

УДК: 550.348.436

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 13.07.2023 г. В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

© 2024 г. А. И. Филиппова^{1,2, *}, А. С. Фомочкина^{2,3}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

³РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия

*E-mail: aleirk@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

В данной работе проведены детальные исследования землетрясения 13.07.2023 г., произошедшего в восточной части шельфа моря Лаптевых (Бельковско-Святоносский рифт). Интерес к этому событию обусловлен, с одной стороны, местоположением его эпицентра, к востоку от которого происходит резкий спад сейсмической активности. С другой стороны, для его эпицентральной области имеются детальные данные о строении верхней части коры, полученные методом МОВ ОГТ, что позволяет нам провести анализ сейсмотектонической позиции очага этого землетрясения. Очаговые параметры в приближении мгновенного точечного источника были рассчитаны по данным поверхностных волн, зарегистрированных на телесеismicких расстояниях. В результате были получены значения скалярного сейсмического момента ($M_0 = 9.8 \cdot 10^{16}$ Н·м), соответствующей ему моментной магнитуды ($M_w = 5.3$), глубины очага ($h = 8$ км) и фокальный механизм (сброс по пологой плоскости СЗ–ЮВ простириания). Проведено сопоставление полученных результатов с данными сейсмологических агентств. Показано, что отличия между ними, вероятно, обусловлены различиями в исходных данных, в т.ч. в их частотном составе. При этом наши оценки лучше согласуются с имеющейся геолого-геофизической информацией о тектонике исследуемого района. Учитывая данные о простириании, падении и глубине проникновения разломов и полученные нами значения очаговых параметров, сделан вывод о том, что землетрясение 13.07.2023 г., скорее всего, связано с основным листрическим сбросом в западном борту Бельковско-Святоносского рифта.

Ключевые слова: параметры очага землетрясения, поверхностные волны, море Лаптевых, Бельковско-Святоносский рифт, Арктика.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724060089>, EDN: RGGSEQ

ВВЕДЕНИЕ

13.07.2023 г. в 13 ч 6 мин (GMT) в восточной части шельфа моря Лаптевых, недалеко от Новосибирских островов, произошло землетрясение с $mb = 5.4$ [Федеральный..., 2024] и $M_w = 5.0$ [Global..., 2024] (рис. 1). Интерес к этому событию обусловлен, с одной стороны, местоположением его эпицентра, к востоку от которого происходит резкий спад сейсмической активности. С другой стороны, для его эпицентральной области имеются детальные данные о строении верхней части

коры [Драчев, 2000; Drachev et al., 1998], что позволяет нам провести анализ сейсмотектонической позиции очага этого землетрясения. В данной работе по записям поверхностных волн, зарегистрированных на телесеismicких расстояниях, были выполнены расчеты очаговых параметров землетрясения 13.07.2023 г. в приближении мгновенного точечного источника [Букчин, 1989], проведено сопоставление полученных результатов с данными сейсмологических агентств и имеющейся геолого-геофизической информацией.

