

УДК: 550.348.436

БАЗА ДАННЫХ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

© 2024 г. А. И. Филиппова^{1,2,*}, И. С. Бурлаков^{2,3}, 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) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

*E-mail: aleirk@mail.ru

Поступила в редакцию 16.02.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

В работе представлено описание базы механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики, составленной нами по данным мировых сейсмологических агентств и литературным источникам. В базу вошло 595 решений фокальных механизмов для 273 сейсмических событий с $M = 2.1–7.6$, произошедших в 1927–2022 гг. Для большинства событий приведены сведения о глубине очага, скалярном сейсмическом моменте и моментной магнитуде. Помимо самих очаговых параметров, в базу вошла информация о качестве приводимых решений, что во многих случаях облегчает их сопоставление. Для удобства пользователей база имеет графический интерфейс, позволяющий осуществлять поиск по различным атрибутам (координатам, времени, значениям магнитуды и глубины). Собранный нами банк существенно превышает по объему информации все имеющиеся на текущий момент времени аналоги. Она может использоваться для проведения сеймотектонического анализа, расчетов напряженно-деформированного состояния литосферы, оценки сейсмической опасности для всей Восточной Арктики или отдельных ее регионов. Применение базы для сопоставления различных решений фокальных механизмов и сеймотектонического анализа проиллюстрировано в статье на примере сейсмических событий, произошедших в Оленекском заливе моря Лаптевых и на прилегающих к нему территориях. Предполагается, что в дальнейшем база будет пополняться авторами каждые пять лет.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, механизм очага, Восточная Арктика.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050153>, **EDN:** EIWPPIR

ВВЕДЕНИЕ

Под очагом землетрясения понимают область, в которой происходит разрыв сплошности материала среды, когда напряжения в ней превысят предел прочности, или область, в которой происходит генерация сейсмических волн. Из теории упругости следует, что очаг может быть описан двумя эквивалентными способами: в виде смещений (или напряжений), приложенных к некоторой поверхности или в виде объемных сил, создающих такое же поле упругих волн, как и смещения на поверхности [Аки, Ричардс, 1983]. В приближении точечного источника, когда для анализа используются сейсмические волны с длиной волны, много большей линейных размеров очага, в наиболее общем виде очаг землетрясения можно

представить через тензор сейсмического момента (ТСМ), который зависит от силы источника и ориентации разрыва. В наиболее общем виде ТСМ может быть разложен на изотропную составляющую, характеризующую отрывную компоненту в очаге, и девиаторный ТСМ. В свою очередь девиаторный ТСМ может быть представлен в виде суммы несдвиговой и сдвиговой компонент. Первая из них (*compensated linear vector dipole* или CLVD-компонента), возникает в случае разрыва по неплоской площадке. Наиболее часто эта компонента присутствует в очагах сильных сейсмических событий, характеризующихся сложной геометрией разрыва, например, двух Турецких землетрясений 06.02.2023 г. с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.7$ [Филиппова, Фомочкина, 2023 и ссылки в ней], а также в очагах более

слабых вулканических землетрясений [Ekström, 1994; Sandanbata et al., 2021; Shuler et al., 2013]. Однако для большинства сейсмических событий очаг хорошо описывается сдвиговой компонентой ТСМ. В этом случае он моделируется разрывом сплошности по плоской площадке, а его силовым эквивалентом является двойная пара сил с моментом или двойной диполь (*double-couple*). При этом сама сдвиговая компонента полностью задается скалярным сейсмическим моментом, являющимся энергетической характеристикой землетрясения, и его механизмом очага, характеризующим ориентацию плоскости разрыва в пространстве и направление подвижки.

Механизм очага землетрясения представляет собой важный параметр, поскольку по нему можно судить о действующих в Земле напряжениях. Так, данные о механизмах очагов землетрясений являются основой для реконструкций напряженно-деформированного состояния литосферы на разных масштабных уровнях, в том числе для построения глобальных карт напряжений *World Stress Map* (WSM), включая последнюю версию WSM 2016 [Heidbach et al., 2018]. В мире для большинства сейсмических событий с магнитудой более 5.0 механизм очага, а точнее девиаторный ТСМ, регулярно рассчитывается и публикуется в каталогах *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT) [Global..., 2024] и *National Earthquake Information Center* (NEIC) [National..., 2024]. Описание применяемых методов инверсии с учетом их изменения во времени приведены в работах [Dziewonski et al., 1981; Ekström, 2012; Hayes et al., 2009]. В России рутинные определения механизма очага проводятся в ФИЦ ЕГС РАН и его филиалах, результаты доступны в ежегодниках “Землетрясения России” (<http://www.gsras.ru/zr/>) и “Землетрясения Северной Евразии” (<http://www.gsras.ru/zse/>), а также ежегодно пополняемой базе данных “Землетрясения России” (<http://eqru.gsras.ru>). Компиляция решений, полученных различными сейсмологическими агентствами, наряду с собственными определениями механизмов предоставляется в *International Seismological Centre* (ISC) [International..., 2024].

Основная цель нашей работы, носящей обзорный характер, заключалась в создании базы данных механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики (1927–2022 гг.). Регион характеризуется сложным тектоническим строением и высоким уровнем сейсмической активности (см. далее). В то же время он относительно малоизучен в силу своей труднодоступности. Не составляют исключение и механизмы очагов

региональных землетрясений, рутинные определения которых затруднены малым количеством сейсмических станций на рассматриваемой территории и во многих случаях неподходящей для этих целей геометрией сейсмической сети [Аветисов, 2000]. Следовательно, имеющиеся определения механизмов очагов, опубликованные в различных источниках, представляют собой большую ценность для решения спорных вопросов современной геодинамики, сейсмотектонического анализа, оценки сейсмической опасности для всей Восточной Арктики или отдельных ее областей. Составленная нами база включает в себя результаты, полученные в сейсмологических агентствах, и решения механизмов из литературных источников. Последнее является ее несомненным преимуществом относительно ISC-каталога.

СЕЙСМИЧНОСТЬ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

Рассматриваемый в данной работе регион сложен различными структурами (рис. 1а). На севере он охватывает часть Евразийского бассейна и котловины Макарова Северного Ледовитого океана, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море. Евразийский бассейн на современном этапе испытывает процессы растяжения [Heidbach et al., 2018], сосредоточенные в зоне спредингового срединно-океанического хребта Гаккеля. Скорость спрединга в районе восточного окончания хребта составляет около 6 мм/год [DeMets et al., 1990]. По хребту Гаккеля проходит граница Евразийской и Северо-Американской литосферных плит [Bird, 2003], отчетливо проявленная в сейсмичности в виде узкой полосы эпицентров землетрясений (рис. 1б) [Engen et al., 2003; Morozov et al., 2021a; Schlindwein et al., 2015]. Шельфы моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря представляют собой часть континентальной окраины Северной Евразии. На шельфе моря Лаптевых развита континентальная рифтовая система, состоящая из чередующихся горстов и грабенов [Engen et al., 2003; Drachev, Schcarubo, 2017]. Здесь в противоположность к подходящему к нему с севера хребту Гаккеля, сейсмичность носит рассеянный характер (рис. 1б) [Аветисов, 2000; Крылов и др., 2020; Avetisov, 1999], а граница Евразийской и Северо-Американской литосферных плит становится диффузной [Gaina et al., 2002]. Восточно-Сибирское море характеризуется слабым уровнем сейсмической активности (рис. 1б). За последние почти 50 лет на

его шельфе зарегистрировано всего несколько землетрясений с магнитудой более 4.0, большая часть из которых локализована в районе Новосибирских островов, а в тектоническом

плане — в пределах Южно-Анжуйской шовной зоны [Имаева и др., 2021].

