

УДК 550.34.01

Уточнение параметров сейсмического режима для района дельты р. Лены

© 2025 г. М.А. Новиков^{1,2}, А.А. Крылов^{1,2}

¹ИО РАН, г. Москва, Россия;

²АНОО ВО «Университет «Сириус», пгт Сириус, Краснодарский край, Россия

Поступила в редакцию 13.06.2025 г.

Аннотация. Труднодоступные арктические сейсмоактивные области, к которым относится район дельты реки Лены, нуждаются в уточнении их сейсмического режима и районировании сейсмической опасности. Накопленный объём современных сейсмологических данных позволил выделить два основных сейсмолинеамента в районе дельты р. Лены, а также определить для них основные параметры графиков повторяемости, положение сейсмогенного слоя коры, максимальную магнитуду, направление главных осей напряжения в коре и параметры обобщённых механизмов очагов. Применение байесовского метода позволило получить устойчивые оценки максимальной магнитуды с учётом ограниченного количества сильных событий в регионе. Построена одномерная скоростная модель коры на основе метода приёмных функций, что позволило выявить зоны вероятных литологических границ. Проведён сравнительный анализ с соответствующими сейсмолинеаментами из моделей, использованных для построения карт общего сейсмического районирования ОСР-97 и ОСР-2016. Сопоставление распределения сейсмичности с моделями зон возникновения очагов землетрясений для карт ОСР-97 и ОСР-2016 показало необходимость корректировки существующих моделей для более точного учёта локальных особенностей. Полученные результаты могут быть использованы для детального сейсмического районирования дельты р. Лены.

Ключевые слова: Арктика, дельта р. Лены, сейсмический режим, землетрясения, ЛДФ-модель, сейсмолинеament, сейсмическое районирование.

Для цитирования: Новиков М.А., Крылов А.А. Уточнение параметров сейсмического режима для района дельты р. Лены // Российский сейсмологический журнал. — 2025. — Т. 7, № 3. — С. 31–48. — DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.3.03>. — EDN: TDNJGM

Введение

Арктическая зона России и прилегающие моря составляют огромный регион, имеющий большой ресурсный потенциал. В то же время этот регион характеризуется труднодоступностью, суровым климатом и слабой изученностью, что значительно осложняет его эффективное освоение. Это касается, в частности, строительства в сейсмоопасных районах Арктики, к которым, прежде всего, относится Лаптевоморский регион, находящийся на границе Североамериканской и Евразийской литосферных плит, включающий в себя сегменты срединно-океанического спрединга и континентального рифтинга вблизи от древней Сибирской платформы [Драчев, 2000; *Drachev, Shkarubo*, 2017]. Недостаток геолого-геофизических данных и неполнота сейсмологических каталогов при-

водят к необходимости излишней генерализации при построении карт сейсмического районирования. Нормативных карт общего сейсмического районирования для обширных шельфовых зон и вовсе нет [СП 14.13330.2018, 2018].

Одной из наиболее сейсмоактивных областей Лаптевоморского региона является район дельты р. Лены, находящийся на стыке Сибирской платформы, Верхоянской складчатой системы и Лаптевоморской рифтовой системы [Аветисов, 2000; *Имаев и др.*, 2017; *Имаева и др.*, 2019]. Дельта р. Лены считается потенциальным центром нефтегазоаккумуляции [Гаврилов, 2013; *Фомин, Меленевский*, 2023]. При этом Усть-Оленёкский лицензионный участок, на котором ведутся сейсморазведочные работы [Скворцов и др., 2020], находится в непосредственной близости к сейсмоактивным структурам дельты.

Дельта р. Лены является самой большой в Арктике и отличается сложной структурой и малой изученностью [Are, Reimnitz, 2000]. При этом, согласно действующей карте общего сейсмического районирования ОСР-2015, данный регион является зоной повышенной сейсмичности с интенсивностью колебаний до 9 баллов по шкале MSK-64 [СП 14.13330.2018, 2018; Медведев и др., 1965]. Вместе с тем, для посёлка Тикси в восточной части дельты рассчитана 10%-ная вероятность превышения 8 баллов, 5%-ная вероятность превышения 9 баллов и 1%-ная вероятность превышения 10 баллов в течение 50 лет [СП 14.13330.2018, 2018].

Интерес к сложной сейсмотектонике Лаптевоморского региона обусловил проведение в последнее десятилетие ряда морских и наземных работ по развёртыванию на шельфе моря Лаптевых и в дельте р. Лены временных локальных сетей сейсмографов. В результате этих работ были существенно дополнены каталоги землетрясений, очаги которых располагались как на шельфе [Krylov et al., 2021; 2023; Крылов и др., 2023], так и в районе дельты [Geissler et al., 2017; Plötz et al., 2025]. Данные, полученные при локальном сейсмологическом мониторинге в дельте р. Лены, были включены в базу данных «Землетрясения России» [Шибанов и др., 2018; База данных ..., 2024].

Целью настоящей работы является уточнение параметров сейсмического режима для района дельты р. Лены с использованием накопленного объёма современных сейсмологических данных. Широкий спектр решаемых задач включает составление единого сводного локального каталога, уточнение положения основных линейных сейсмогенерирующих структур по распределению очагов из этого каталога, определение основных параметров графиков повторяемости, положения сейсмогенного слоя коры, максимальной возможной магнитуды $M_{\max}$ и обобщённых механизмов очагов для выделенных основных сейсмолинементов в исследуемой области. Кроме того, проведён сравнительный анализ с соответствующими сейсмолинементами из ЛДФ-моделей (линеamentно-доменно-фокальная модель), использованных для построения карт ОСР-97 [Уломов, Шумилина, 1999] и ОСР-2016 [Уломов и др., 2016].