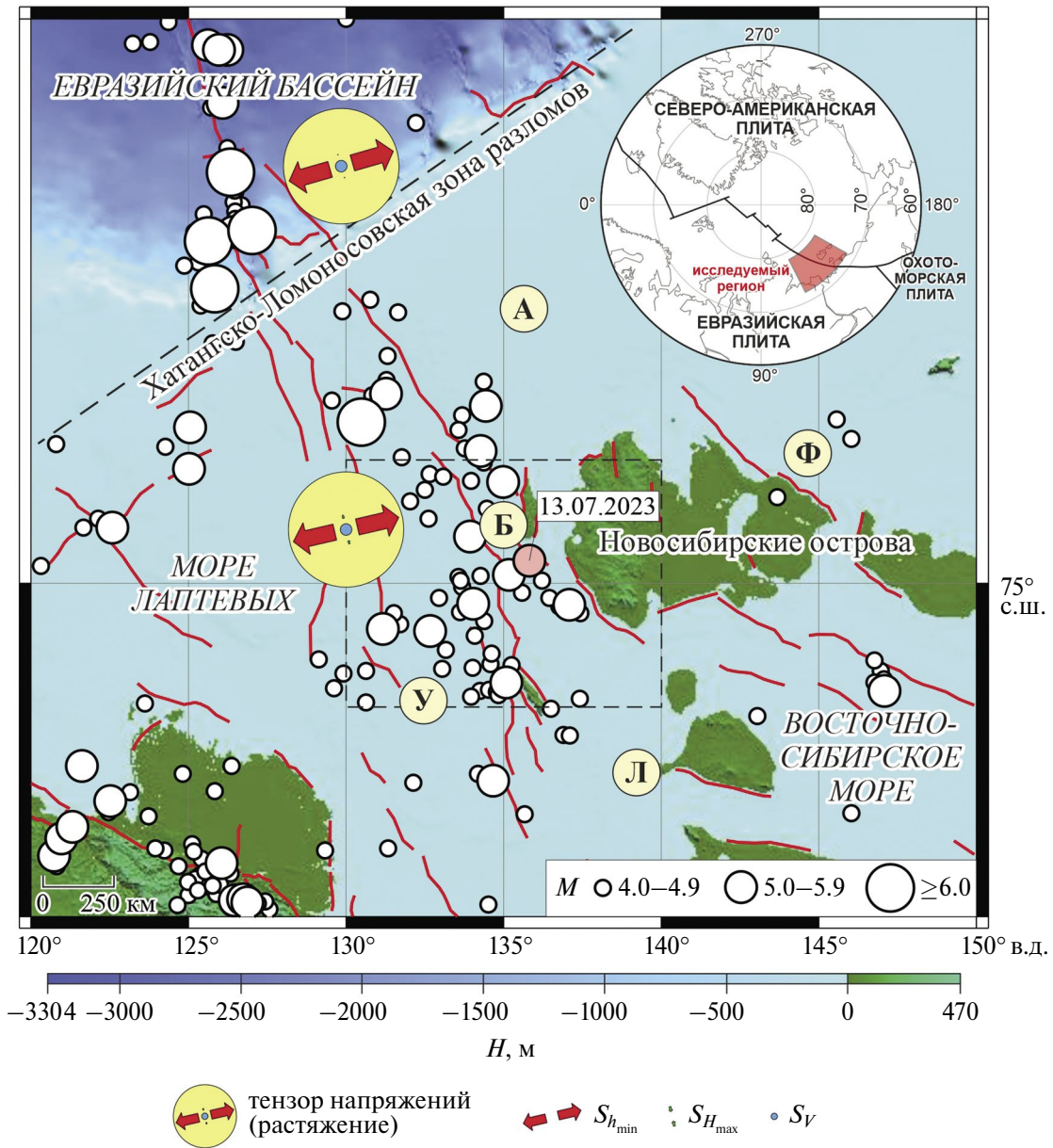


Рис. 1. Регион исследования. Эпицентры землетрясений с $M \geq 4.0$ (1960–2023 гг.) приведены по данным ISC-каталога [International..., 2024], розовым цветом выделено землетрясение 13.07.2023 г. с $M_w = 5.0$ [Global..., 2024]. Активные разломы обозначены красными кривыми по работе [Zelenin et al., 2022], Хатангско-Ломоносовская зона разломов – жирным пунктиром по работе [Шипилов и др., 2021]. Тензоры напряжений для Евразийского бассейна (хребет Гаккеля) и шельфа моря Лаптевых показаны по работе [Filipova, Melnikova, 2023]: $S_{h_{min}}$ и $S_{H_{max}}$ – минимальное и максимальное горизонтальное сжатие соответственно, S_V – вертикальное напряжение. Буквами в кружках обозначены рифты: А – Анисинский, Б – Бельковско-Святоносский, Л – Ляховский, У – Усть-Ленский, Ф – Фаддеевский [Драчев, 2000; Имаева и др., 2017]. Здесь и далее топография и батиметрия показаны согласно глобальной модели ETOPO 2022 [ETOPO..., 2024]. Тонким пунктиром выделена область, показанная на рис. 7а. На врезке обозначено положение исследуемого региона в Арктике, границы литосферных плит показаны схематично по работе [Bird, 2003].

Исследуемый регион характеризуется относительно высоким уровнем сейсмической активности. С 1960 г. здесь зарегистрировано около двух сотен сейсмических событий с магнитудами более 4.0 (рис. 1). К северу от шельфа моря

Лаптевых – в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана – эпицентры большинства землетрясений сосредоточены вдоль ультрамедленного спредингового срединно-океанического хребта Гаккеля, являющегося границей

Евразийской и Северо-Американской литосферных плит [Bird, 2003]. На самом шельфе сейсмичность становится рассеянной [Avetisov, 1999], а граница плит диффузной [Gaina et al., 2002]. При этом на востоке моря Лаптевых за инструментальный период наблюдений зарегистрировано больше землетрясений, чем в его западной и центральной частях, а в районе Новосибирских островов наблюдается резкий спад сейсмической активности (рис. 1).

Шельф моря Лаптевых представляет собой континентальную окраину Северной Евразии. Он отделен от Евразийского бассейна Хатангско-Ломоносовской разломной зоной, сдвиговые смещения по которой прекратились в раннем кайнозое [Шипилов и др., 2021] (рис. 1). На шельфе развита система рифтовых впадин, разделенных поднятиями (горстами) [Драчев, 2000; Имаева и др., 2017; Drachev, Scharubo, 2017]. Рассматриваемое сейсмическое событие приурочено к одной из таких впадин – Бельковско-Святоносскому рифту. По данным морского многоканального сейсмопрофилирования МОВ ОГТ северный субмеридиональный сегмент этого рифта имеет ширину 20–30 км, а в районе 75°N и 136°E , т.е. вблизи эпицентра землетрясения 13.07.2023 г., его направление изменяется на юго-восточное [Драчев, 2000]. Еще южнее – вблизи о. Столбовой – его ширина достигает 50 км, а сам рифт состоит из двух полуграбенов, разделенных горстом. По оценкам авторов работ [Драчев, 2000; Gaina et al., 2002] в целом процессы растяжения на шельфе моря Лаптевых начались в позднем мелу в связи с раскрытием Евразийского бассейна. Они продолжают до настоящего времени, что подтверждается

результатами многочисленных реконструкций напряженно-деформированного состояния литосферы различных масштабных уровней, основанных на данных о механизмах очагов региональных землетрясений (например, см. рис. 1) [Имаева и др., 2017; Filippova, Melnikova, 2023; Heidbach et al., 2018; Имаева et al., 2017; Sereckina, Melnikova, 2018].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исходными данными для оценок очаговых параметров землетрясения 13.07.2023 г. служили его записи на широкополосных станциях сейсмических сетей П, IU, IC и BK [Albuquerque...1992; 2014; Northern..., 2014; Scripps..., 1986]. Спектры волн Рэля и Лява определялись методом спектрально-временного анализа (СВАН) [Левшин и др., 1986] в диапазоне периодов, где поверхностная волна выделялась наиболее надежно. Для этого отбирались записи с высоким отношением сигнал/шум и нормальной поляризацией поверхностных волн. Пример СВАН-обработки вертикальной компоненты станции СМВ (код станции соответствует международному стандарту) показан на рис. 2. В результате для дальнейших расчетов были выбраны записи 11 станций, расположенных в различных азимутах от эпицентра рассматриваемого события на эпицентральных расстояниях от 2467 до 6330 км (рис. 3). На всех станциях поверхностные волны были выделены на периодах от 40 с. Максимальный период для трансверсальных компонент станций ERM, KDAK, OBN составил 75 с, станций TLY и FFC – 80 и 90 с соответственно. Во всех остальных случаях фильтрация проводилась до периода 120 с.