Континентальная часть исследуемой области представлена с запада на восток Таймырским

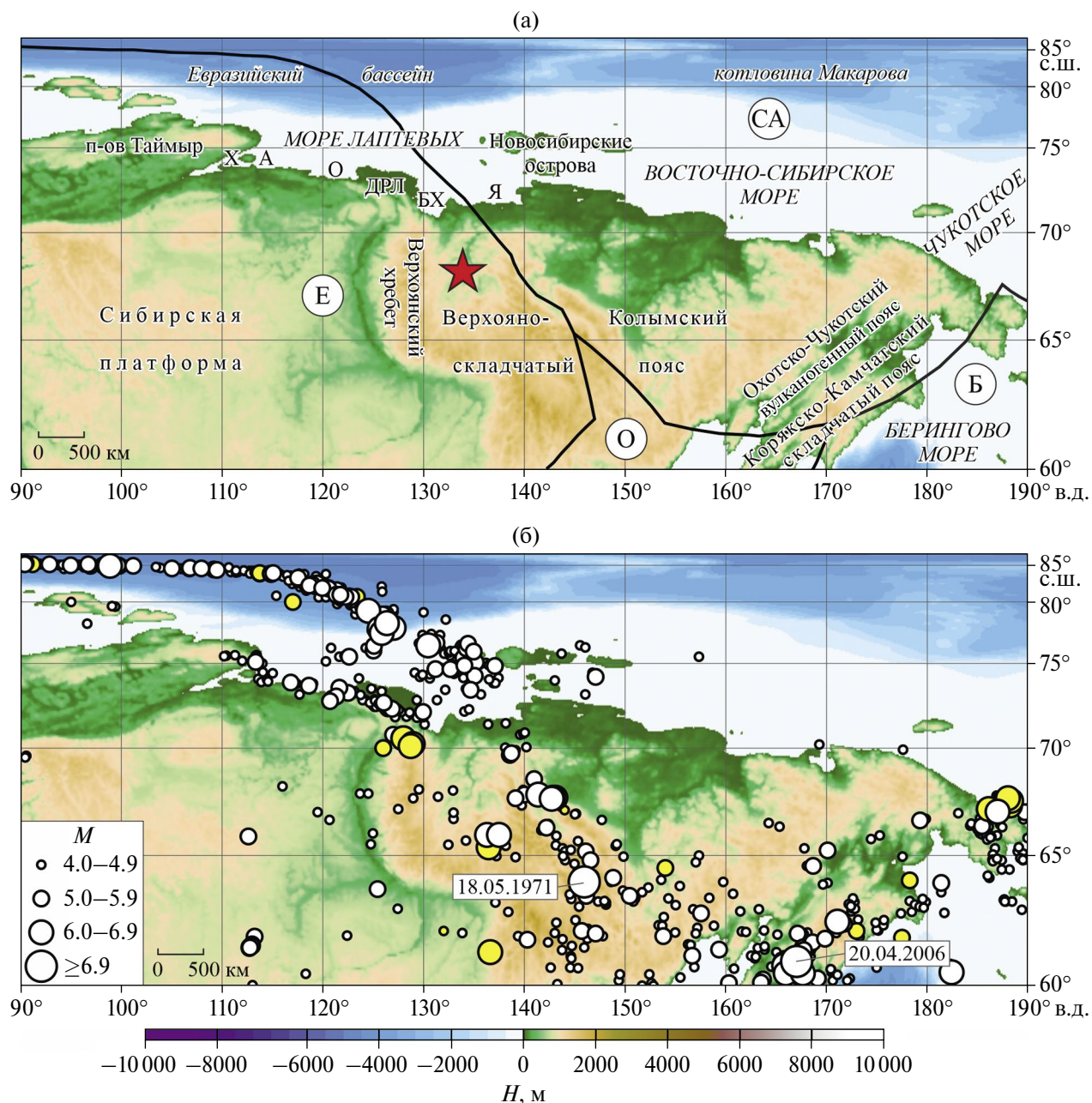


Рис. 1. Тектоническая схема Восточной Арктики согласно работам [Зоненшайн и др., 1990а; 1990б; Зоненшайн, Натапов, 1987] (а) и ее сейсмичность (б). Границы литосферных плит (черные кривые) показаны схематично по работам [Ландер и др., 1994; Bird, 2003; Maskey et al., 1997]; полюс вращения Евразийской и Северо-Американской литосферных плит (звезда) нанесен по работе [Steblov et al., 2003]. Литосферные плиты (буквы в кружках): Е – Евразийская, СА – Северо-Американская, О – Охотоморская, Б – Беринговоморская. Остальные буквенные обозначения: А – Анабарский залив, БХ – губа Буор-Хая, ДЛР – дельта р. Лены, О – Оленекский залив, Х – Хатангский залив, Я – Янский залив. Эпицентры землетрясений с $M \geq 4.0$ (1927–2022 гг.) приведены по данным ISC-каталога [International..., 2024]. Желтым цветом обозначены эпицентры землетрясений, произошедших в 1927–1959 гг., белым – 1960–2022 гг. Даты указаны для землетрясений с $M \geq 7.0$. Здесь и далее топография и батиметрия (H , м) приведены по глобальной модели ETOPO1 [Amante, Eakins, 2009].

складчатым поясом, занимающим полуостров Таймыр, докембрийской Сибирской платформой, мезозойским Верхояно-Колымским складчатым поясом, Охотско-Чукотским вулканогенным поясом и кайнозойским Корякско-Камчатским складчатым поясом (рис. 1а) [Зоненшайн и др., 1990а; 1990б]. На Таймырском полуострове эпицентры редких слабых землетрясений приурочены к его восточному побережью (рис. 1б) [Середкина, Козьмин, 2017; Mогозов et al., 2021b]. Относительно высокий уровень сейсмической активности наблюдается на побережье Анабарского и Оленекского заливов моря Лаптевых, а также в дельте реки Лены. Здесь эпицентры большинства землетрясений тяготеют к крупным разрывным нарушениям субширотной ориентации, обрамляющим практически асейсмичную Сибирскую платформу [Имаева и др., 2017]. Наиболее сильные сейсмические события Верхоянского хребта сосредоточены в его северной части и представлены Булунскими землетрясениями 1927–1928 гг. (5 событий с $M = 5.8–6.8$), связанными с Хараулахтской системой разломов [Имаев и др., 1998; 2000; Fujita et al., 2009]. Согласно работе [Steblov et al., 2003] полюс вращения Евразийской и Северо-Американской литосферных плит расположен в непосредственной близости от эпицентров Булунских землетрясений (рис. 1). При этом в позднеинструментальный период наблюдений (с 1960 г.) во всем Верхоянском хребте регистрировались лишь относительно немногочисленные события с $M < 5.0$.

На северо-востоке Евразии, включая окраинные Чукотское и Берингово моря, сейсмическая активность сосредоточена преимущественно вдоль границ Евразийской, Северо-Американской, Охотоморской и Берингоморской литосферных плит (рис. 1). Эпицентры наиболее сильных землетрясений исследуемого региона тяготеют к зонам крупных разрывных нарушений сейсмического пояса Черского – Чай-Юреинскому разлому и разлому Улахан [Имаева и др., 2017; Fujita et al., 2009] – а также к крупным разломам северо-восточного простирания, расположенным в Корякском сейсмическом поясе и образующим границу Берингоморской литосферной плиты [Ландер и др., 1994; Maskey et al., 1997] (рис. 1). Так, здесь произошли сильнейшие на северо-востоке России за инструментальный период наблюдений Артыкское землетрясение 18.05.1971 г. с $MS = 7.1$ [Козьмин, 1984] и Олюторское землетрясение 20.04.2006 г. с $M_w = 7.6$ [Чебров, 2007]. Помимо современных проявлений сейсмической

активности в рассматриваемом районе обнаружены многочисленные палеосейсмодислокации, в том числе возникшие от сейсмических событий с $M > 7.0$ [Важенин, 2000; Имаев и др., 2000].