1. Данные и методы

Создание сводного каталога

В настоящем исследовании был составлен сводный каталог землетрясений в районе дельты

р. Лены (далее — Сводный каталог). Основой послужил «Объединённый каталог землетрясений восточного сектора Российской Арктики» [Gvishiani et al., 2022], включающий данные каталогов ISC [ISC-GEM, 2024], «Землетрясения России» [База данных ..., 2024], «Землетрясения в СССР в 1976 году» [Землетрясения ..., 1980] и других источников за 1962–2019 гг. Сводный каталог был дополнен событиями из базы «Землетрясения России» за 2019–2023 гг., а также событиями из каталога ISC за 1918–1962 гг. Для работы использовались события в пределах 70–75° северной широты и 120–135° восточной долготы. Сводный каталог был очищен от кластеров с использованием классической процедуры декластеризации [Gardner, Knopoff, 1974].

Графики повторяемости землетрясений

Для построения графика повторяемости применялся линейный закон Гутенберга–Рихтера для моментной магнитуды M_w [Kagan, 1997; Sornette D., Sornette A., 1999]:

$$\lg N(M_w) = a - b \cdot M_w, \quad (1)$$

где $N(M_w)$ — количество событий с магнитудой меньшей или равной M_w , a — свободный член, b — наклон (угловой коэффициент) в законе Гутенберга–Рихтера [Aki, 1965].

Кроме того, использовался «скошенный» закон Гутенберга–Рихтера [Kagan, 2002; Куликов и др., 2019]:

$$\lg N(M_w) = a - b \cdot M_w - c \cdot (10^{1.5(M_w - M_c)} - 1), \quad (2)$$

$$c = \frac{10^{1.5(M_c - M_{cm})}}{\ln(10)}, \quad (3)$$

где M_{cm} — моментная магнитуда, с которой начинается загиб графика повторяемости, M_c — моментная магнитуда полноты. M_{cm} выбирается как максимальная известная магнитуда землетрясения в регионе [Куликов и др., 2019].

Последнее слагаемое в формуле (2) слабо влияет на график в зоне малых магнитуд и используется для моделирования загиба графика повторяемости вниз при больших магнитудах. Значения a и b линейной части графика повторяемости были найдены методом максимального правдоподобия [Aki, 1965].

Определение $M_{\max}$ по сейсмологическим данным

Для оценки максимального ожидаемого землетрясения ($M_{\max}$) применён байесовский метод, описанный в [Pisarenko et al., 1996]. Метод основан на использовании усечённого экспоненциального закона Гутенберга–Рихтера с учётом конечного значения $M_{\max}$, неопределённости

некоторых параметров и погрешностей в оценке магнитуд. Итоговая оценка максимальной магнитуды была выбрана как медиана апостериорного распределения, полученного с помощью байесовского подхода, начиная с априорного (равномерного) распределения $M_{\max}$ и уточняя его на основе данных Сводного каталога землетрясений.

При объёмах выборки в ~400 событий на каждом линейном элементе байесовский подход является более надёжным по сравнению с традиционными методами [Pisarenko, Rodkin, 2022]. Он показывает большую устойчивость, чем оценка методом моментов [Kijko, 2004], которая при малых выборках может давать неограниченно большие значения, и чем метод порядковых статистик, дающий нестабильные оценки при малом количестве больших событий [Kijko, Singh, 2011]. Широко используемый метод для несмещённой оценки $M_{\max}$ [Tate, 1959; Pisarenko et al., 1996] также зачастую даёт неоправданно большие значения при низкой полноте каталога. Преимущество байесовского метода заключается в том, что он позволяет получать устойчивые оценки и апостериорные распределения параметров, что особенно важно при анализе хвоста распределения, где традиционные методы (частотные, экстремальные, метод моментов) могут давать нестабильные или завышенные оценки максимальной магнитуды [Pisarenko, Rodkin, 2022].

Оценка одномерной скоростной модели

Для определения границ сейсмогенного слоя глубинное распределение сейсмичности сопоставлялось со скоростной моделью коры в регионе, полученной с помощью метода приёмных функций [Langston, 1977; Vinnik et al., 2004]. Для применения этого метода были использованы волновые формы, записанные сейсмостанцией «Тикси» (TIXI). Были выбраны 245 удалённых землетрясений с магнитудой $M_w > 7$ с эпицентральным расстоянием от 25 до 100°, произошедших с 2000 по 2024 год. Для выделения приёмных функций записи были переведены в координатную систему ZRT, применён частотный фильтр от 0.02 до 2 Гц, затем проведена итеративная деконволюция [Ligorria et al., 1999] с параметром Гаусса $\alpha=0.5$. На следующем шаге были выделены приёмные функции от 103 самых качественно записанных событий, которые в дальнейшем использовались для получения скоростной модели (рис. 1).

Расчёт направлений осей главных напряжений в коре и обобщённых механизмов очагов

В разных частях Лаптевоморского региона с помощью программы Stressinverse 1.1.3 [Vavrychuk,

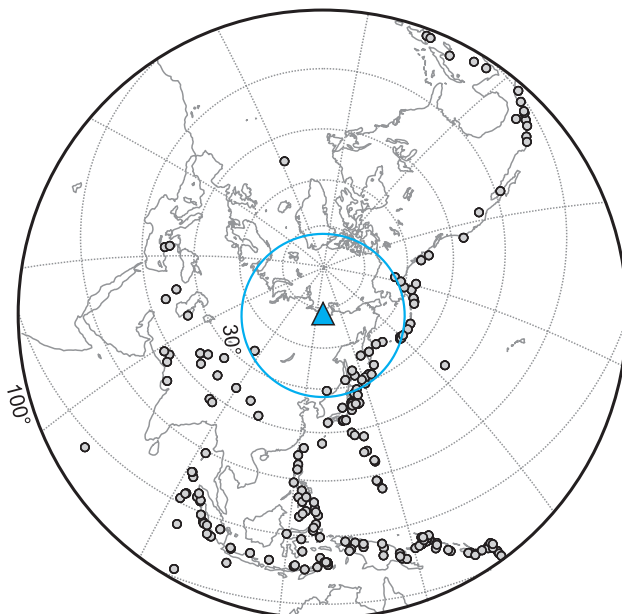


Рис. 1. Карта событий, использованных для получения одномерной скоростной модели путём инверсии приёмных функций.