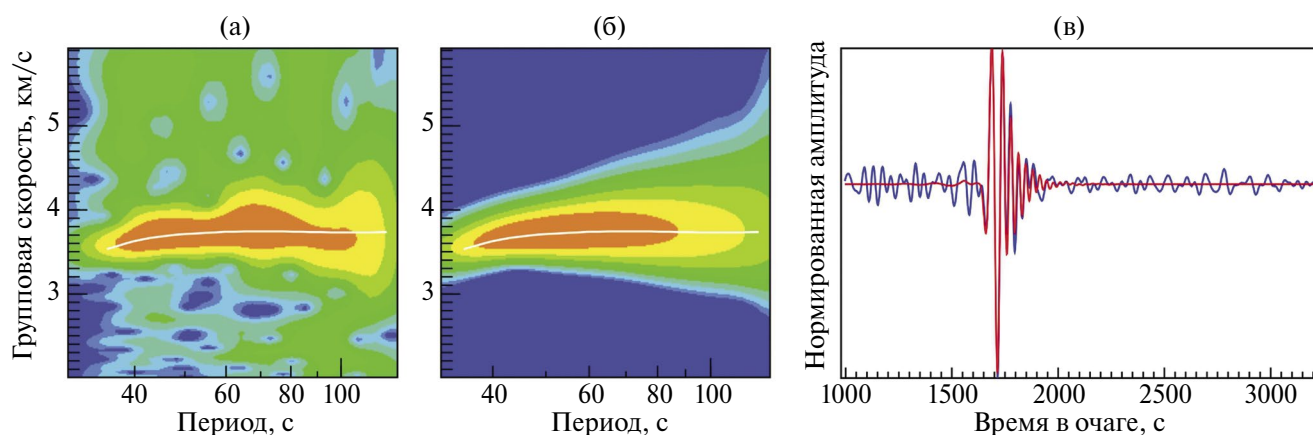


Рис. 2. Пример СВАН-обработки вертикальной компоненты станции СМВ ($azm = 66.09^\circ$, $\Delta = 6330$ км): (а) и (б) – СВАН-диаграммы исходного и отфильтрованного сигнала соответственно (дисперсионная кривая групповой скорости показана белым цветом); (в) – исходная запись (синяя кривая) и результат ее фильтрации (красная кривая).

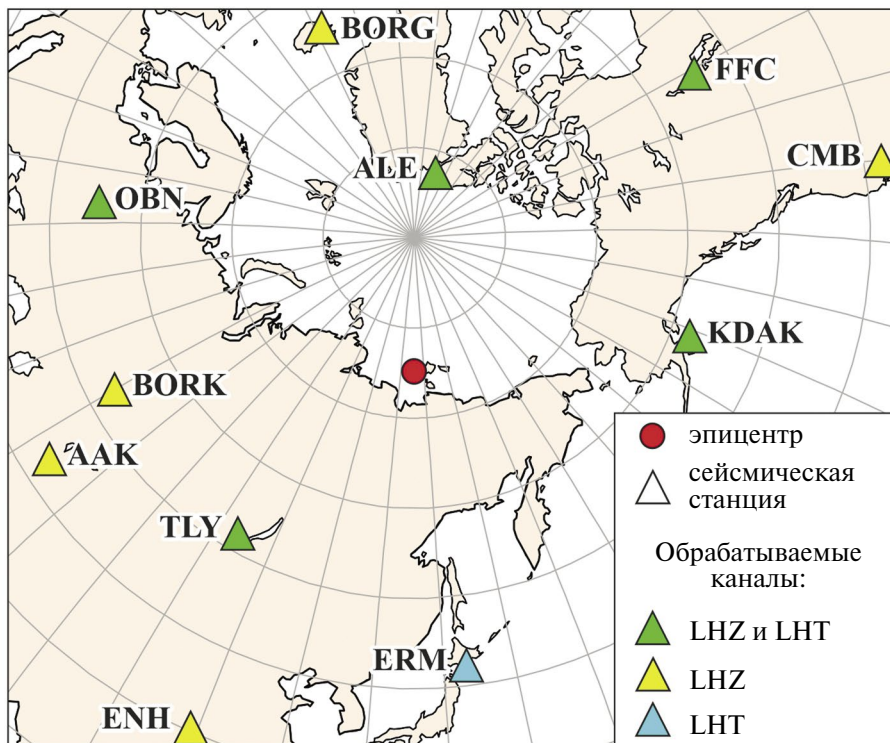


Рис. 3. Сейсмические станции, на которых получены спектры поверхностных волн. Коды станций соответствуют международному стандарту. LHZ – вертикальная компонента записи, LHT – трансверсальная компонента записи (результат вращения горизонтальных компонент, направленных на восток и север).

Очаг моделировался в виде мгновенного точечного источника, силовым эквивалентом которого является двойная пара сил с моментом (двойной диполь, *double-couple*). Путем минимизации функции нормированной невязки ϵ , характеризующей отличия полученных нами амплитудных спектров поверхностных волн от синтетических спектров, соответствующих определенному набору искомым параметров, определялась глубина очага (h , км), скалярный сейсмический момент (M_0 , Н·м) и четыре эквивалентных решения фокального механизма, отличающиеся направлениями простирания и подвижки [Букчин, 1989]. Моментная магнитуда (M_w) оценивалась по полученному значению скалярного сейсмического момента с использованием соотношения из работы [Hanks, Kanamori, 1979]. Расчеты проводились как в полном диапазоне периодов 40–120 с, в котором были выделены поверхностные волны, так и в поддиапазонах 40–90, 50–110, 50–120 и 70–120 с для проверки устойчивости полученных оценок.

Для выбора из полученных эквивалентных фокальных механизмов единственного решения могут использоваться знаки первых вступлений P -волн [Lasserre et al., 2001]. Однако, как и в некоторых других случаях [Филиппова, Фомочкина,

2023; Фомочкина, Филиппова, 2023], имеющиеся в ISC-бюллетене [International..., 2024] знаки для исследуемого сейсмического события весьма противоречивы, т.е. не позволяют выбрать единственное решение. Поэтому его выбор осуществлялся на основании дополнительной информации о фазовом спектре поверхностных волн: синтетические фазовые спектры рассчитывались для четырех эквивалентных фокальных механизмов, в качестве окончательного выбиралось решение с минимальным значением функции невязки.