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И СТРУКТУРА БАЗЫ

База механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики создавалась по данным сейсмологических агентств и литературным источникам. В случае если сейсмическое событие имело несколько решений фокальных механизмов, все они заносились в базу с указанием соответствующих источников. При составлении базы нами использовались данные международных каталогов GCMT [Global..., 2024], NEIC [National..., 2024], GFZ [GEOFON..., 2024] и ISC [International..., 2024]. В случае с GCMT, NEIC и GFZ в базе приведены параметры наилучшего двойного диполя, соответствующего девиаторному TCM. Из ISC-каталога отбирались не только все фокальные механизмы, полученные в самом агентстве по знакам первых вступлений объемных волн, но также решения агентств, не перечисленных ранее, например, AUST (Geoscience Australia, Canberra, Australia; <http://www.ga.gov.au>) и IPGP (Institut de physique du globe de Paris, Paris, France; <http://geoscope.ipgp.fr>) (коды соответствуют международному стандарту). Также нами учитывалась информация о механизмах очагов, содержащаяся в ежегодниках “Землетрясения России” (<http://www.gsr.ru/zr/>) и “Землетрясения Северной Евразии” (<http://www.gsr.ru/zse/>) и ежегодной пополняемой базе данных “Землетрясения России” (<http://eqru.gsr.ru>), охватывающей временной промежуток с 2003 г. по настоящее время. Кроме того нами были собраны фокальные механизмы, полученные в ходе специальных исследований сейсмических событий рассматриваемого региона и опубликованные в литературе. Далее перечислим литературные источники с указанием используемых в них данных и методов.

До 1990 г. большинство имеющихся механизмов очагов было определено либо только по знакам первых вступлений объемных волн [Аветисов, 1991; 1993; Балакина и др., 1972; Гунбина и др., 1988; Козьмин, 1984; Имаев и др., 1990; 1998; Имаева и др., 2015; Мишарина, 1967; Cook et al., 1986; Cook, 1988; Jemsek et al., 1986; Fujita et al., 1990; 2009; Parfenov et al., 1988], либо дополнительно к знакам использовалась информация об отношениях амплитуд P -, SV - и SH -волн (SH/P , SV/P , SV/SH) [Franke et al., 2000]. Лишь

для немногих событий того времени проводилась инверсия волновых форм [Fujita, 1995; McMullen, 1985; Riegel, 1994; Olson, 1990]. В 1990–1999 гг. механизмы, основанные на знаках объемных волн [Franke et al., 2000; Fujita et al., 2009], составляют около трети всех решений, имеющихся в литературе. Практически для всех остальных решений механизмов очагов землетрясений того периода, рассмотренных в работах [Имаева и др., 2021; Середкина, Козьмин, 2017; Filippova, Melnikova, 2023; Seredkina, Melnikova, 2018], основными исходными данными служили амплитудные спектры поверхностных волн. Для расчетов использовалась методика определения ТСМ (в приближении двойного диполя) и глубины очага землетрясения, разработанная Б.Г. Букчиным (ИТПЗ РАН) [Букчин, 1989]. Эта методика также активно применялась к землетрясениям, произошедшим в регионе в 2000–2021 гг. [Имаева и др., 2017; 2021; Фомочкина, Филиппова, 2023; Filippova, Melnikova, 2023; Seredkina, Melnikova, 2018]. Для четырех сейсмических событий в 1992–2008 гг. очаговые параметры были определены по длиннопериодным записям объемных волн в работе [Sloan et al., 2011], причем для Андрей-Тасского землетрясения 22.06.2008 г. с $M_w = 6.1$ [Имаева и др., 2011] очаговые параметры рассчитаны для двух субочагов.

Для каждого землетрясения в базу данных вносились следующие параметры (табл. 1): порядковый номер землетрясения в базе (*id*), дата (в формате дд.мм.гггг), время (GMT в формате чч:мм:сс), координаты эпицентра, магнитуда (*M*), скалярный сейсмический момент (M_0 , Н·м), глубина очага (*h*, км; с указанием фиксированный это параметр или нет), параметры двух нодальных плоскостей (*NP1* и *NP2*) фокального механизма, параметры осей главных напряжений (осей растяжения, сжатия и промежуточной – *T*, *P* и *B* соответственно), процент компоненты двойного диполя в решении ТСМ (*DC*, %), качество решения, источник, примечания. Порядковый номер присваивался в хронологическом порядке. Дата, время и координаты эпицентра заносились в базу по данным ISC-каталога [International..., 2024]. Магнитуды приводились в соответствии с источником, тип магнитуды указан в примечаниях. В случае если источник содержал несколько определений магнитуды, предпочтение отдавалось моментной магнитуде. Некоторые значения глубины очага, приведенные в базе, не определялись непосредственно, а фиксировались при расчете других очаговых параметров. Такие глубины отмечены

символом *f* в столбце *hf*. Параметры нодальных плоскостей фокального механизма приведены единообразно в проекции нижней полусферы в следующем формате: *slk* – направление простирания (0° – 360°), *dip* – угол падения (0° – 90°), *slip* – угол подвижки (от -180° до 180°). Для осей главных напряжений указаны азимут (*azm*, 0° – 360°) и угол погружения (*pl*, 0° – 90°). Информация о проценте компоненты двойного диполя в решении ТСМ (*DC*, %) в базе имеется только для агентств GCMT, NEIC и GFZ, в которых определяется полный девиаторный ТСМ (см. Введение). Во всех остальных случаях очаг рассматривается в приближении чистого двойного диполя, т.е. по умолчанию *DC* = 100%.

Сведения о качестве решения (если они доступны) приводились в том же виде, как и в используемом источнике. Отметим, что для девиаторных ТСМ из каталогов GCMT, NEIC и GFZ в оригинале имеется только информация о погрешностях отдельных компонент тензора, поэтому в базе оценка качества наилучшего двойного диполя в целом не определена. Для всех механизмов, рассчитанных по амплитудным спектрам поверхностных волн, в базе указаны значения функции нормированной невязки, характеризующей отличие наблюдаемых и синтетических спектров [Букчин, 1989]. Для фокальных механизмов из работы [Fujita et al., 2009] качество оценивается двумя градациями – *good* (хорошо обусловленное знаками) и *poor* (плохо обусловленное знаками). В статьях [Аветисов, 1993; Cook et al., 1986; Franke et al., 2000] дополнительно используется промежуточная градация – *moderate* (решение с небольшой неопределенностью положения нодальных плоскостей). Для работы [Козьмин, 1984] качество решений было оценено нами по неопределенности положения нодальных плоскостей на имеющихся стереограммах фокальных механизмов по той же градации (*good*, *moderate*, *poor*). Качество механизмов, полученных агентством ISC, обозначается буквами *A–D*, где *A* обозначает надежные решения, *D* – решения неудовлетворительного качества. Отметим, что для всех землетрясений рассматриваемого региона качество ISC-решений неудовлетворительное (*D*), т.е., фактически, такие решения непригодны для дальнейшего анализа.