Серые точки — эпицентры землетрясений. Синий треугольник — сейсмостанция «Тикси»

2014] были определены ориентации главных осей напряжений в коре [Крылов и др., 2023]. При этом район дельты р. Лены был разделён на две зоны, характеризующиеся разными сеймотектоническими обстановками: восточную (Хараулахский сегмент Верхоянской складчатой системы и юго-восточный фланг Усть-Ленской рифтовой системы) и западную (фланг Лено-Анабарского сегмента Верхоянской складчатой системы) [Аветисов, 2000; Имаева и др., 2019]. Каждая зона содержит по восемь известных механизмов очагов землетрясений с $M_{\max} \geq 3.5$ [Fujita et al., 2009; Global ..., 2022; ISC-GEM, 2024].

Алгоритм Stressinverse 1.1.3 позволяет установить локальное напряжённое состояние в определённой области коры, обеспечивающее наблюдаемую ориентацию плоскостей разрывов за счёт совместного анализа групп механизмов очагов землетрясений. Полученные значения азимута и угла падения осей главных напряжений использовались для определения обобщённых характерных механизмов очагов в выделенных двух зонах в районе дельты р. Лены.

2. Результаты

Распределение эпицентров землетрясений

В Сводном каталоге содержится информация о 1695 землетрясениях, зафиксированных в районе дельты р. Лены (70–75°N, 120–135°E).

В табл. 1 приведены параметры 14 наиболее сильных землетрясений с магнитудой больше 5.0. Самые сильные землетрясения (Булунские) с магнитудами 5.6–6.7 произошли в 1927–1928 гг. в районе Хараулахского хребта (Северное Верхоянье) в 140–160 км к югу от пос. Тикси [Имаев и др., 2017].

Таблица 1. Сильные землетрясения с $M \geq 5.0$ в районе дельты р. Лены по данным Сводного каталога

№	Дата и время в очаге, дд.мм.гггг чч:мм:сс	φ , °N	λ , °E	M_w
1	14.11.1927 04:56:33	70.09	128.73	6.7
2	14.11.1927 00:12:08	70.22	128.94	6.6
3	30.11.1918 06:48:46	70.54	130.51	6.4
4	03.02.1928 13:47:35	70.50	128.00	6.2
5	15.11.1927 21:48:46	70.50	128.00	6.0
6	09.04.1926 10:04:50	74.00	125.00	5.8
7	16.08.1928 07:36:37	70.00	126.00	5.6
8	21.07.1964 09:56:17	71.97	129.97	5.4
9	13.03.1990 00:33:01	73.29	134.67	5.4
10	01.02.1980 17:30:28	73.10	122.52	5.3
11	01.03.1991 01:57:06	72.14	126.87	5.1
12	01.01.1988 14:36:12	74.62	131.17	5.1
13	07.12.2003 07:16:15	74.05	134.83	5.1
14	20.05.1963 17:01:40	72.16	126.47	5.0

На рис. 2а представлена карта эпицентров землетрясений в соответствии со Сводным каталогом, а также активных разломов согласно базе AFEAD [Бачманов и др., 2017]. Видно, что эпицентры землетрясений не распределены равномерно, а формируют области скопления, в основном ориентированные вдоль разломных зон. Помимо областей скопления определённое число эпицентров имеет равномерное «диффузное» распределение. Наиболее чётко выделяются два вытянутых скопления эпицентров: первая зона пересекает дельту с северо-запада на юго-восток от Оленёцкого залива до губы Буор-Хая вдоль Оленёнской и Быковской протоков. Данное скопление эпицентров обозначим как сейсмолинеament «Оленёк». Вторая зона северо-восточного простирания проходит примерно по центру губы Буор-Хая и заходит на сушу. Данное скопление эпицентров обозначим как сейсмолинеament «Буор-Хая».

Для количественного описания сейсмолинеamentов «Оленёк» и «Буор-Хая» была построена карта плотности эпицентров (рис. 2б). Она подтверждает их как зоны наибольшей плотности эпицентров – это основные сейсмогенерирующие структуры района дельты р. Лены.