Строение земной коры под сейсмическими станциями и в окрестности очага землетрясения 13.07.2023 г. задавалось моделью 3SMAC [Nataf, Ricard, 1996]. Отметим, что изменение модели коры в окрестности источника практически не сказывается на значениях определяемых параметров, что, например, было показано в работе [Середкина, Козьмин, 2017]. Для описания строения верхней мантии и расчета затухания поверхностных волн использовалась сферически симметричная модель PREM [Dziewonski, Anderson, 1981].

Оценка разрешения очаговых параметров выполнялась по частным функциям нормированной невязки. Для этого расчеты проводились

лишь для одного параметра, а остальным присваивались фиксированные значения, обеспечивающие минимум функции невязки.

Для того, чтобы количественно охарактеризовать отличия между различными фокальными механизмами, для пары механизмов рассчитывался угол Φ в 3D-пространстве, представляющий собой угол, на который нужно повернуть один двойной диполь, чтобы получить другой [Kagan, 2007]. Диапазон изменения угла Φ составляет от 0° , что соответствует полностью идентичным двойным диполям, до 120° .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов очаговых параметров землетрясения 13.07.2023 г. в приближении мгновенного точечного источника, включая все четыре эквивалентных фокальных механизма, полученные для различных диапазонов периодов, а также характеризующие их функции нормированной невязки амплитудных спектров, представлены на рис. 4. Механизмы, наилучшим образом удовлетворяющие фазовым спектрам поверхностных волн, выбираемые нами в качестве единственного решения, на рис. 4 обозначены № 1. Остальные эквивалентные решения приведены для удобства сопоставления

полученных результатов с данными сейсмологических агентств (см. далее).

Из рис. 4 видно, что механизмы очага, полученные для рассматриваемого землетрясения в диапазонах периодов 50–120, 50–110 и 70–120 с, абсолютно идентичны между собой. Также для этих диапазонов близки значения глубины и скалярного сейсмического момента. Наиболее сильно от этих решений отличаются параметры, рассчитанные для более коротких периодов ($T = 40–90$ с). В этом случае крутопадающая плоскость с азимутом простираения $strike = 190^\circ$ и пологая плоскость со $strike = 306^\circ$ (№ 1 для $T = 50–120$ с) становятся более пологой и крутой соответственно (№ 1 для $T = 40–90$ с). Однако даже в этом случае механизмы количественно довольно близки между собой ($\Phi = 18^\circ$). Также можно отметить, что для более длинных периодов наблюдается тенденция к увеличению значений M_0 и M_w . Для полного диапазона, в котором были отфильтрованы поверхностные волны ($T = 40–120$ с) очаговые параметры принимают средние значения относительно оценок для $T = 40–90$ с и $T = 50–120$ с.

Выбирая наиболее предпочтительное решение, мы, в первую очередь, ориентировались на значения функции нормированной невязки. Во вторых, учитывалась длина используемого для

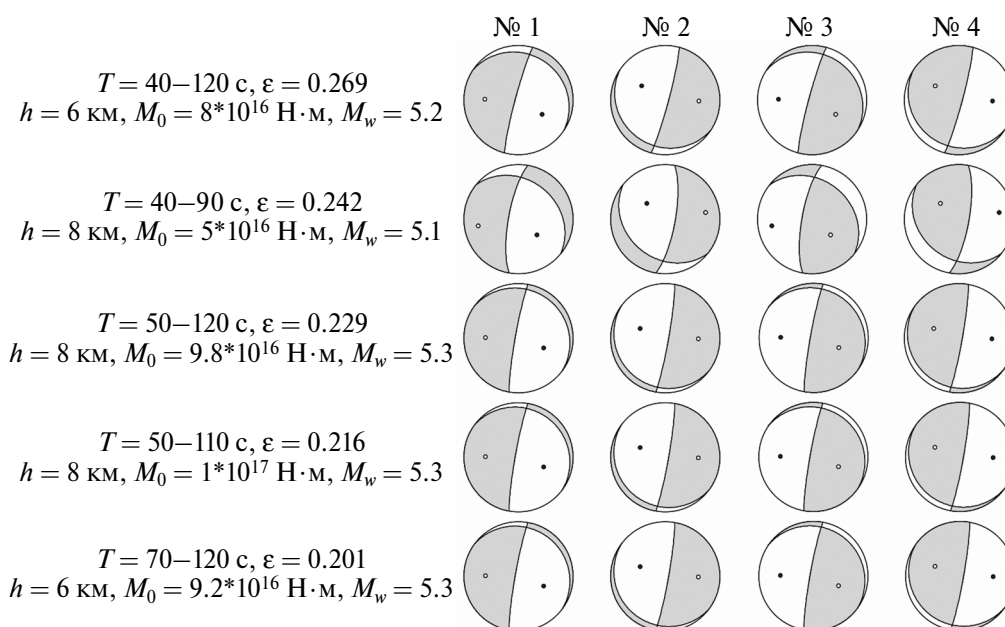


Рис. 4. Очаговые параметры землетрясения 13.07.2023 г. в приближении мгновенного точечного источника, рассчитанные по амплитудным спектрам поверхностных волн в различных диапазонах периодов (T , с), и соответствующие им значения функции нормированной невязки ϵ . Здесь и далее стереограммы механизмов очагов приведены в проекции нижней полусферы. Параметры нодальных плоскостей (NP) для фокального механизма № 1 и $T = 50–120$ с: $NP1$ – азимут простираения $strike = 306^\circ$, угол падения $dip = 11^\circ$, угол подвижки $slip = -153^\circ$; $NP2$ – $strike = 190^\circ$, $dip = 85^\circ$, $slip = -80^\circ$.

вычислений диапазона периодов, т.к. значения ε зависят не только от степени близости наблюдаемых и синтетических спектров, но и от набора исходных данных. Так, ε будет расти с увеличением количества анализируемых записей и диапазона периодов [Filippova, Melnikova, 2023]. Закономерно, что в случае с рассматриваемым землетрясением наибольшими невязками характеризуется решение, полученное в наиболее широком диапазоне периодов (рис. 4). Однако тот факт, что значения ε для $T = 40\text{--}90$ с превосходят невязку для более широкого диапазона $T = 50\text{--}120$ с, указывает на то, что именно оценки на более длинных периодах являются наиболее предпочтительными. Учитывая относительную близость функции нормированной невязки для диапазонов $50\text{--}120$, $50\text{--}110$ и $70\text{--}120$ с и близость самих очаговых параметров, в качестве наиболее предпочтительного решения, обсуждаемого далее, выбраны результаты для $T = 50\text{--}120$ с.