Источники собранных фокальных механизмов приведены либо в виде международного кода сейсмологического агентства, либо в виде ссылки на публикацию. Если фокальный механизм помимо первоисточника впоследствии был опубликован в других работах, как, например, в статье [Fujita et al., 2009], содержащей в большей степени компиляцию известных решений, в нашей базе

Таблица 1. Пример информации, содержащейся в базе данных

<i>id</i>	Дата	Время	φ, град	λ, град	<i>M</i>	<i>M</i> ₀ , Н·м	<i>h</i> , км	<i>h_f</i>	<i>NP1</i>			<i>NP2</i>			Ось <i>T</i>		Ось <i>P</i>		Ось <i>B</i>		<i>DC</i> , %	Quality	Источник	Примечания
									<i>stk</i> , град	<i>dip</i> , град	<i>slip</i> , град	<i>stk</i> , град	<i>dip</i> , град	<i>slip</i> , град	<i>azm</i> , град	<i>pl</i> , град	<i>azm</i> , град	<i>pl</i> , град	<i>azm</i> , град	<i>pl</i> , град				
92	05.10.1993	21:28:07.4	77.6296	126.4101	5.2	7.39×10 ¹⁶	15	<i>f</i>	32	35	−65	183	59	−106	284	13	55	71	191	14	79		GCMT	<i>M_w</i> , <i>mb</i> = 5.1 (PDE), <i>h</i> = 18 SL
					5.0		18		191	63	−44	304	51	−146	250	7	152	49	346	40		<i>good</i>	FR	<i>mb</i>
					5.2	8.00×10 ¹⁶	21		38	20	−52	178	74	−103	278	28	71	59	182	12		0.270	FM	<i>M_w</i>
					5.8	6.33×10 ¹⁷	12	<i>f</i>	301	43	44	176	62	124	135	58	243	11	339	30	76		GCMT	<i>M_w</i> , <i>mb</i> = 5.7 (PDEW), <i>MS</i> = 5.8 (PDEW)
214	13.03.2013	03:12:52.68	60.1064	163.5095	5.8	6.39×10 ¹⁷	15		173	68	115	302	33	43	119	59	245	19	343	23	97		NEIC	<i>M_w</i> , <i>w-phase</i> , <i>preferred</i>
					5.8	5.40×10 ¹⁷	4		179	66	127	297	43	36	135	53	243	13	342	34	72		NEIC	<i>M_w</i> , <i>body-wave mt</i>
					5.8	7.28×10 ¹⁷	12		170	63	114	305	35	51	120	64	243	15	339	21	43		NEIC	<i>M_w</i> , <i>centroid mt</i>
					5.8	5.60×10 ¹⁷	16		159	52	105	315	41	71	123	77	239	6	330	12	80		GFZ	<i>M_w</i>
					6.2		24		322	45	81	154	45	99	148	84	58	0	328	6			KAGSR	<i>M</i>

Примечания: в графах Источник и Примечания введены следующие обозначения: FR – [Flirova, Melnikova, 2023], SL – [Sloan et al., 2011]. В базе данных ссылки на публикации приведены без сокращений. Коды агентств соответствуют международному стандарту. PDE и PDEW – Preliminary Determinations of Epicenters, Monthly Listing и Weekly Listing соответственно [National..., 2024]. В графе Примечания у решений NEIC указан тип используемых данных и процедура их инверсии: *w-phase* – *W*-фаза [Hayes et al., 2009; Kanamori, Rivera, 2008], *body-wave mt* – длиннопериодные объемные волны [Sirkin, 1982]; *centroid mt* – длиннопериодные объемные и поверхностные волны [Dziewonski et al., 1981]. *Preferred* – наиболее предпочтительное NEIC-решение.

перечислены все доступные источники, при этом первоисточник указан первым.

Также для каждого решения фокального механизма в базе имеются примечания, содержащие, во-первых, информацию о типе магнитуды. Во-вторых, для агентства NEIC приведена информация о том, на основании каких данных и каким методом рассчитывался TCM, а также отмечено наиболее предпочтительное решение (см. табл. 1 и Примечание к ней). Для землетрясений, имеющих решения в GCMT, в примечания добавлена информация о магнитудах m_b и M_S из PDE-бюллетеней [National..., 2024]. Кроме того, для отдельных событий приведены дополнительные данные о глубине, пересчитанной для этого фокального механизма в работе [Sloan et al., 2011]. Для части таких событий в первоисточнике глубина не определена, тогда в базу вносились только оценки глубины из работы [Sloan et al., 2011] с соответствующими

примечаниями. Для решений, полученных авторами работы [Franke et al., 2000], указано, сколько отношений амплитуд P -, SV - и SH -волн использовалось при расчетах.

Технически база данных создавалась с помощью *PgAdmin* – программы кроссплатформенного типа для работы с *PostgreSQL*-серверами. Графический интерфейс, позволяющий пользователям осуществлять поиск в базе данных по различным атрибутам (координатам, дате, времени, идентификатору), а также ранжировать результаты поиска по магнитуде и глубине очага, был разработан на языке *Python* (рис. 2). Результаты запроса могут быть сохранены в отдельный файл с названием и расширением, указанными пользователем. Виджеты GUI были созданы на основе модуля *Tkinter*. Подключение к базе данных и выполнение запросов реализовано с помощью модуля *Psycopg2*.

Работа с базой данных

☒ Поиск по территории

Введите диапазон широты через запятую

Введите диапазон долготы через запятую

☒ Поиск по дате

Введите дату землетрясения в формате год-месяц-день

☒ Поиск по времени

Введите время землетрясения в формате час:минута:секунда

Введите временной диапазон в часах

☒ Поиск по id

☐ Ранжировать по магнитуде

☐ Ранжировать по глубине

Найти

Сохранить

Рис. 2. Вид окна поиска с полями ввода параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Составленная нами база механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики (№ гос. регистрации 122041300106-8 от 19.02.2024 г.) размещена на сайте ИТПЗ РАН <https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/east-arctic/>. В нее вошло 595 решений механизмов для 273 землетрясений с $M = 2.1-7.6$, произошедших в 1927–2022 гг. (рис. 3). Отметим, что только одно из рассматриваемых событий – Булунское землетрясение 14.11.1927 г. – произошло до 1951 г. (не показано на рис. 4а). Увеличение количества землетрясений, для которых определен механизм очага, начинается в 80-х годах XX века (рис. 4а), т.е. примерно совпадает с началом рутинных определений TCM в GCMT [Dziewonski, Woodhouse, 1983]. В зависимости от времени максимум землетрясений с известными механизмами приходится на 2006 г., когда произошло сильнейшее за инструментальный период наблюдений сейсмическое событие на рассматриваемой территории – Олюторское землетрясение 20.04.2006 г. с $M_w = 7.6$, сопровождавшееся многочисленными афтершоками (рис. 1б) [Чебров, 2007]. Второй максимум на рис. 4а связан с тем, что механизмы очага были определены для Илин-Тасского (Абыйского) землетрясения 14.02.2013 г. с $M_w = 6.7$ и многих его афтершоков. Для 90% землетрясений, вошедших в базу данных,

количество различных решений механизма очага не превышает 5, причем для 150 событий имеется только одно определение механизма (рис. 4б). Максимальное количество различных фокальных механизмов для одного землетрясения составило 12.

Для Восточной Арктики собранная нами база превышает по объему информации все имеющиеся на текущий момент времени аналоги. Так, по сравнению с наиболее полной компиляцией различных данных, имеющейся в ISC-каталоге [International..., 2024], в нее вошли, во-первых, фокальные механизмы, опубликованные в литературе (225 решений). Во-вторых, благодаря использованию информации по агентствам GCMT, NEIC и GFZ непосредственно из первоисточников, нам удалось избежать некоторых неточностей, содержащихся в ISC-каталоге, и в базу также вошли пропущенные в ISC данные. Например, для рассматриваемой территории в ISC-каталоге приведены очаговые параметры согласно GFZ только для трех землетрясений 2019–2020 гг., в то время как в [GEOFON..., 2024] также имеются TCM еще для 11 сейсмических событий 2011–2018 гг. Закономерно, что количество собранного нами материала превосходит также ежегодно пополняемую базу данных “Землетрясения России” (<http://eqru.gsras.ru>). Преимущества в этом