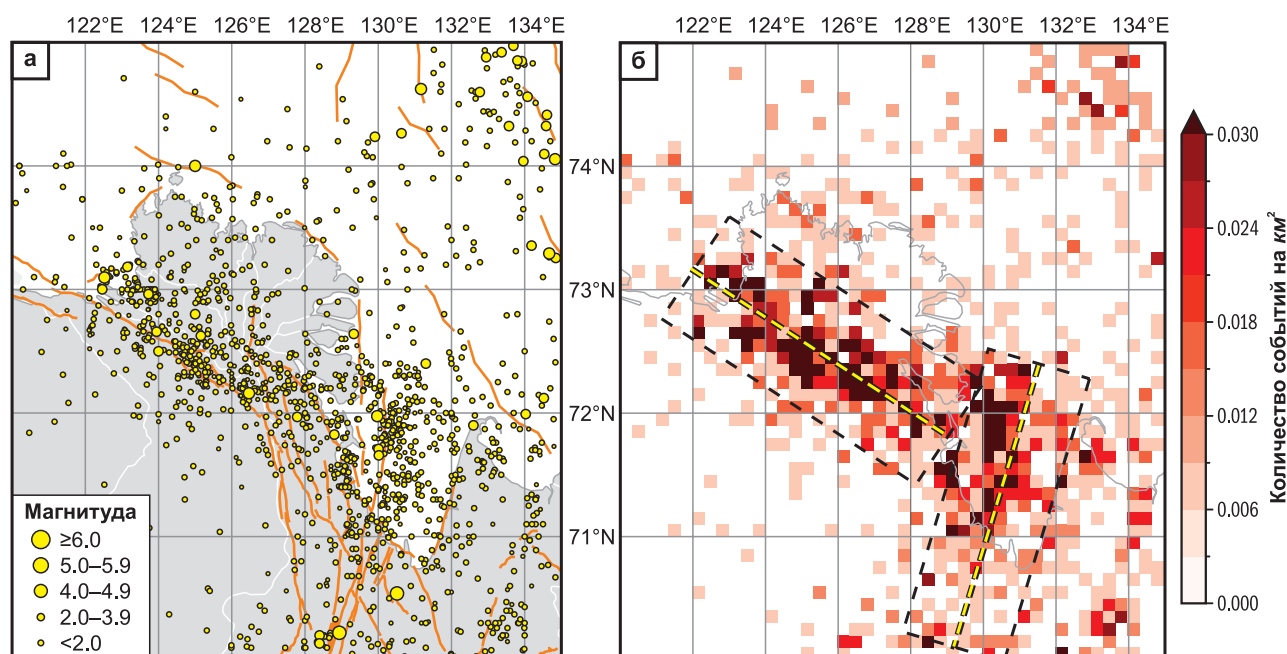


Рис. 2: а – распределение эпицентров землетрясений в районе дельты р. Лены по данным Сводного каталога; б – карта плотности эпицентров на основе той же выборки.

Оранжевыми линиями показаны активные разломы в соответствии с базой данных AFEAD. Чёрными пунктирными линиями показаны границы зон сейсмолинеamentов «Оленёк» и «Буор-Хая», жёлтыми линиями – их осевые направления

Повторяемость землетрясений

На рис. 3 представлены графики повторяемости землетрясений для обоих линеаментов. Аппроксимации выполнены по классическому закону Гутенберга–Рихтера [Aki, 1965], а также по «скошенному» варианту [Kagan, 2002], позволяющему учесть загиб графика при высоких магнитудах.

Точки графика повторяемости для сейсмолинеамента «Оленёк» (рис. 3а) хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. Загиб графика начинается от максимального события в каталоге для этого сейсмолинеамента. Для линеамента «Буор-Хая» (рис. 3б) кривая повторяемости отклоняется от линейной зави-

симости, начиная с магнитуды 4.5. Это связано с присутствием нескольких крупных землетрясений, произошедших в короткий промежуток времени — так называемых Булунских событий (1927–1928 гг.), а также с наличием палеосейсмической дислокации Берис [Имаев и др., 2000]. Последняя, имеющая расчётную магнитуду ~7.0–7.5 и оценённая возрастом в ~1000 лет, не отступает от тренда линейной зависимости.

В табл. 2 приведены значения повторяемости крупных землетрясений ($M \geq 6.0$) в зависимости от выбранного типа аппроксимации, а также оценка максимальной магнитуды (медиана апостериорного распределения $M_{\max}$) для обоих сейсмолинеаментов.

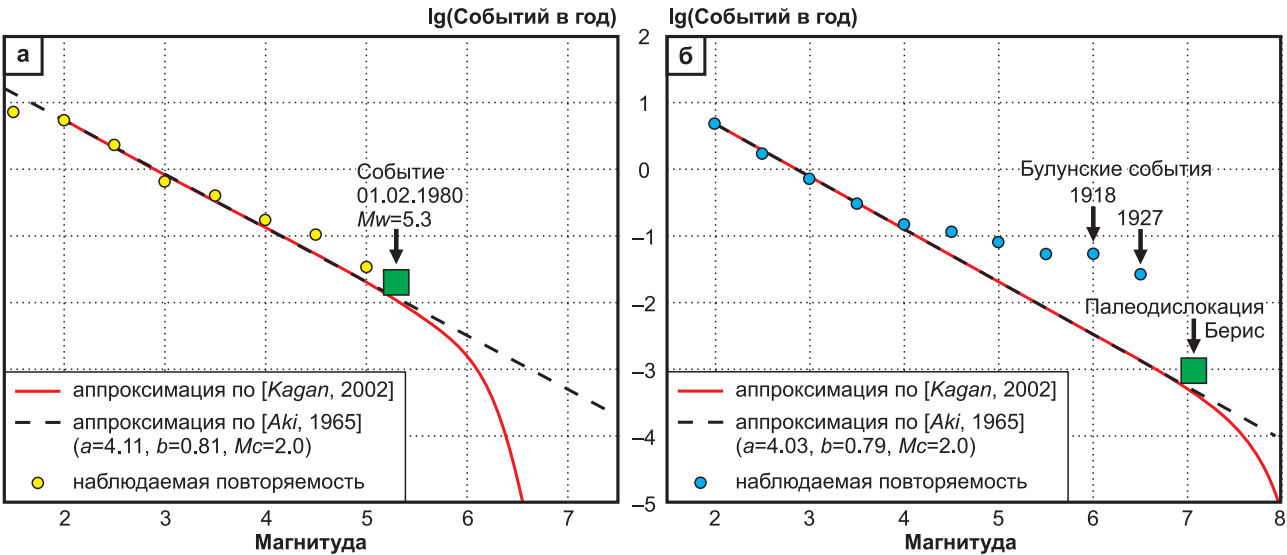


Рис. 3. Графики повторяемости землетрясений по Сводному каталогу в зоне линеаментов: а — «Оленёк»; б — «Буор-Хая».