Сопоставим полученные нами значения очаговых параметров землетрясения 13.07.2023 г. с данными сейсмологических агентств (рис. 5) и геолого-геофизической информацией об исследуемом регионе. Наиболее близкие к нашему результату (рис. 6) оценки глубины этого события получены в агентствах NEIC ($h = 10 \pm 1.8$ км) и MOS ($h = 10$ км) [Федеральный..., 2024; National... 2024]. В GCMT-каталоге глубине очага приписано фиксированное значение 12 км (рис. 5), что довольно распространено в целом для событий, произошедших на шельфе моря Лаптевых и восточном окончании хребта Гаккеля [Filippova, Melnikova, 2023]. При этом

глубины, определенные в GFZ [GEOFON..., 2024] и тем более в AUST [Geoscience..., 2024] (рис. 5), представляются нам завышенными. Так, в работах [Filippova, Melnikova, 2023; Sloan et al., 2011] показано, что землетрясения на востоке моря Лаптевых имеют глубины преимущественно до 10 км. Уменьшение мощности сейсмоактивного слоя может быть связано с относительно высокой степенью прогрева литосферы [Sibson, 1984], установленной под этой частью шельфа по сейсмологическим [Lebedev et al., 2017] и геомагнитным данным [Filippova et al., 2024]. Это согласуется с нашей оценкой глубины, имеющей хорошее разрешение (рис. 6) и указывающей на то, что очаг исследуемого события расположен в верхней части коры, общая мощность которой здесь по различным данным составляет 25–35 км [Пискарев и др., 2003; Franke et al., 2001; Mazur et al., 2015; Petrov et al., 2016].

Полученные в данной работе скалярный сейсмический момент и моментная магнитуда (рис. 4) несколько превышают все значения, определенные в сейсмологических агентствах, включая не показанное на рис. 5 $M_w = 5.1$ по NEIC [National..., 2024]. В целом такие расхождения между различными оценками магнитуд (до 0.3) наблюдались нами и ранее для умеренных [Середкина, Гилева, 2016; Filippova, Melnikova, 2023] и даже сильных землетрясений [Филиппова, Фомочкина, 2023], произошедших в разных регионах мира. Наиболее вероятно, они обусловлены различиями в частотных диапазонах, используемых для расчетов очаговых параметров, что будет обсуждаться далее более

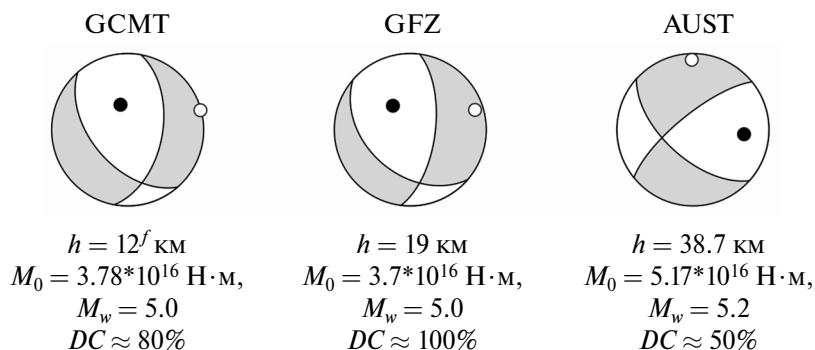


Рис. 5. Очаговые параметры землетрясения 13.07.2023 г. по данным сейсмологических агентств. Механизм очага приведен для наилучшего двойного диполя (*best double-couple*), характеризующего полный девиаторный тензор сейсмического момента. Расшифровка кодов агентств: GCMT – The Global CMT Project, Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University, USA (<https://www.globalcmt.org>); GFZ – German Research Centre for Geosciences, Helmholtz Centre Potsdam, Germany (<https://www.gfz-potsdam.de>); AUST – Geoscience Australia, Australia (<http://www.ga.gov.au>). Индекс f обозначает фиксированное значение глубины; DC – процент сдвиговой компоненты (*double-couple*) в девиаторном тензоре сейсмического момента.

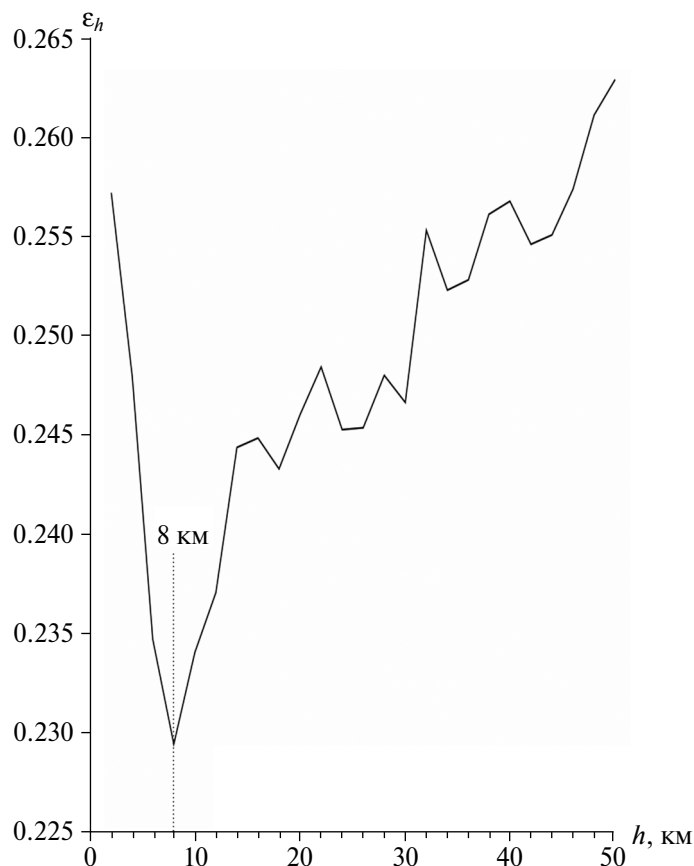


Рис. 6. Зависимость частной функции нормированной невязки ϵ_h от глубины очага (h , км) для диапазона периодов 50–120 с.

