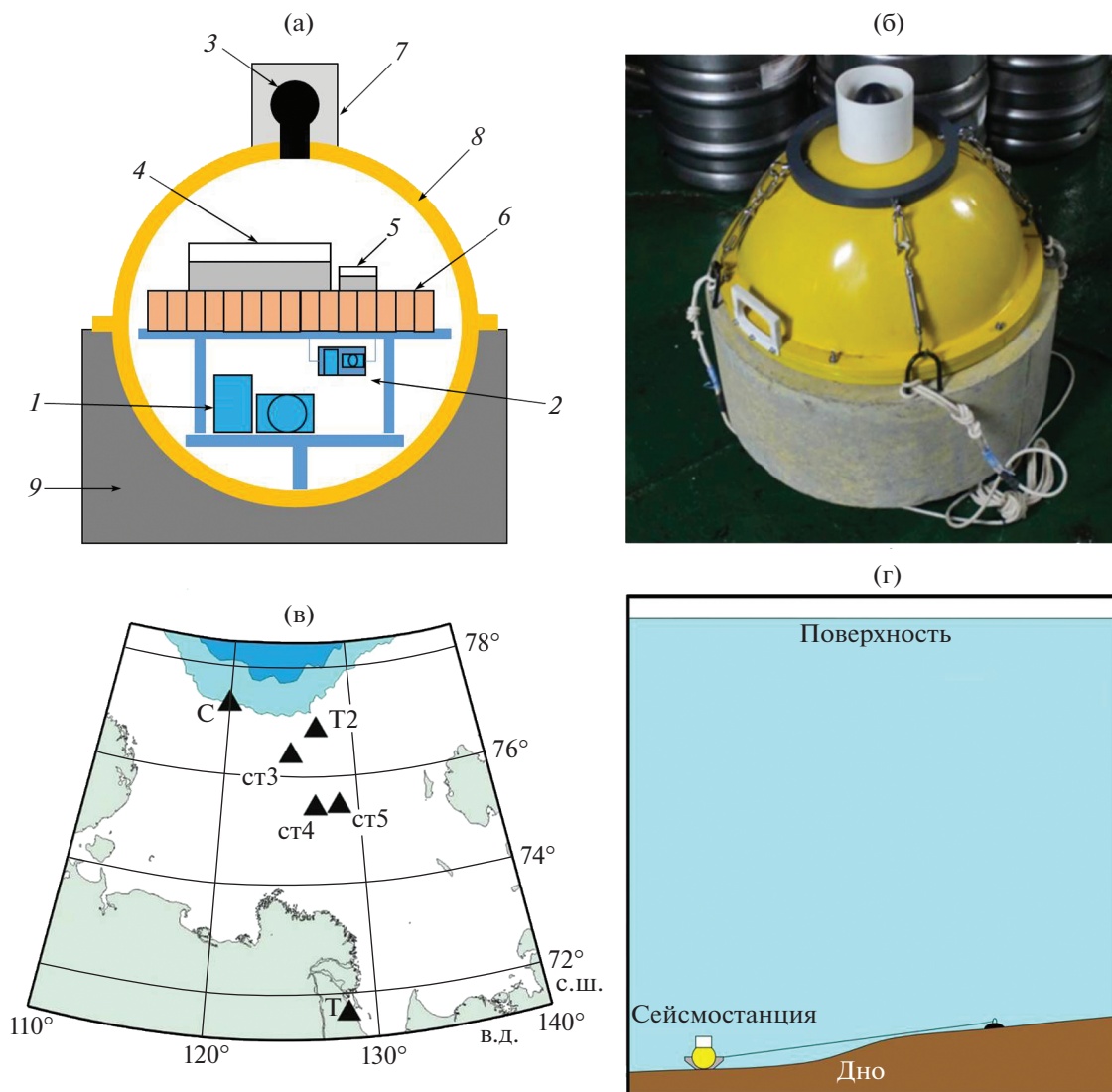


Рис. 1. (а) Конструкция донных сейсмостанций МПССР разработки ИО РАН: 1 – трехкомпонентный широкополосный сейсмометр СМЕ-4311, 2 – трехкомпонентный короткопериодный сейсмометр (СВ-10 и СГ-10) на подвесе, 3 – гидрофон 5007 м, 4 – регистратор сейсмических сигналов URS-S, 5 – модуль цифрового компаса, 6 – блок батарей, 7 – защитный кожух для гидрофона, 8 – дюралевая сфера, 9 – бетонный балласт. (б) Внешний вид донной сейсмостанции МПССР на НИС “Академик Мстислав Келдыш”, осень 2018 г. (в) Расположение донных сейсмостанций, которые проработали несколько месяцев и были успешно подняты: ст4, ст5, С – в сезон 2018–2019 гг.; ст3, Т2 – в сезон 2019–2020 гг. (Т – наземная сейсмостанция ЕГС РАН в п. Тикси). (г) Схема постановки системы сейсмостанция–веревка–балласт, используемая при диапазоне глубин до 80 м с возможностью последующего подъема станции тралением.