Жёлтые и синие точки — наблюдаемые значения повторяемостей. Пунктирная линия — линейная аппроксимация по [Aki, 1965]. Сплошная красная линия — «скошенная» модель повторяемости по [Kagan, 2002]. Зелёными квадратами указаны крупнейшие события на каждом из линеаментов

Таблица 2. $M_{\max}$ и повторяемость землетрясений (N) в зоне сейсмолинеаментов «Оленёк» и «Буор-Хая» по данным Сводного каталога

Сейсмо-линеамент	Тип аппроксимации	$M_{\max}$	Доверительный интервал $M_{\max}$	$N (M=6.0)$	$N (M=6.5)$	$N (M=7.0)$	$N (M=7.5)$
«Оленёк»	линейная	6.2	5.35–7.24	$3.195 \cdot 10^{-3}$	$1.261 \cdot 10^{-3}$	—	—
	скошенная			$1.539 \cdot 10^{-3}$	$2.295 \cdot 10^{-5}$	—	—
«Буор-Хая»	линейная	7.6	6.67–8.55	$3.312 \cdot 10^{-3}$	$1.332 \cdot 10^{-3}$	$5.355 \cdot 10^{-4}$	$2.154 \cdot 10^{-4}$
	скошенная			$3.312 \cdot 10^{-3}$	$1.332 \cdot 10^{-3}$	$5.355 \cdot 10^{-4}$	$1.139 \cdot 10^{-5}$

Примечание: значения N даны для магнитуд в пределах верхней границы доверительного интервала для $M_{\max}$.

Механизмы очагов и напряжённое состояние коры

На рис. 4а представлены механизмы очагов 16 землетрясений с $M_w \geq 3.5$, использованные для вычисления направлений осей главных напряжений в коре и обобщённых механизмов очагов с помощью алгоритма Stressinverse 1.1.3. Эти события были сгруппированы в две вытянутые зоны, соответствующие сейсмолинеаментам «Оленёк» и «Буор-Хая». Табл. 3 содержит значения азимутов и углов падения осей главных напряжений, а также соответствующий тектонический режим.

Дополнительно были проанализированы данные GNSS, полученные с геодезической станции «Тикси» [Blewitt et al., 2018]. Средние скорости смещений составляют $V_{\text{ю}} = 11.68 \pm 0.16 \text{ мм/год}$ в южном направлении и $V_{\text{в}} = 17.07 \pm 0.14 \text{ мм/год}$ в восточном направлении (рис. 4б, в). Соответствующий азимут смещений составляет $\alpha = 124^\circ$. Это значение в целом согласуется с азимутами главных растягивающих напряжений в зонах обоих сейсмолинеаментов.

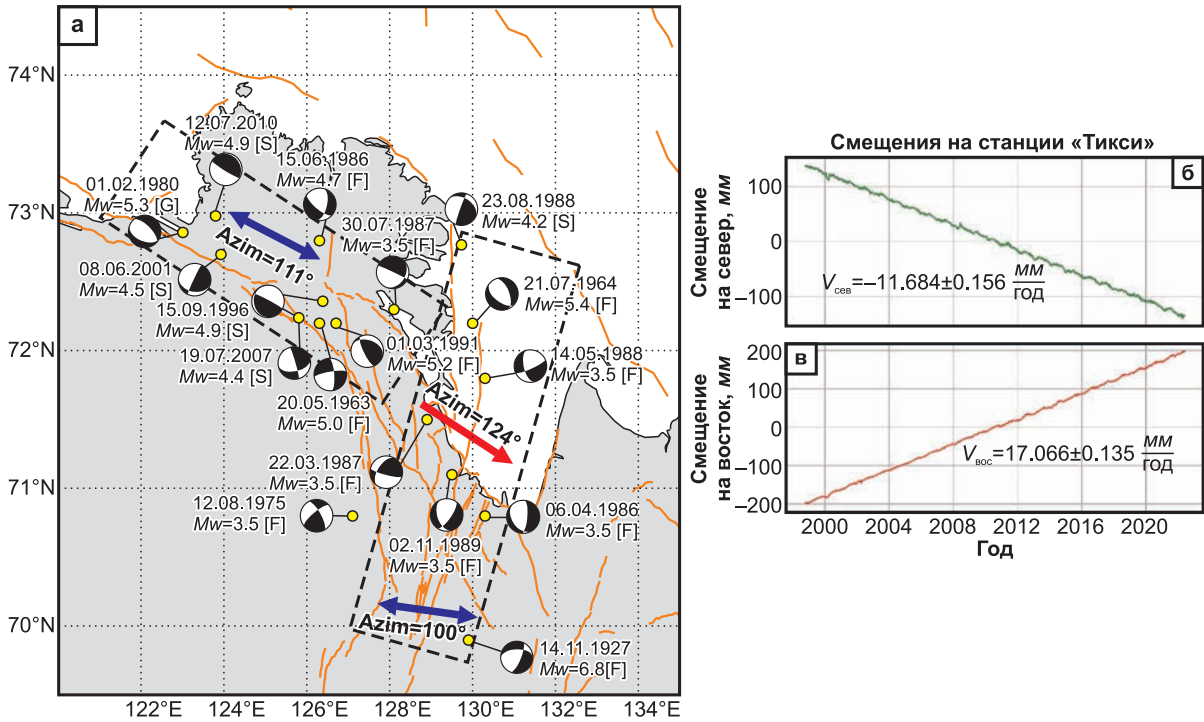


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений с $M_w \geq 3.5$ в районе дельты р. Лены с указанными механизмами очага согласно [Krylov et al., 2023] с дополнениями (а); смещения на север (б) и юг (в) геодезической станции «Тикси» представлены согласно Nevada Geodetic Library [Blewitt et al., 2018].