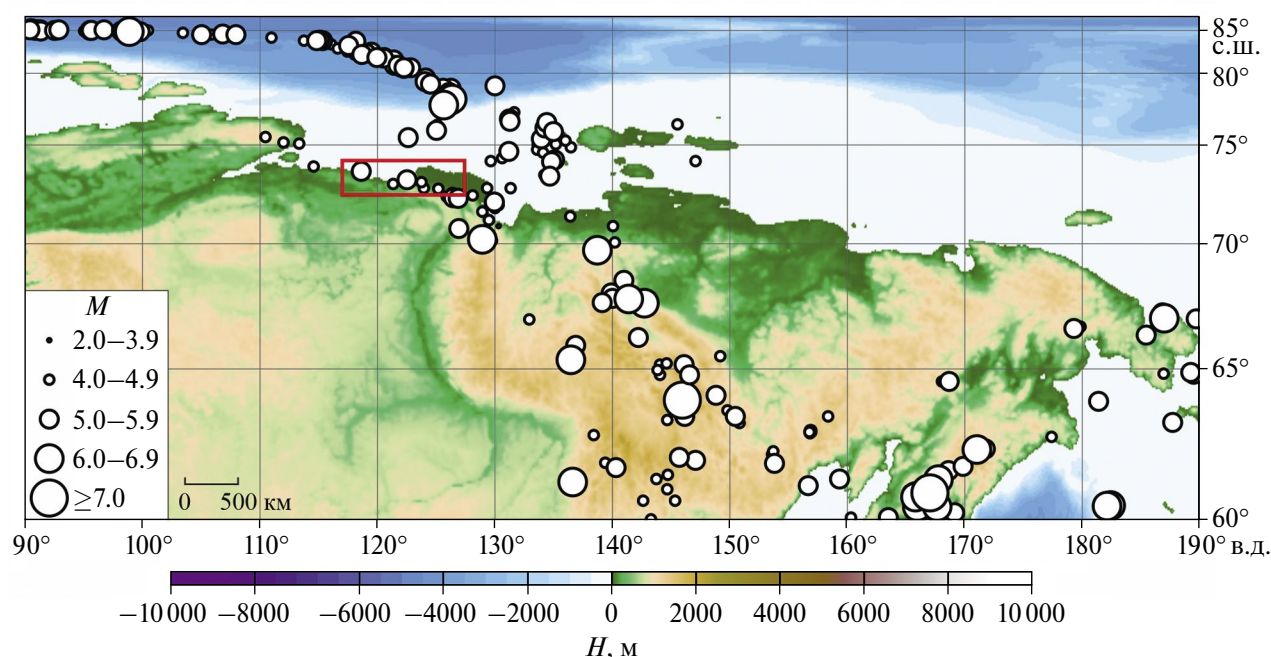


Рис. 3. Эпицентры землетрясений, вошедших в базу данных ($M = 2.1-7.6$, 1927–2022 гг.). Красным контуром обозначен Оленекский залив с прилегающими территориями, обсуждаемый ниже. Обозначения структур см. на рис. 1а.

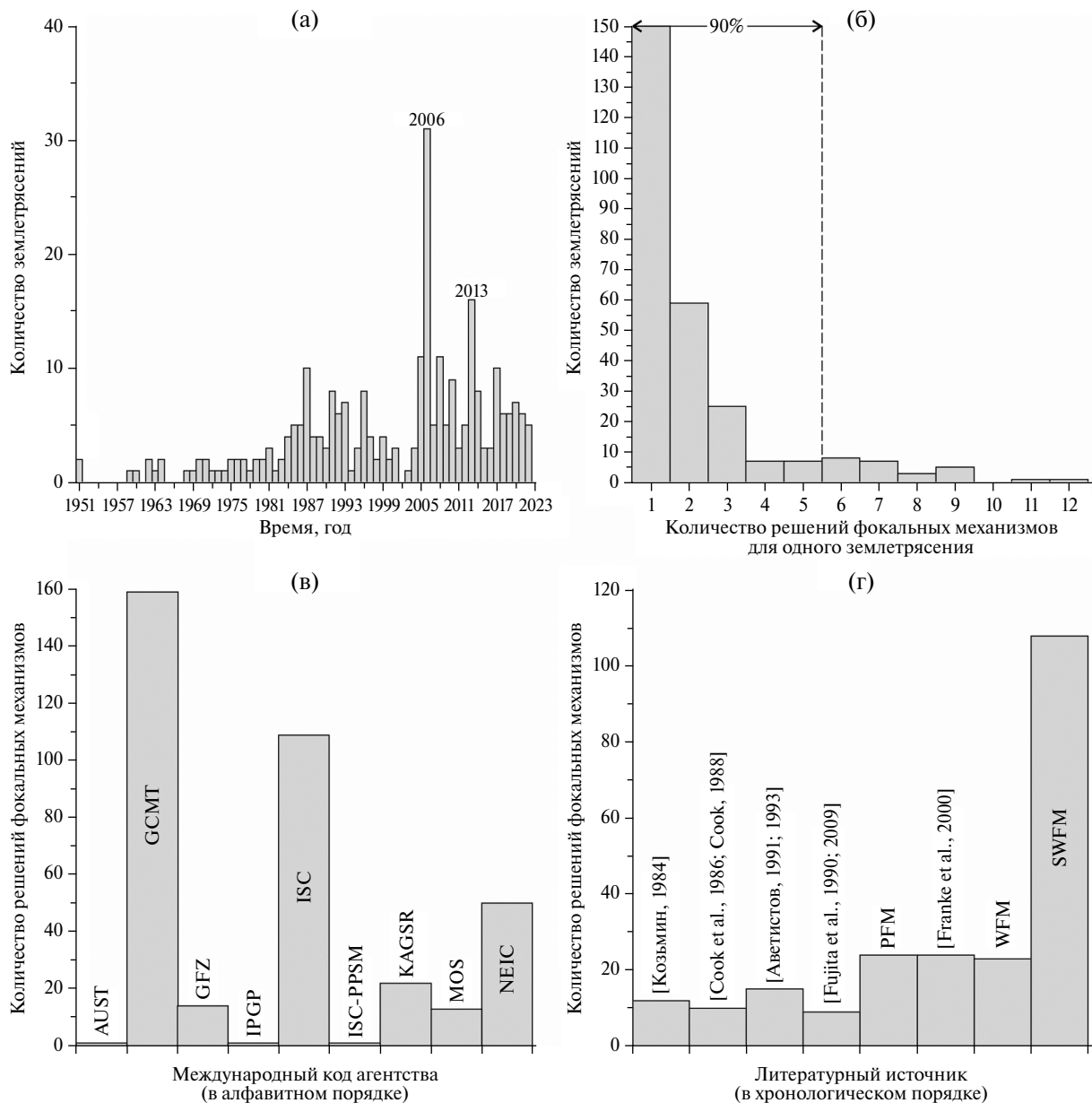


Рис. 4. Распределения количества землетрясений в базе данных по времени (а) и по количеству решений фокальных механизмов для одного землетрясения (б) и распределения количества решений фокальных механизмов по сейсмологическим агентствам (в) и литературным источникам (г). На панели (а) в распределение не включено Булунское землетрясение 14.11.1927 г. Расшифровка кодов агентств (в): AUST – Geoscience Australia, Australia (<http://www.ga.gov.au>); 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>); IGP – Institut de physique du globe de Paris, France (<http://geoscope.igpp.fr>); ISC – International Seismological Centre, UK (<http://isc.ac.uk>); ISC-PPSM – International Seismological Centre Probabilistic Point Source Model, UK (<http://www.isc.ac.uk/projects/ProbabilisticSTF>); KAGSR – Камчатский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба” РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия (<https://glob.emsd.ru>); MOS – ФИЦ “Единая геофизическая служба” РАН, г. Обнинск, Россия (<http://www.ceme.gsras.ru>); NEIC – National Earthquake Information Center, USA (<https://earthquake.usgs.gov>). Для обозначения литературных источников введены следующие обозначения (г): PFM – [Балакина и др., 1972; Гунбина и др., 1988; Имаев и др., 1990; 1998; Имаева и др., 2015; Мишарина, 1967; Jemsek et al., 1986; Parfenov et al., 1988], WFM – [Fujita, 1995; McMullen, 1985; Olson, 1990; Riegel, 1994; Sloan et al., 2011], SWFM – [Имаева и др., 2017; 2021; Середкина, Козьмин, 2017; Фомочкина, Филиппова, 2023; Filippova, Melnikova, 2023; Seredkina, Melnikova, 2018].