подробно для фокального механизма исследуемого события.

Выбранное нами в качестве наиболее предпочтительного решение механизма очага землетрясения 13.07.2023 г. (№ 1 для $T = 50\text{--}120$ с на рис. 4) существенно отличается от всех наилучших двойных диполей, определенных в сейсмологических агентствах (рис. 5). Значения угла Φ между ним и механизмами согласно GСMT, GFZ и AUST составляют 62° , 70° и 85° соответственно. Для последнего решения (AUST), также не согласующегося с GСMT и GFZ, это, вероятно, связано с большими вычислительными ошибками, на что косвенно указывает высокий процент несдвиговой компоненты в девиаторном тензоре сейсмического момента. Сдвиговая компонента тензора (DC) для него составляет всего около 50%, при этом низкий процент DC , как было показано в работе [Аптекман, Татевосян, 2007], во многих случаях связан не со сложным характером очага, а с погрешностями вычислений. Причины расхождений между нашим решением

и близкими между собой фокальными механизмами GСMT и GFZ (рис. 5), скорее всего, вызваны различиями в частотном составе данных, используемых для инверсии очаговых параметров. Так, в GСMT помимо длиннопериодных объемных волн в расчетах тензора сейсмического момента также участвовали поверхностные волны для периодов менее 50 с [Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012; Global..., 2024]. Такое предположение подтверждается тем, что один из эквивалентных фокальных механизмов (№ 2), полученных нами в диапазоне периодов 40–90 с намного ближе к GСMT-решению — угол Φ между ними составляет всего около 26° .

В пользу выбранного нами фокального механизма (рис. 7а), помимо того, что он наилучшим образом удовлетворяет фазовому спектру поверхностных волн, свидетельствует имеющаяся информация о тектонике участка Бельковско-Святоносского рифта, к которому приурочено исследуемое землетрясение. Во-первых, согласно работе [Zelenin et al., 2022] здесь выделяются

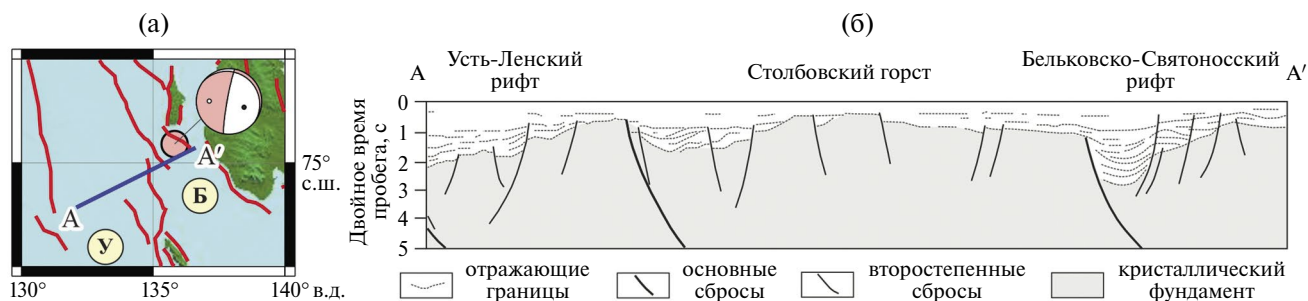


Рис. 7. Положение (а) и северо-восточный фрагмент интерпретированного профиля МОВ ОГТ ЛАРГЕ 89010 (б) согласно работам [Драчев, 2000; Drachev et al., 1998] с упрощениями. AA' (синяя линия) – северо-восточная часть профиля ЛАРГЕ 89010, красные линии – активные разломы по работе [Zelenin et al., 2022]. Обозначения рифтов (буквы в кружках) см. в подписи к рис. 1. На панели (а) показано выбранное нами в качестве наиболее предпочтительного решение фокального механизма землетрясения 13.07.2023 г. в проекции нижней полусферы (№ 1 для $T = 50–120$ с на рис. 4).

активные разломы с СЗ–ЮВ простиранием (рис. 7а). Нодальная плоскость с близким азимутом прослеживается во всех фокальных механизмах для землетрясения 13.07.2023 г. (рис. 5), включая наше решение (плоскость $NP1$ в подписи к рис. 4). Во-вторых, известно, что в целом этот рифт имеет ассиметричное строение, а в его восточном борту прослеживается основной листрический (выполаживающийся с глубиной) сброс [Drachev et al., 1998]. Однако в районе эпицентра рассматриваемого землетрясения, через который проходит северо-восточный фрагмент профиля МОВ ОГТ ЛАРГЕ 89010, основной листрический сброс располагается в западном борту рифта (рис. 7б) [Драчев, 2000]. В то же время в восточном борту наблюдаются лишь второстепенные сбросы. Учитывая ЮЗ падение СЗ–ЮВ нодальных плоскостей в решениях, определенных в сейсмологических агентствах (рис. 5), исследуемое землетрясение следовало бы связать именно с движениями по этим второстепенным сбросам. Против такого предположения свидетельствует глубина исследуемого события (рис. 6), превышающая глубину проникновения обсуждаемых разломов. Как видно из рис. 7б они лишь незначительно проникают в кристаллический фундамент, а мощность осадочных отложений под Бельковско-Святоносским рифтом составляет по различным данным всего 2–4 км [Franke et al., 2001; Gramberg et al., 1999; Mazur et al., 2015]. Напротив, СВ направление падения нодальной плоскости $NP1$ выбранного нами решения, совпадает с падением основного сброса в западном борту рифта (рис. 7б). Этот сброс, по-видимому, прослеживается во всей верхней части коры, что не противоречит полученной нами глубине очага (рис. 6), и на максимальных

глубинах своего проникновения становится очень пологим [Drachev, Scharubo, 2017], что тоже не противоречит нашей оценке угла падения $dip = 11^\circ$.