Сейсмические события обозначены жёлтыми кругами. Механизмы очага представлены согласно источникам: [F] – [Fujita et al., 2009], [G] – [Global ..., 2022]. Оранжевыми линиями обозначены активные разломы согласно базе данных AFEAD [Бачманов и др., 2017]

Таблица 3. Параметры направлений главных осей напряжений в коре и обобщённых механизмов очагов в области сейсмолинеаментов «Оленёк» и «Буор-Хая», полученные с помощью алгоритма Stressinverse 1.1.3

Сейсмо- линеамент	S1(P)		S2(B)		S3(T)		Обобщённый механизм очага			Тектонический режим (согласно критериям из [Zoback, 1992])
	AZM, °	dip, °	AZM, °	dip, °	AZM, °	dip, °	strike, °	dip, °	rake, °	
«Оленёк»	21	1	108	68	111	22	165	71	168	сдвиг
«Буор-Хая»	81	54	4	9	100	35	198	33	–73	растяжение

Примечание: *AZM* – азимут осей главных напряжений, *strike* – азимут простираения, *dip* – угол падения, *rake* – угол скольжения по разлому.

Разнообразие механизмов очагов в районе дельты р. Лены свидетельствует о нахождении данного участка коры в зоне влияния различных тектонических движений: растяжения в районе хребта Гаккеля и на шельфе моря Лаптевых и сжатия, фиксируемого на хребте Черского [Парфенов и др., 1988; Аветисов, 2000; Крылов и др., 2023]. Частая смена режимов сжатия и растяжения может быть также вызвана близостью региона к оси вращения Евразийской и Североамериканской плит [Аветисов, Гусева, 1991; Cook et al., 1986]. Кроме того, в данном районе достаточно выражена и сдвиговая составляющая: согласно [Имаева и др., 2019], для западной части дельты р. Лены характерен транспрессионный тектонический режим, в то время как восточная часть, отделяемая от неё вдоль правосторонним сдвигом субмеридионального распространения, характеризуется транстенсионным режимом.

Глубина сейсмоактивного слоя

Для оценки характерных глубин очагов землетрясений в районе дельты р. Лены был выполнен сравнительный анализ данных из различных источников. Распределение глубин представлено на рис. 5. Использованы данные из следую-

щих источников: региональный каталог Якутии (YAK) [База данных ..., 2024], международный каталог ISC-GEM [ISC-GEM, 2024], Якутский филиал ФИЦ ЕГС РАН (YARS) [Kulyandina et al., 2024], материалы по сейсмичности Сибири (MATSS) [Материалы ..., 1991], материалы Университета штата Мичиган (MSUGS) [Ковачев и др., 1994; Mackey et al., 2010] и каталог «Землетрясения в СССР в 1976 году» (ZEMSU) [Землетрясения ..., 1980].

Основная часть землетрясений регистрируется на глубинах от 5 до 30 км. В данных MSUGS содержится информация о единичных событиях с глубинами 60–80 км, что существенно превышает глубину границы Мохоровичича (около 45–46 км по данным различных источников [Cherepanova et al., 2013; Атлас ..., 2013]). Эти координаты и глубины гипоцентров были взяты из кратковременного эксперимента с донными сейсмостанциями в Буор-Хая [Ковачев и др., 1994]. Данные землетрясения с глубиной более 60 км имеют малую магнитуду $M_L=0.7-2.2$ и находятся в удалении от сети (более 200 км от ближайшей станции), что может создавать большую погрешность по глубине в рамках локального мониторинга.

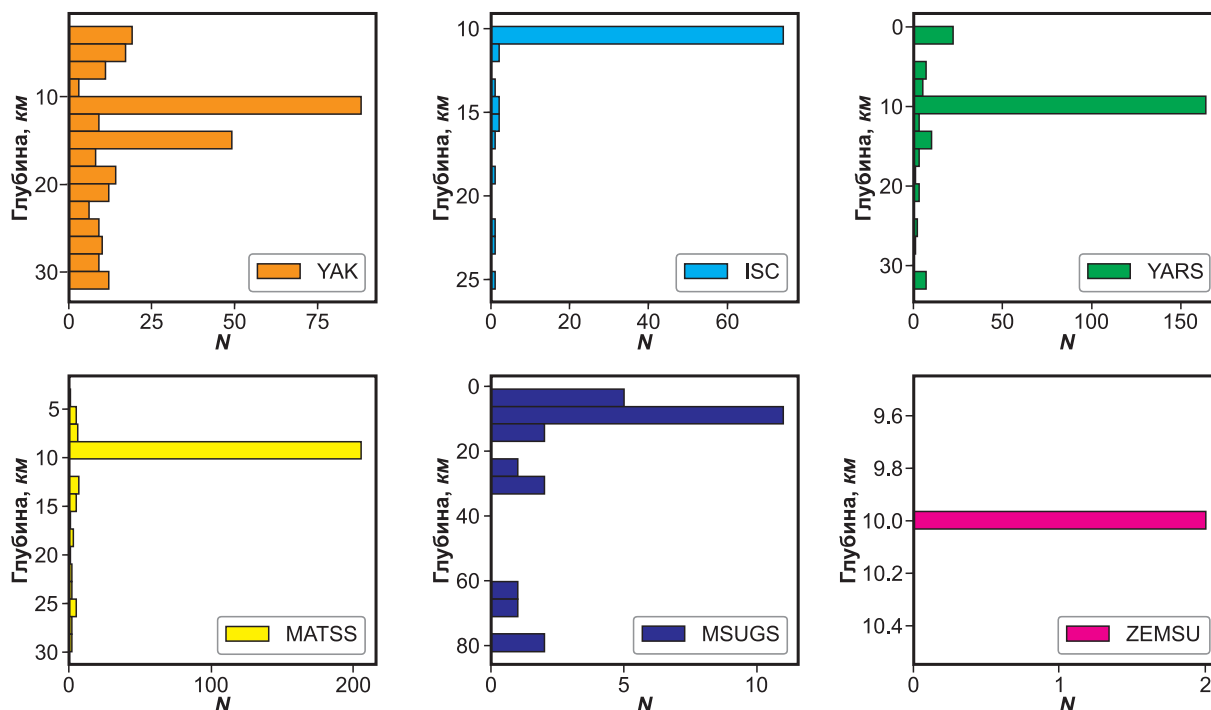


Рис. 5. Распределение глубин землетрясений в сводном каталоге по источникам данных:

YAK — региональный каталог Якутии; ISC — International Seismological Centre;

YARS — Якутский филиал ФИЦ ЕГС РАН; MATSS — Материалы по сейсмичности Сибири;

MSUGS — Michigan State University, Department of Geological Sciences;

ZEMSU — «Землетрясения в СССР в 1976 году»

Это позволяет заключить, что по разным данным основной сейсмоактивный слой в районе дельты р. Лены ограничен глубиной примерно 30 км. Вероятнее всего, более глубокие события являются либо крайне редкими мантийными землетрясениями, либо результатом ошибок при определении глубины. Также следует отметить, что большинство распределений демонстрируют пик на глубине около 10 км, что связано, видимо, с особенностями алгоритмов локализации.

Скоростная модель литосферы

Модель глубинного распределения скорости поперечных волн, полученная путём инверсии приёмных функций [Langston, 1977; Vinnik et al., 2004] на записях сейсмической станции «Тикси», приведена на рис. 6. Рассчитанная модель содержит выраженную зону низких скоростей $V_s \sim 3.1\text{--}3.2$ км/с в диапазоне глубин с 0 до 15 км. Далее в скоростной модели присутствуют резкие ступенчатые возрастания скорости: на глубине 16 км — с 3.2 до 3.5 км/с; на 30 км — с 3.6 до 3.8 км/с; на 40 км — с 3.8 до ~4.1 км/с. Ниже 56 км скорость линейно увеличивается до 4.5 км/с.

На рис. 6 скоростная модель сопоставляется с глубинным распределением очагов из Сводного каталога. Видно, что ступенчатое возрастание скорости на глубине 16 км соответствует максимуму в глубинном распределении очагов.

В то же время, ступенчатое возрастание скорости на глубине 30 км соответствует нижней границе сейсмогенного слоя.

3. Обсуждение

Характеристики сейсмолинеamentов «Оленёк» и «Буор-Хая»

Итак, по данным Сводного каталога в эпицентральном поле землетрясений в районе дельты р. Лены выделяются две основные вытянутые зоны концентрации очагов — сейсмолинеamentы «Оленёк» и «Буор-Хая» (рис. 2). Обе разломные зоны располагаются в окрестности границ древней Сибирской платформы и более молодых структур Лаптевоморского шельфа [Имаева и др., 2019]. «Оленёк» находится на восточном фланге Лено-Анабарского сегмента Верхоянской складчатой системы, в то время как «Буор-Хая» — на юго-восточном фланге Усть-Ленской рифтовой системы и Хараулахском сегменте Верхоянской складчатой системы.

Полученные по описанным ранее сейсмологическим данным параметры для сейсмолинеamentов «Оленёк» и «Буор-Хая» приведены в табл. 4. Следует отметить, что положение и параметры сейсмолинеamentов определены только по сейсмологическим данным (Сводный каталог, а также известные механизмы очагов и палеосейсмодислокация).

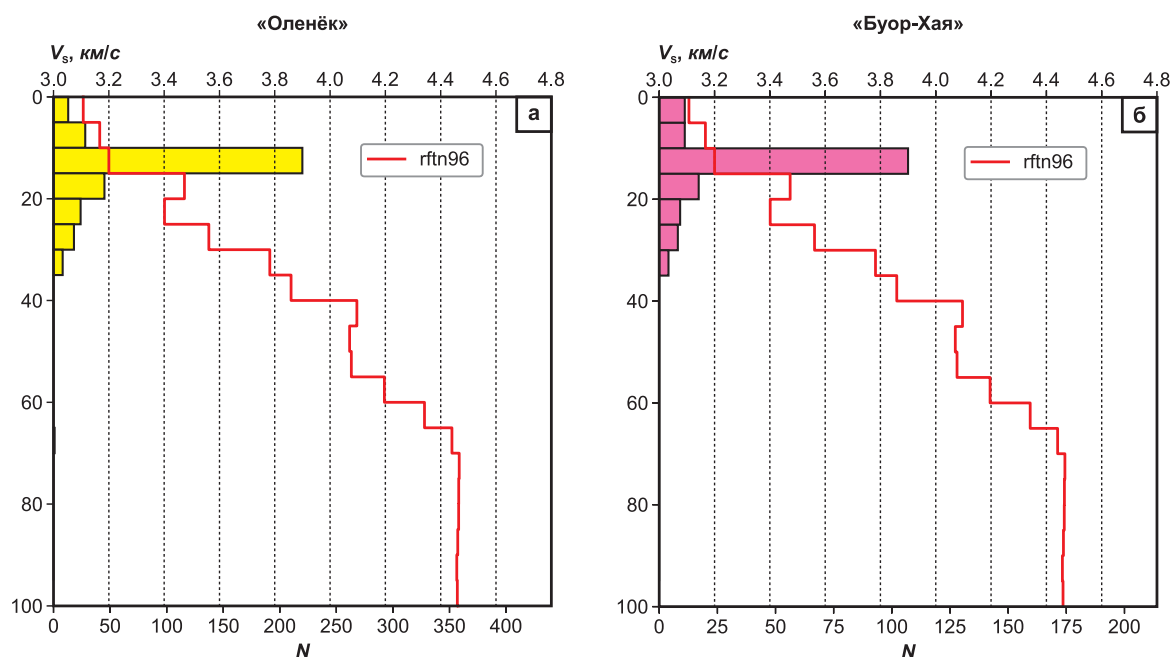


Рис. 6. Распределение глубин очагов землетрясений в зонах сейсмолинеamentов «Оленёк» (а) и «Буор-Хая» (б). Красной линией показана скоростная модель поперечных волн, полученная инверсией приёмных функций (алгоритм rftn96)

**Сопоставление распределения эпицентров
с расположением сейсмолинеаментов
ЛДФ-моделей ОСР-97 и ОСР-2016**

Для анализа известных ЛДФ-моделей в районе дельты р. Лены были сопоставлены положения сейсмолинеаментов из моделей ОСР-97 и ОСР-2016 с распределением эпицентров землетрясений из Сводного каталога.