случае обусловлены следующими причинами: большой охват по времени, использование литературных источников, для одного и того же землетрясения приведены различные решения. То же самое относится и к некоторым работам, содержащим компиляцию механизмов очагов землетрясений для всей Восточной Арктики или отдельных ее частей [Аветисов, 2000; Имаев и др., 2000; Имаева и др., 2015; 2017; Крылов и др., 2020; Cook et al., 1986; Fujita et al., 2009; Sloan et al., 2011].

Сопоставление фокальных механизмов, полученных для одного и того же землетрясения с использованием различных данных и методов, может представлять интерес для детального сейсмотектонического анализа. Проиллюстрируем это на примере сейсмических событий, произошедших в Оленекском заливе моря Лаптевых и прилегающих территориях (рис. 1, рис. 3). В пределах рассматриваемой территории механизмы очагов определены для 7 землетрясений ($M = 4.5–5.4$, 1986–2011 гг.), причем только для двух наиболее сильных из них — 25.11.1987 г. с $mb = 5.1$ и 01.02.1980 г. с $M_w = 5.3$ — имеется несколько различных решений (рис. 5). Также для этого региона в работе [Аветисов, 1991] по данным временной сети из 12 сейсмических станций, установленных в летние сезоны 1985–1988 гг., были получены фокальные механизмы для двух серий слабых землетрясений. Определение механизмов проводилось методом групповой обработки [Мишарина и др., 1975]: выделялись пространственно близкие группы сейсмических событий, знаки первых вступлений P -волн от которых было возможно разделить нодальными плоскостями единственным образом. Эти групповые решения не вошли в собранную нами базу, однако результаты для всех трех групп представлены в табл. 2.

Сопоставляя различные механизмы очагов для землетрясений 25.11.1987 г. и 01.02.1980 г. (рис. 5), в первую очередь, следует обратить внимание на качество имеющихся решений и используемые данные. Так, сдвиговые механизмы из работы [Franke et al., 2000], характеризуются невысоким качеством (*poor*), во-первых, за счет того, что для этих землетрясений не удалось рассчитать ни одного отношения амплитуд P -, SV - и SH -волн. Во-вторых, все знаки первых вступлений P -волн для них получены по записям удаленных станций, т.е. расположены в центре сетки Вульфа, что затрудняет надежное определение механизма. Таким образом, эти решения следует исключить из дальнейшего анализа. В случае с землетрясением 25.11.1987 г.

решения [Аветисов, 1993; Fujita et al., 1990] также имеют невысокое качество (*poor*), однако они оба свидетельствуют о преобладании сбросовых движений по субширотным плоскостям в очаге рассматриваемого сейсмического события. Отметим, что в базе активных разломов Северной Евразии [Zelenin et al., 2022] в районе эпицентра этого события выделен разлом с близким простиранием.

Для землетрясения 01.02.1980 г. ($M_w = 5.3$, $mb = 5.4$) механизмы очагов из работ [Аветисов, 1993; Cook et al., 1990], несмотря на один и тот же применяемый метод, существенно отличаются между собой и по оценкам авторов характеризуются умеренной неоднозначностью (качество — *moderate*). Решение из работы [Cook et al., 1990] ближе к наилучшему двойному диполю, опубликованному в GCMТ-каталоге [Global..., 2024] и полученному путем инверсии длиннопериодных объемных волн [Dziewonski et al., 1981]. Полный девиаторный ТСМ, компоненты которого имеют относительно небольшие погрешности, свидетельствует о том, что в очаге этого сейсмического события реализовался практически чистый сдвиг ($DC = 90\%$). Таким образом, очаг землетрясения 01.02.1980 г. представляет собой сброс по плоскостям СЗ–ЮВ ориентации. С учетом глубины гипоцентра, оценки которой составляют от 11 [Аветисов, 1993] до 25 км [Sloan et al., 2011], это сейсмическое событие, наиболее вероятно, может быть отнесено к зоне Лено-Анабарского краевого шва, имеющей СЗ–ЮВ простирание (рис. 5). К этой же зоне, видимо, приурочены и землетрясения 15.06.1986 г. ($M = 4.7$), 08.06.2001 г. ($M_w = 4.5$), 07.12.2010 г. ($M_w = 4.9$), 20.05.2011 г. ($M_w = 4.7$) и первая группа слабых сейсмических событий 1985–1988 гг. (№ 1 на рис. 5 и в табл. 2), в очагах которых прослеживаются нодальные плоскости с близким простиранием. При этом кинематика подвижек в очагах обсуждаемых событий весьма разнообразна, что свидетельствует о неоднородном напряженно-деформируемом состоянии земной коры в дельте реки Лены [Filipprova, Melnikova, 2023], что также отражается в различии механизмов очагов для второй группы слабых событий 1985–1988 гг. (№ 2 на рис. 5 и в табл. 2) и землетрясения 15.09.1996 г. ($M_w = 4.9$).

ВЫВОДЫ

В результате проведенной нами работы была составлена база механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики (№ гос. регистрации 122041300106-8 от 19.02.2024 г.). В нее вошло