ных зон и тектонических структур в море Лаптевых позволил сделать ряд новых выводов:

1. Зона концентрации землетрясений, которая протягивается от хребта Гаккеля в направлении Янского залива, приурочена к ВЛПГГ и заключена между двумя detachментами. Геометрия вертикального разреза detachментов растяжения, приведенного в работе [5], дает основание предположить, что в настоящее время активным является только восточный detachмент растяжения. Это подтверждает предположение о смещении оси растяжения в восточном направлении [16].

2. Поле эпицентров в пределах ВЛПГГ не является продолжением полосы событий, приуроченных к хребту Гаккеля, а смещено в северо-восточном направлении. Смещение маркируется облаком эпицентров субширотного простираения и дает основание утверждать, что ХЛЗР, отделяющая хребет от ВЛПГГ, является в настоящее время активной по крайней мере в ее северо-восточном сегменте. Кроме того, цепочка землетрясений, прослеживаемая вдоль ХЛЗР от области смещения по направлению к Хатангскому заливу,

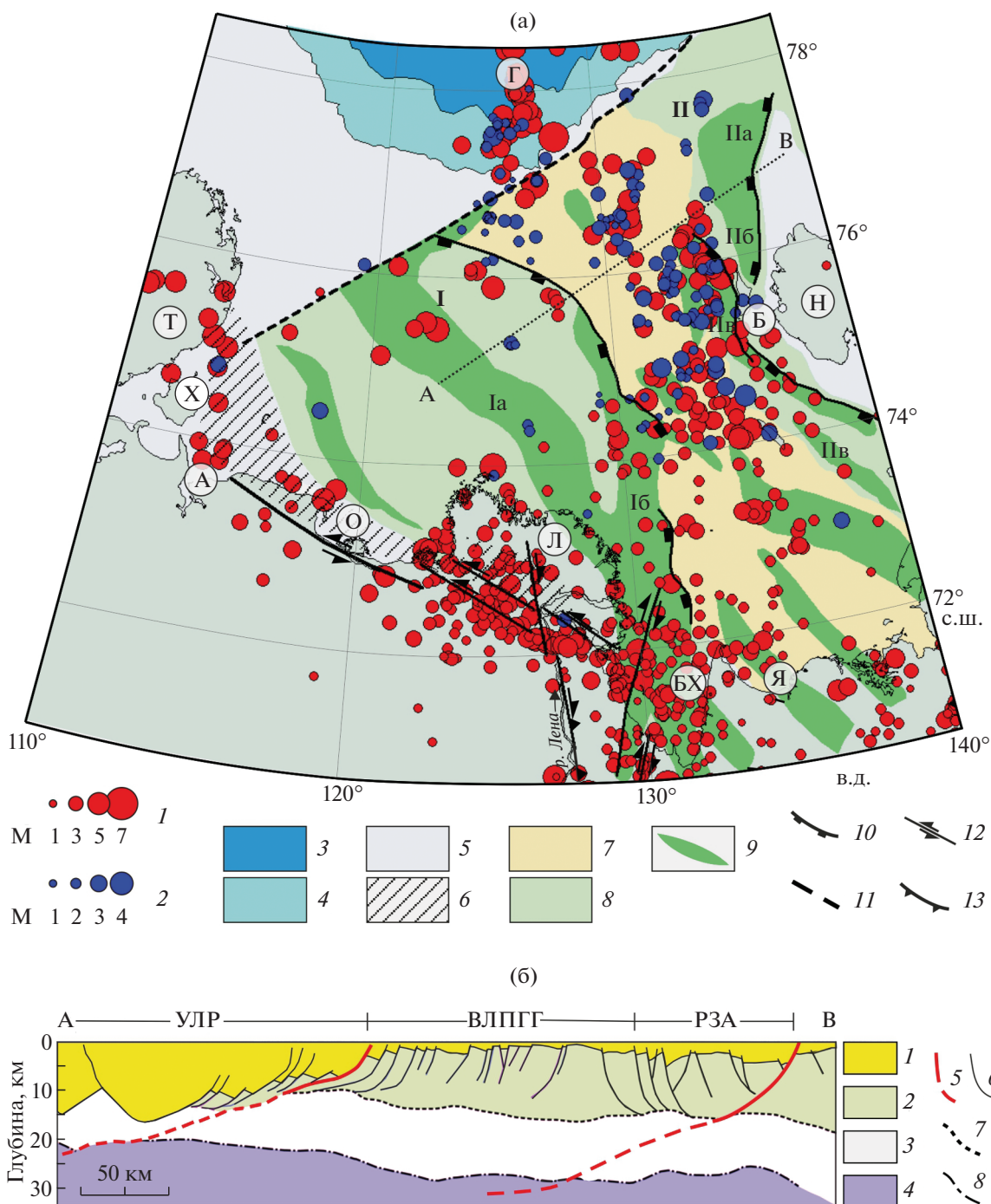


Рис. 2. (а) Сейсмичность моря Лаптевых и схема основных структурных элементов, составленная с использованием [1, 4–6]. 1 – эпицентры землетрясений из сводного каталога ЕГС РАН, ISC и USGS; 2 – эпицентры землетрясений, зарегистрированных донными сейсмостанциями; 3 – Евразийский бассейн; 4 – континентальный склон; 5 – шельф; 6 – Лено-Таймырская зона пограничных поднятий; 7 – Восточно-Лаптевоморская провинция горстов и грабенов (ВЛПГГ); 