ВЫВОДЫ

Проведенный нами по данным поверхностных волн анализ землетрясения 13.07.2023 г. в восточной части шельфа моря Лаптевых позволил сделать следующие выводы.

1. Наиболее предпочтительные оценки очаговых параметров (в приближении мгновенного точечного источника) рассматриваемого сейсмического события, удовлетворяющие как амплитудным, так и фазовым спектрам поверхностных волн в диапазоне периодов 50–120 с, составили: глубина $h = 8$ км, скалярный сейсмический момент $M_0 = 9.8 \cdot 10^{16}$ Н·м, моментная магнитуда $M_w = 5.3$ и фокальный механизм с нодальными плоскостями $NP1$ – азимут простирания $strike = 306^\circ$, угол падения $dip = 11^\circ$, угол подвижки $slip = -153^\circ$; $NP2$ – $strike = 190^\circ$, $dip = 85^\circ$, $slip = -80^\circ$.

2. Отличия полученных нами результатов от данных сейсмологических агентств GCMT и GFZ, скорее всего, обусловлены различиями в исходных данных, в т.ч. в их частотном составе. Решение, полученное AUST, вероятно, характеризуется большими ошибками вычислений. При этом наши оценки лучше согласуются с имеющейся геолого-геофизической информацией о тектонике исследуемого района.

3. На основе анализа данных МОВ ОГТ показано, что землетрясение 13.07.2023 г., скорее

всего, связано с основным листрическим сбросом в западном борту Бельковско-Святоносского рифта, при этом в качестве истинной плоскости разрыва выделена пологая плоскость $NP1$ с СЗ–ЮВ простиранием.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 21-77-10070.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аптекман Ж.Я., Татевосян Р.Э.* О возможности выявления сложных очагов землетрясений по данным каталога СМТ (тензор центра момента) // *Физика Земли*. 2007. № 5. С. 17–23.
- Букчин Б.Г.* Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1989. № 9. С. 34–41.
- Драчев С.С.* Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // *Геотектоника*. 2000. № 6. С. 43–58.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Мельникова В.И., Середкина А.И., Маккей К.Д., Ашурков С.В., Смекалин О.П., Овсяченко А.Н., Чипизубов А.В., Сясько А.А.* Сейсмо-тектоника северо-восточного сектора Российской Арктики. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2017. 134 с.
- Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н.* Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука. 1986. 278 с.
- Пискарев А.Л., Сорока И.В., Чернышев М.Ю.* Строение земной коры и тектогенез в море Лаптевых // *Геотектоника*. 2003. № 5. С. 57–72.
- Середкина А.И., Гилева Н.А.* Зависимость между моментной магнитудой и энергетическим классом для землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // *Сейсмические приборы*. 2016. Т. 52. № 2. С. 29–38.
- Середкина А.И., Козьмин Б.М.* Очаговые параметры Таймырского землетрясения 9 июня 1990 г. // *Докл. РАН*. 2017. Т. 473. № 2. С. 214–217. DOI:10.7868/S0869565217060202
- Федеральный исследовательский центр Единая геофизическая служба Российской академии наук, 2024. *On-line каталог*. Обнинск, Россия. Available from <http://www.gsras.ru/new/catalog>. Last accessed 15 February 2024.
- Филиппова А.И., Фомочкина А.С.* Очаговые параметры сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7.8$ и $M_w = 7.7$) по данным поверхностных волн // *Физика Земли*. 2023. № 6. С. 89–102. DOI:10.31857/S0002333723060078
- Фомочкина А.С., Филиппова А.И.* очаговые параметры Улахан-Чистайского землетрясения 20 января 2013 г. (Якутия) по данным поверхностных волн // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2023. Т. 50. № 3. С. 17–29. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-2>
- Шушилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И., Кириллова Т.А.* Геодинамические обстановки в зоне сопряжения хребта Ломоносова и Евразийского бассейна с континентальной окраиной Евразии // *Геотектоника*. 2021. № 5. С. 3–26. DOI: 10.31857/S0016853X21050076
- Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS. 1992. New China Digital Seismograph Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/IC>
- Albuquerque Seismological Laboratory/USGS. 2014. Global Seismograph Network (GSN – IRIS/USGS) [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/IU>
- Avetisov G.P.* Geodynamics of the zone of continental continuation of Mid-Arctic earthquakes belt (Laptev Sea) // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1999. V. 114. № 1–2. P. 59–70. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00046-1)
- Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003. V. 4. № 3. 1027. DOI:10.1029/2001GC000252
- Drachev S.S., Shkarubo S.I.* Tectonics of the Laptev Shelf, Siberian Arctic. In: Pease V., Coakley B. (Eds.) *Circum-Arctic Lithosphere evolution*. Geological Society, London, Special Publications, 2017. V. 460. P. 263–283. <https://doi.org/10.1144/SP460.15>
- Drachev S.S., Savostin L.A., Groshev V.G., Bruni I.E.* Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic // *Tectonophysics*. 1998. V. 298. № 4. P. 357–393. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00159-0)
- Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Model // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1981. V. 25. N 4. P. 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1981. V. 86. P. 2825–2852. DOI:10.1029/JB086iB04p02825
- Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The Global CMT project 2004–2010: Centroid moment tensors for 13,017 earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2012. V. 200–201. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- ETOPO 2022: 15 Arc-Second Global Relief Model, 2024. Available from <https://www.nci.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>. Last accessed February 15, 2024. DOI:10.25921/fd45-gt74
- Filippova A.I., Melnikova V.I.* Crustal stresses in the East Arctic region from new data on earthquake focal mechanisms // *Tectonics*. 2023. V. 42. e2022TC007338. <https://doi.org/10.1029/2022TC007338>