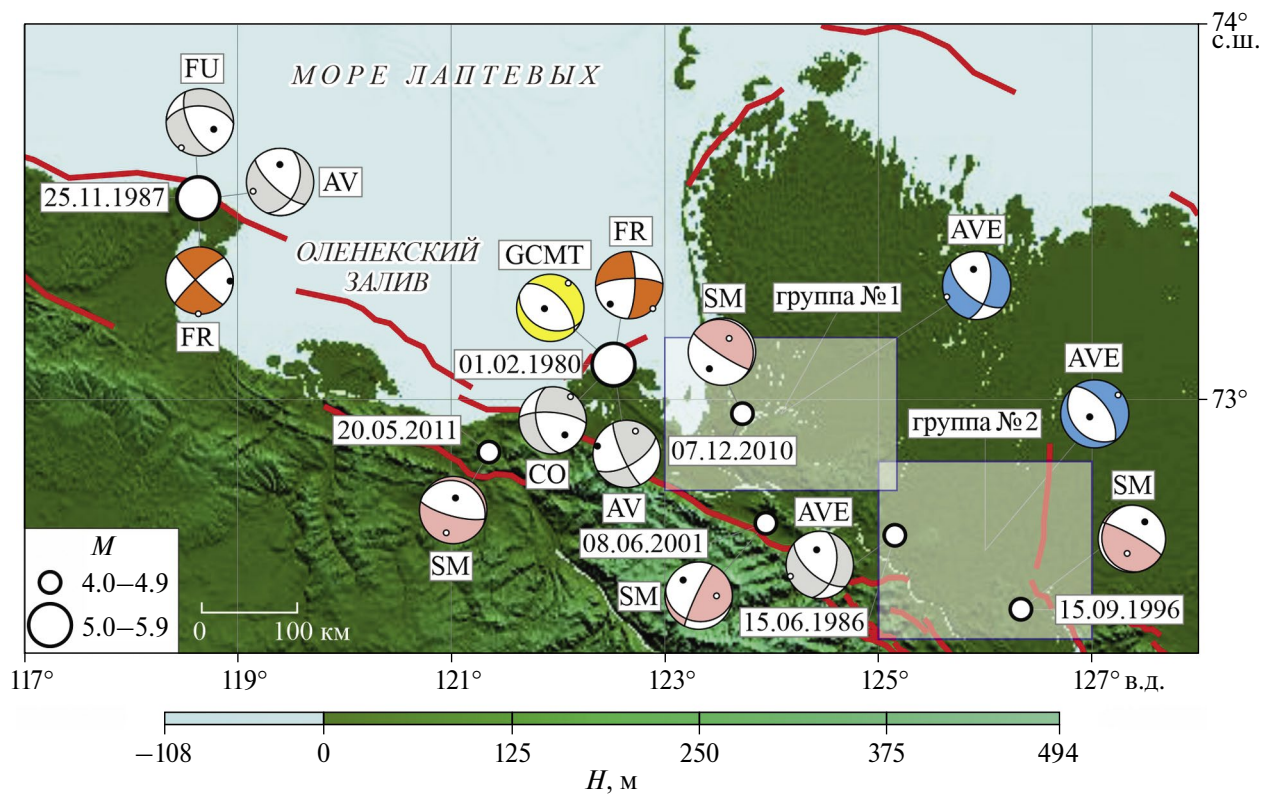


Рис. 5. Механизмы очагов землетрясений (в проекции нижней полусферы) Оленекского залива и прилегающих территорий, имеющиеся в составленной базе данных ($M = 4.5\text{--}5.4$, 1986–2011 гг.). Решения, полученные с помощью различных методов, обозначены цветом: серый – по знакам первых вступлений P -волн; оранжевый – по знакам первых вступлений P -волн и отношениям амплитуд P -, SV - и SH -волн; желтый – [Dziewonski et al., 1981]; розовый – по амплитудным спектрам поверхностных волн [Букчин, 1989]; синий – решения для групп слабых землетрясений, определенные методом [Мишарина и др., 1975]. Для литературных источников введены следующие обозначения: AVE – [Аветисов, 1991], AV – [Аветисов, 1993], CO – [Cook et al., 1986], FR – [Franke et al., 2000], FU – [Fujita et al., 1990], SM – [Seredkina, Melnikova, 2018]. Области, для которых получены групповые решения, обозначены серым цветом. Номера групп соответствуют табл. 2. Активные разломы показаны красными кривыми согласно работе [Zelenin et al., 2022].

Таблица 2. Механизмы очагов, полученные для трех групп слабых землетрясений 1985–1988 гг. [Аветисов, 1991]

№	Границы группы		NP1			NP2			Ось T		Ось P		Ось B	
	φ, град	λ, град	stk, град	dip, град	slip, град	stk, град	dip, град	slip, град	azm, град	pl, град	azm, град	pl, град	azm, град	pl, град
1	72.75–73.17	123.00–125.17	13	59	–38	130	60	–134	249	7	349	50	155	36
2	72.33–72.83	125.00–127.00	138	32	–95	324	58	–87	51	13	239	76	141	2
3	71.33–72.00	130.00–131.17	143	63	80	345	30	109	210	70	60	17	328	10

595 решений механизмов очагов (370 по данным сейсмологических агентств и 225 по литературным источникам) для 273 землетрясений с $M = 2.1-7.6$, произошедших в 1927–2022 гг. Для большинства событий приведены сведения о глубине очага, скалярном сейсмическом моменте и моментной магнитуде. Помимо самих очаговых параметров, в базу вошла информация о качестве приводимых решений, что во многих случаях облегчает их сопоставление. Это проиллюстрировано на примере землетрясений Оленекского залива моря Лаптевых и прилегающих территорий. Для удобства пользователя база имеет графический интерфейс, позволяющий осуществлять поиск по различным атрибутам (координатам, времени, значениям магнитуды и глубины). Собранный нами банк данных существенно превышает по объему информации все имеющиеся на текущий момент времени аналоги, включая ISC-каталог. Она может использоваться для проведения сеймотектонического анализа, расчетов напряженно-деформированного состояния литосферы, оценки сейсмической опасности для всей Восточной Арктики или отдельных ее регионов.

Составленная нами база механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики размещена на сайте ИТПЗ РАН <https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/east-arctic/>. Предполагается, что в дальнейшем она будет пополняться авторами каждые пять лет. В случае обнаружения неточностей или по вопросам внесения дополнительных данных в базу просим обращаться к А.И. Филипповой (aleirk@mail.ru).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в подборе исходных данных и обсуждение работы канд. геол.-мин. наук Я.Б. Радзиминовичу (БФ ФИЦ ЕГС РАН, ИТПЗ РАН) и докт. геол.-мин. наук В.И. Мельниковой (ИЗК СО РАН). Мы благодарим А.В. Трубенкова (ИТПЗ РАН) за помощь в размещении базы данных на сайте Института. Мы благодарим К.В. Крушельницкого, С.Д. Маточкину (ИТПЗ РАН) и канд. физ.-мат. наук С.В. Филиппова (ИЗМИРАН) за техническую помощь в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аветисов Г.П. Гипоцентрия и фокальные механизмы землетрясений дельты р. Лены и ее обрамления // Вулканология и сейсмология. 1991. № 6. С. 59–69.

Аветисов Г.П. Некоторые вопросы динамики литосферы моря Лаптевых // Физика Земли. 1993. № 5. С. 28–38.

Аветисов Г.П. Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых. Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОГ. 2000. В. 3. С. 104–114.

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. М.: Мир. 1983. Т.1. 880 с.

Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишакина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука. 1972. 191 с.

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.

Важенин Б.П. Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 2000. 205 с.

Гунбина Л.В., Воробьева Е.А., Бобков А.О. Омсукчанское землетрясение 11 февраля 1987 года. Препринт. Дальневост. отд-ние, Ин-т мор. геологии и геофизики, Сев.-Вост. комплекс. НИИ. Южно-Сахалинск. 1988. 21 с.

Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М. Тектоническая история Арктики. Актуальные проблемы тектоники. М.: Наука. 1987. С. 31–57.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра. 1990а. Кн. 1. 328 с.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра. 1990б. Кн. 2. 334 с.

Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Активные разломы и сеймотектоника Северо-Восточной Якутии. Якутск: ЯНЦ СО АН СССР. 1990. 139 с.

Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Напряженно-деформированное состояние земной коры в зоне перехода океан-континент арктической части Якутии // Отечественная геология. 1998. № 6. С. 14–18.

Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сеймотектоника Якутии. Москва: ГЕОС. 2000. 227 с.

Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Динамика очаговых зон сильных землетрясений северо-восточного фланга Момо-Селенныхских впадин // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 113–119.

Имаева Л.П., Имаев В.С., Гриб Н.Н., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Чипизубов А.В., Трофименко С.В. Карта сеймотектоники Восточной Сибири. Технический институт Северо-Восточного Федерального университета: г. Нерюнгри. 2015. Масштаб 1:8 000 000.

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. Сеймотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2017. 134 с.