8 – рифтогенные прогибы: I – Усть-Ленская рифтовая система; II – рифтовая зона Анжу; 9 – основные рифты и грабены Лаптевоморской рифтовой системы: Iа – Усть-Ленский; Iб – Омолойский; IIа – Анисин; IIб – Заря; IIв – Бельковско-Святоносский; 10 – detachmentы растяжения; 11 – Хатангско-Ломоносовская зона разломов; 12 – сдвиги; 13 – надвиги; Г – хребет Гаккеля; Т – п-ов Таймыр; Л – дельта реки Лены; Н – Новосибирские острова; Б – о. Бельковский; заливы: Х – Хатангский; А – Анабарский; О – Оленёкский; БХ – Буор-Хая; Я – Янский. А–Б – положение профиля, приведенного на рис. 2 б. (б) Фрагмент интерпретированного разреза по сейсмическому профилю А–В (МАГЭ А4, по [5] с изменениями), положение профиля – на рис. 2 а. 1 – Син- и пост-рифтовые отложения; 2 – верхняя кора; 3 – нижняя кора; 4 – верхняя мантия; 5 – основные detachmentы растяжения; 6 – литрические сбросы; 7 – граница Конрада; 8 – граница Мохоровичича. УЛР – Усть-Ленская рифтовая система; ВЛПГГ – Восточно-Лаптевоморская провинция горстов и грабенов; РЗА – рифтовая зона Анжу.

может свидетельствовать о продолжающейся слабой активности ее юго-западного отрезка.

3. В пределах ВЛПГГ эпицентры землетрясений не распределяются равномерно, а образуют несколько крупных зон скопления очагов. Такая кластеризация пояса сейсмичности может быть связана с возможным пересечением этой провинции сдвиговыми разломами, на присутствие которых указывается в некоторых работах [2], и соответственной сегментацией восточного detachmenta растяжения.