- Filippova A.I., Filippov S.V., Radziminovich Ya.B.* Thermal state of the lithosphere beneath the Laptev Sea: Geodynamic implications from geomagnetic data // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2024. V. 261. 105970. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2023.105970>
- Franke D., Hinz K., Oncken O.* The Laptev Sea rift // *Marine and Petroleum Geology*. 2001. V. 18. № 10. P. 1083–1127. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(01\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(01)00041-1)
- Gaina C., Roest W.R., Müller R.D.* Late Cretaceous-Cenozoic deformation of northeast Asia // *Earth and Planetary Science Letters*. 2002. V. 197. № 3–4. P. 273–286. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00499-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00499-5)
- GEOFON Moment Tensor Solutions, 2024. *On-line Catalog*. Helmholtz-Zentrum, Potsdam, Germany. Available from <https://geofon.gfz-potsdam.de>. Last accessed February 15, 2024.
- Geoscience Australia, 2024. *On-line Catalog*. Australia. Available from <https://www.ga.gov.au> and <http://www.isc.ac.uk>. Last accessed February 15, 2024.
- Global CMT Web Page, 2024. *On-line Catalog*. Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. Available from <http://www.globalcmt.org>. Last accessed February 15, 2024.
- Gramberg I.S., Verba V.V., Verba M.L., Kos'ko M.K.* Sedimentary cover thickness map – sedimentary basins in the Arctic // *Polarforschung*. 1999. V. 69. P. 243–249.
- Hanks T., Kanamori H.* A moment magnitude scale // *J. Geophys. Res.* 1979.84. B5. P. 2348–2350. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.-L., Zoback M.* The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // *Tectonophysics*. 2018. V. 744. P. 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
- Imaeva L., Gusev G., Imaev V., Mel'nikova V.* Neotectonic activity and parameters of seismotectonic deformations of seismic belts in Northeast Asia // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017. V. 148. P. 254–364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2017.09.007>
- International Seismological Centre, 2024. *On-line Bulletin*. Internat'l. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Available from <http://www.isc.ac.uk>. Last accessed February 15, 2024.
- Kagan Y.Y.* Simplified algorithms for calculating double-couple rotation // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 171. № 1. P. 411–418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03538.x>
- Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R.* Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ($M_w = 5.2$) and 1995 July 21 Yongen ($M_w = 5.6$) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // *Geophys. J. Int.* 2001. V. 144. № 1. P. 206–220. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.00313.x>
- Lebedev S., Schaeffer A.J., Fullea J., Pease V.* Seismic tomography of the Arctic region: inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere. In: Pease, V., Coakley, B. (Eds.), *Circum-Arctic Lithosphere evolution*. Geological Society, London, Special Publications, 2017. V. 460. P. 419–440. <https://doi.org/10.1144/SP460.10>
- Mazur S., Campbell S., Green C., Bouatmani R.* Extension across the Laptev Sea continental rifts constrained by gravity modeling // *Tectonics*. 2015. V. 34. № 3. P. 435–448. <https://doi.org/10.1002/2014TC003590>
- Nataf H.-C., Ricard Y.* 3SMAC: on a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1996. V. 95. № 1–2. P. 101–122. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(95\)03105-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(95)03105-7)
- National Earthquake Information Center, 2024. *On-line Catalog*. US Geological Survey, USA Available from <https://earthquake.usgs.gov>. Last accessed February 15, 2024.
- Northern California Earthquake Data Center. 2014. Berkeley Digital Seismic Network (BDSN) [Data set]. Northern California Earthquake Data Center. <https://doi.org/10.7932/BDSN>
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S., Artemieva I.M., Sobolev N., Petrov E., Ernst R.E., Sergeev S., Smelror M.* Crustal structure and tectonic model of the Arctic Region // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 154. P. 29–71. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>
- Scripps Institution of Oceanography. 1986. Global Seismograph Network – IRIS/IDA [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/II>
- Seredkina A.I., Melnikova V.I.* New data on earthquake focal mechanisms in the Laptev Sea region of the Arctic-Asian seismic belt // *Journal of Seismology*. 2018. V. 22. № 5. P. 1211–1224. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9762-9>
- Sibson R.H.* Roughness at the base of the seismogenic zone: contributing factors // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1984. V. 89. № B7. P. 5791–5799. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05791>
- Sloan R.A., Jackson J.A., McKenzie D., Priestley K.* Earthquake depth distributions in central Asia, and their relations with lithosphere thickness, shortening and extension // *Geophysical Journal International*. 2011. V. 185. № 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04882.x>
- Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I.* The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. № 10. P. 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>

Seismotectonic Position of the Source of the July 13, 2023, Earthquake in the Eastern Laptev Sea Shelf from Surface Wave Data

A. I. Filippova^{a,b,*} and A. S. Fomochkina^{b,c}

^aPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, 108840 Russia

^bInstitute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

^cNational University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, 119991 Russia

*e-mail: aleirk@mail.ru

Received February 19, 2024

revised March 20, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract – In this study, we consider in detail the July 13, 2023, earthquake occurred of the shelf of the eastern Laptev Sea (Belkov–Svyatoi Nos rift). On the one hand, our interest in this event is due to the location of its epicenter, to the east of which there is a sharp decrease in seismic activity. Conversely, detailed Common Depth Point (CDP) data on the structure of the upper crust are available for its epicentral zone, making it possible to analyze the seismotectonic position of the earthquake source. Focal parameters in the instantaneous point source approximation are calculated from surface waves recorded at teleseismic distances. As a result, we have obtained a scalar seismic moment ($M_0 = 9.8 \cdot 10^{16}$ N·m), corresponding moment magnitude ($M_w = 5.3$), source depth ($h = 8$ км), and focal mechanism (a normal fault along a gently dipping nodal plane with a NW–SE strike). Our results are compared with data from seismological agencies. It has been shown that differences between them are most likely caused by various initial data, including their different frequency ranges. Our estimates agree better with the available geological and geophysical information on the tectonics of the study area. Taking into account the data on strike, dip, and penetration depth of faults and our source parameter values, we have concluded that the July 13, 2023, earthquake could have been associated with a major listric normal fault on the western slope of the Belkov–Svyatoi Nos rift.

Keywords: earthquake source parameters, surface waves, Laptev Sea, Belkov–Svyatoi Nos rift, Arctic