- Имаева Л.П., Имаев В.С., Середкина А.И. Сейсмотектонические деформации активных сегментов зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Ануйской сутуры, северо-восток России // Геотектоника. 2021. № 1. С. 23–40. DOI:10.31857/S0016853X21010069
- Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. М.: Наука. 1984. 125 с.
- Крылов А.А., Иващенко А.И., Ковачев С.А., Цуканов Н.В., Куликов М.Е., Медведев И.П., Ильинский Д.А., Шахова Н.Е. Сейсмотектоника и сейсмичность Лаптевоморского региона: состояние вопроса и первый опыт годичной постановки донных сейсмостанций на шельфе // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 33–49. DOI:10.31857/S0203030620060140
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия? // Вычислительная сейсмология. Вып. 26. М.: Наука. 1994. С. 103–122.
- Мишарина Л.А. Напряжения в земной коре в рифтовых зонах. М.: Наука. 1967. 135 с.
- Мишарина Л.А., Солоненко Н.В., Леонтьева Л.Р. Локальные тектонические напряжения в Байкальской рифтовой зоне по наблюдениям групп слабых землетрясений. Байкальский рифт. Новосибирск: Наука. 1975. С. 9–21.
- 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
- 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>
- Чебров В.Н. (отв. редактор) Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГСРАН. 2007. 290 с.
- Amante C., Eakins B.W. ETOPO1. 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center. NOAA.2009. DOI:10.7289/V5C8276M
- 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 // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2003. V. 4. № 3. P. 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Cook D.B. Seismology and tectonics of the North American plate in the Arctic: Northeast Siberia and Alaska, Ph.D. dissertation, Michigan State University, East Lansing. 1988.
- Cook D.B., Fujita K., McMullen C.A. Present-day plate interactions in Northeast Asia: North American, Eurasian, and Okhotsk plates // Journal of Geodynamics. 1986. V. 6. P. 33–51. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(86\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0264-3707(86)90031-1)
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions // Geophysical Journal International. 1990. V. 101. № 2. P. 425–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x>
- 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>
- 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
- Dziewonski A.M., Woodhouse J.H. An experiment in systematic study of global seismicity: Centroid-moment-tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981 // Journal of Geophysical Research. 1983. V. 88. P. 3247–3271. <https://doi.org/10.1029/JB088iB04p03247>
- Ekström G. Anomalous earthquakes on volcano ring-fault structures // Earth and Planetary Science Letters. 1994. V. 128. № 3–4. P. 707–712. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90184-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90184-8)
- 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>
- Engen O., Eldholm O., Bungum H. The Arctic plate boundary // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. V. 108. № B2. 2075. <https://doi.org/10.1029/2002JB001809>
- Filippova A.I., Melnikova V.I. Crustal stresses in the East Arctic region from new data on earthquake focal mechanisms // Tectonics. 2023. V. 42. № 9. e2022TC007338. <https://doi.org/10.1029/2022TC007338>
- Franke D., Krüger F., Klinge K. Tectonics of the Laptev Sea – Moma ‘Rift’ region: investigation with seismologic broadband data // Journal of Seismology. 2000. V. 4. P. 99–116. <https://doi.org/10.1023/A:1009866032111>
- Fujita K. Peaceful nuclear explosions in the Sakha Republic (Yakutia), Russia // Seismological Research Letters. 1995. V. 66. № 3. P. 20–24. <https://doi.org/10.1785/gssrl.66.3.20>
- Fujita K., Cambray F.W., Velbel M.A. Tectonics of the Laptev Sea and Moma rift systems, northeastern USSR // Marine Geology. 1990. V. 93. P. 95–118. № [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(90\)90079-Y](https://doi.org/10.1016/0025-3227(90)90079-Y)
- Fujita K., Koz'min B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., McLean M.S., Imaev V.S. Seismic belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // Stephan Mueller

- Spec. Publ. 2009. V. 4. P. 117–145. <https://doi.org/10.5194/smssps-4-117-2009>
- 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 31 January 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 31 January 2024.
- Hayes G.P., Rivera L., Kanamori H. Source inversion of the W-phase: Real-time implementation and extension to low magnitudes // *Seismological Research Letters*. 2009. V. 80. № 5. P. 817–822. DOI:10.1785/gssrl.80.5.817
- 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>
- International Seismological Centre, 2024. *On-line Bulletin*. Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Available from <http://www.isc.ac.uk>. Last accessed 31 January 2024.
- Jemsek J.P., Bergman E.A., Nabelek J.L., Solomon S.C. Focal depths and mechanisms of large earthquakes on the Arctic Mid-Ocean Ridge System // *Journal of Geophysical Research*. 1986. V. 91. № B14. P. 13993–14005. <https://doi.org/10.1029/JB091iB14p13993>
- Kanamori H., Rivera L. Source inversion of W-phase: speeding up seismic tsunami warning // *Geophysical Journal International*. 2008. V. 175. № 1. P. 222–238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x>
- Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Kozmin B.M., Imaeva L.P. Seismicity of the Bering Strait region: evidence for a Bering block // *Geology*. 1997. V. 25. № 11. P. 979–982. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0979:SOTBSR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0979:SOTBSR>2.3.CO;2)
- McMullen C.A. Seismicity and tectonics of the Northeastern Sea of Okhotsk, M.S. thesis, Michigan State University, East Lansing. 1985.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Antonovskaya G.N., Asming V.E., Gabsatarova I.P., Dyagilev R.A., Shakhova E.V., Evtyugina Z.A. Low-Magnitude Earthquakes at the Eastern Ultraslow-Spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // *Seismological Research Letters*. 2021a. V. 92. № 4. P. 2221–2233. <https://doi.org/10.1785/0220200308>
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Ya.V., Asming V.E., Dulentsova L.G., Evtyugina, Z.A. Seismicity in the far Arctic areas: Severnaya Zemlya and the Taymyr Peninsula // *Journal of Seismology*. 2021b. V. 25. P. 1171–1188. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10032-1>
- National Earthquake Information Center. 2024. *On-line Catalog*. US Geological Survey, USA Available from <https://earthquake.usgs.gov>. Last accessed 31 January 2024.
- Olson D.R. The Eurasian – North American plate boundary through the area of the Laptev Sea. M.S. thesis, Michigan State University, East Lansing. 1990.
- Parfenov L.M., Koz'min B.M., Grinenko O.V., Imaev V.S., Imaeva L.P. Geodynamics of the Chersky seismic belt // *Journal of Geodynamics*. 1988. V. 9. № 1. P. 15–37. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(88\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0264-3707(88)90010-5)
- Riegel S.A. Seismotectonics of Northeast Russia and the Okhotsk Plate. M.S. thesis, Michigan State University, East Lansing, 1994.
- Sandanbata O., Kanamori H., Rivera L., Zhan Z., Watada S., Satake K. Moment tensors of ring-faulting at active volcanoes: Insights into vertical-CLVD earthquakes at the Sierra Negra Caldera, Galápagos Islands // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021. V. 126. e2021JB021693. <https://doi.org/10.1029/2021JB021693>
- Schlindwein V., Demuth A., Korger E., Läderach C., Schmid F. Seismicity of the Arctic mid-ocean ridge system // *Polar Science*. 2015. V. 9. № 1. P. 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.10.001>
- 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. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9762-9>
- Shuler A., Nettles M., Ekström G. Global observation of vertical-CLVD earthquakes at active volcanoes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 138–164. <https://doi.org/10.1029/2012JB009721>
- Sipkin S. Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: synthetic waveforms // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1982. V. 30. № 2–3. P. 242–259. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(82\)90111-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(82)90111-X)
- 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>
- Steblov G.M., Kogan M.G., King R.W., Scholz C.H., Bürgman R., Frolov D.I. Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. № 18. 1924. <https://doi.org/10.1029/2003GL017805>
- 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>

Database of Earthquake Focal Mechanisms for the East Arctic Region

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

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

^b*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

^c*National University of Oil and Gas "Gubkin University," Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: aleirk@mail.ru*

Received February 16, 2024

revised March 18, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract — In this paper, we present a description of a database of earthquake focal mechanisms, which is compiled from the data of international seismological agencies and literature sources for the East Arctic region. It consists of 595 focal mechanism solutions for 273 seismic events with $M = 2.1-7.6$, which occurred in 1927–2022. Information about the source depth, the scalar seismic moment, and the moment magnitude are also presented there for many events. In addition to the focal parameters, their quality assessments are available, which facilitates a comparison of different solutions in many cases. For user convenience, the database has a graphical interface that permits searching by various attributes (coordinates, time, magnitude, and depth). In terms of volume of the collected information, our database significantly exceeds all the analogues available at the present time. It can be used to perform a seismotectonic analysis, to estimate the stress–strain state of the lithosphere, and to assess seismic hazard for the entire East Arctic region or its separate areas. Implementation of the compiled database for comparison of different solutions of earthquake focal mechanisms and their seismotectonic analysis is illustrated in the paper on the example of seismic events occurred in the Olenek Bay of the Laptev Sea and adjacent territories. We suggest adding new information to the database every five years in future.

Keywords: seismicity, earthquake, focal mechanism, East Arctic