4. Пространственное распределение землетрясений моря Лаптевых, построенное с учетом эпицентров микро- и слабых сейсмических событий на шельфе ($1 < M < 3$), представленное на рис. 2 а, не имеет достаточно четких границ, определяющих контуры выделяемой в работе [1] литосферной микроплиты. Для объяснения тектонической обстановки исследуемого района скорее подходит геодинамическая модель верхнемантийной конвекции в Арктическом регионе, представленная в работе [17].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2021-0004 (описание современной тектоники региона), при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ № 20-05-00533 (обработка записей донных сейсмографов), гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-45.2022.1.5 (анализ распределения землетрясений), гранта РНФ № 21-77-30001 (планирование и организация комплексных геофизических исследований, работа по установке донных сейсмостанций в экспедициях).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисов Г.П.* Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб: ВНИИОкеангеология. 2000. Вып. 3. С. 104–114.
2. *Drachev S.S.* Laptev Sea Rifted Continental Margin: Modern Knowledge and Unsolved Questions // *Polarforschung*. 2000. V. 68. № 1–3. P. 41–50.
3. *Лобковский Л.И.* Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и северо-восточной Азии // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495. <https://doi.org/10.15372/GiG20160302>
4. Сеймотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики // Под ред. Л.П. Имаевой, И.И. Колодезникова. Ин-т земной коры СО РАН, Ин-т геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2017. 134 с.
5. *Drachev S.S., Mazur S., Campbell S., Green C., Shkarubo S.I., Tishchenko A.* Crustal architecture of the Laptev Rift System in the East Siberian Arctic based on 2D long-offset seismic profiles and gravity modelling // *Petroleum Geoscience*. 2018. V. 24. P. 402–413. <https://doi.org/10.1144/petgeo2016-143>
6. *Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С.* Динамика рельефа и сеймотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // *Геотектоника*. 2019. № 5. С. 62–77. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019562-77>
7. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et al.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost related methane fluxes and role of sea ice // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. V. 373. Article ID: 20140451. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>
8. *Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E.* Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences* 2019. 9. 251. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060251>
9. *Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K., Kosmach D., Brüchert V., Shakhova N., Salyuk A., Sapart C.J., Chernykh D., Noormets R., Semiletov I., Gustafsson Ö.* Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 2021. V. 118 (10). e2019672118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2019672118>
10. Единая Геофизическая служба РАН, Электронный ресурс: http://www.gsras.ru/new/ssd_news.htm (Дата доступа: 24.12.2021).
11. International Seismological Centre. Электронный ресурс: <https://doi.org/> (Дата доступа: 24.12.2021). <https://doi.org/10.31905/D808B830>
12. U.S. Geological Survey. Электронный ресурс: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (Дата доступа: 24.12.2021).
13. *Геологический словарь* // Под ред. О.В. Петрова. ФГБУ “ВСЕГЕИ”, Санкт-Петербург. 2012. 440 с.
14. *Шпилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И.* Строение Хатангско-Ломоносовской зоны разломов по сейсмическим данным // *ДАН*. 2019. Т. 487. № 3. С. 304–309. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873304-309>
15. *Шпилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И.* Хатангско-Ломоносовская зона разломов: строение, тектоническая позиция, геодинамика // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 3 (35). С. 47–61. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-47-61>
16. *Drachev S.S., Kaul N., Beliaev V.N.* Eurasia spreading basin to Laptev Shelf transition: structural pattern and heat flow // *Geophysical Journal International*. 2003. V. 152. P. 688–698. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01882.x>
17. *Кононов М.В., Лобковский Л.И.* Влияние верхнемантийной конвективной ячейки и связанной с ней субдукции Тихоокеанской плиты на тектонику Арктики в позднем Мелу–Кайнозое // *Геотектоника*. 2019. № 6. С. 27–45. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019627-45>

NEW DATA ON SEISMOTECTONICS OF THE LAPTEV SEA FROM OBSERVATIONS BY OCEAN BOTTOM SEISMOGRAPHS

**A. A. Krylov^{a,b,#}, Academician of the RAS L. I. Lobkovsky^{a,b,c}, D. D. Rukavishnikova^a, B. V. Baranov^a,
S. A. Kovachev^a, K. A. Dozorova^a, N. V. Tsukanov^a, and Corresponding Member of the RAS I. P. Semiletov^b**

^a *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^c *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: artyomkrlyv@ocean.ru*

The results of new local seismic observations in the Laptev Sea with the help of ocean bottom seismographs, which were combined with actual data from global and regional earthquake catalogs, are presented. On the Laptev Sea shelf, the main part of earthquake epicenters is combined into several clusters located within the East Laptev province of horsts and grabens and is enclosed between two extension detachments. The first one marks the eastern boundary of the Ust-Lena and Omoloy rift systems, and the second one is the eastern boundary of the Anisin, Zarya, and Belkovsko-Svyatonosskiy rift chains. At the same time, the linear zone of epicenters confined to the Gakkel Ridge, when moving to the shelf, shifts along the Khatanga-Lomonosov fault zone to the northeast in the direction of the second extension detachment, which probably remains the only active one. The spatial distribution of earthquakes in the Laptev Sea, built taking into account the epicenters of micro- and weak seismic events on the shelf, does not have sufficiently clear boundaries that determine the contours of the previously assumed lithospheric microplate.

Keywords: Laptev Sea, earthquakes, ocean bottom seismograph, tectonic structures, rift system, extension detachment