На рис. 7 представлены карты эпицентров событий с магнитудой $M > 3.0$, а также сейсмолинеаменты ЛДФ-моделей ОСР-97 (рис. 7а) и ОСР-2016 (рис. 7б). Согласно методологии построения карт ОСР [Уломов, Шумилина, 1999; Уломов и др., 2016], эпицентры относительно сильных событий должны располагаться ближе к осевым линиям сейсмолинеаментов, что указывает на их связь с активными разломами.

Однако эта закономерность в районе дельты р. Лены выполняется не во всех случаях. На карте сейсмолинеаментов ОСР-97 (рис. 7а) видно, что часть из них не сопровождается ни одним эпицентром событий с $M > 3.0$ вблизи своей оси. На карте сейсмолинеаментов ОСР-2016 (рис. 7б) это ещё более заметно.

Кроме того, были построены вертикальные сечения, показывающие количество очагов землетрясений вдоль профилей, перпендикулярных основным сейсмолинеаментам из моделей ОСР-97 (рис. 8) и ОСР-2016 (рис. 9). Ожидается, что по модели ОСР эпицентры землетрясений будут образовывать нормальное распределение с максимумом на осевой линии сейсмолинеамента.

Таблица 4. Параметры сейсмолинеаментов «Оленёк» и «Буор-Хая», выделенных в дельте р. Лены

№	$M_{\max}$	a	b	$H_{\min}$	$H_{\max}$	strike, °	dip, °	rake, °
«Оленёк»	6.2	4.11	0.81	5	30	165	71	168
«Буор-Хая»	7.6	4.03	0.79	5	30	198	33	−73

Примечание: $H_{\min}$ — верхняя граница сейсмогенного слоя, $H_{\max}$ — нижняя граница сейсмогенного слоя, strike — азимут простирания, dip — угол падения, rake — угол скольжения по разлому.

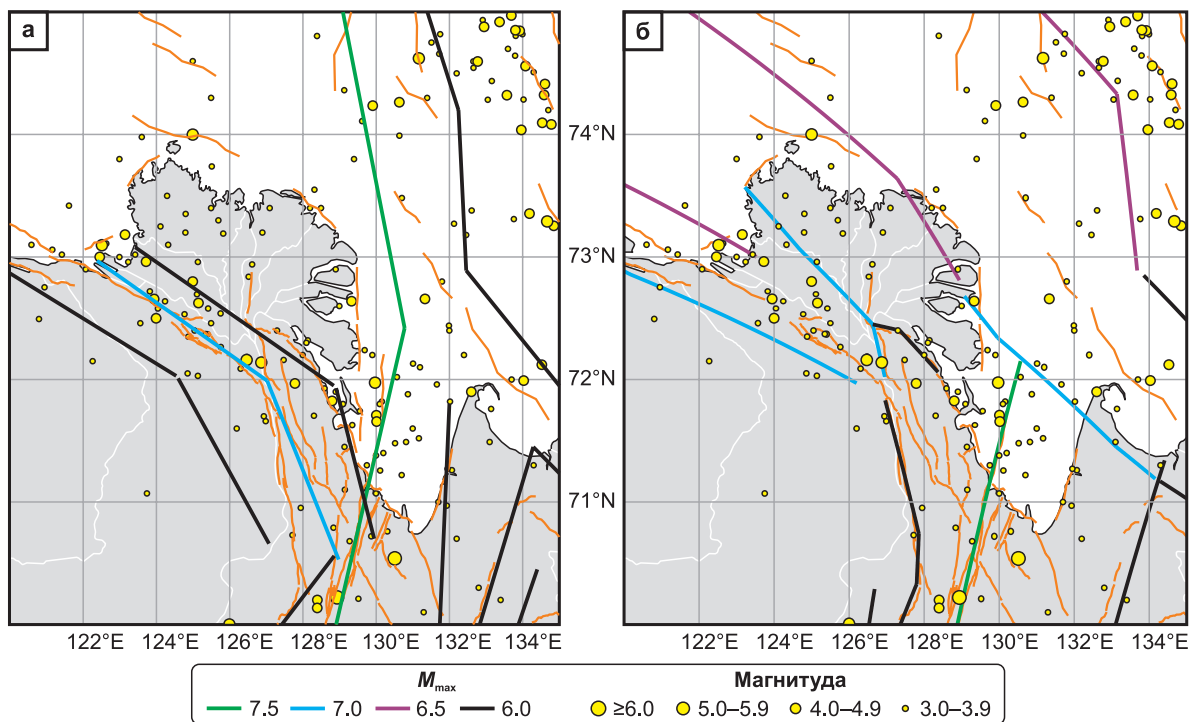


Рис. 7. Сопоставление распределения эпицентров землетрясений (жёлтые круги) с сейсмолинеаментами ЛДФ-моделей: а — ОСР-97 [Уломов, Шумилина, 1999]; б — ОСР-2016 [Уломов и др., 2016].

Цвет линий сейсмолинеаментов соответствует значению $M_{\max}$. Оранжевыми линиями обозначены разломные зоны по базе данных AFEAD [Бачманов и др., 2017]

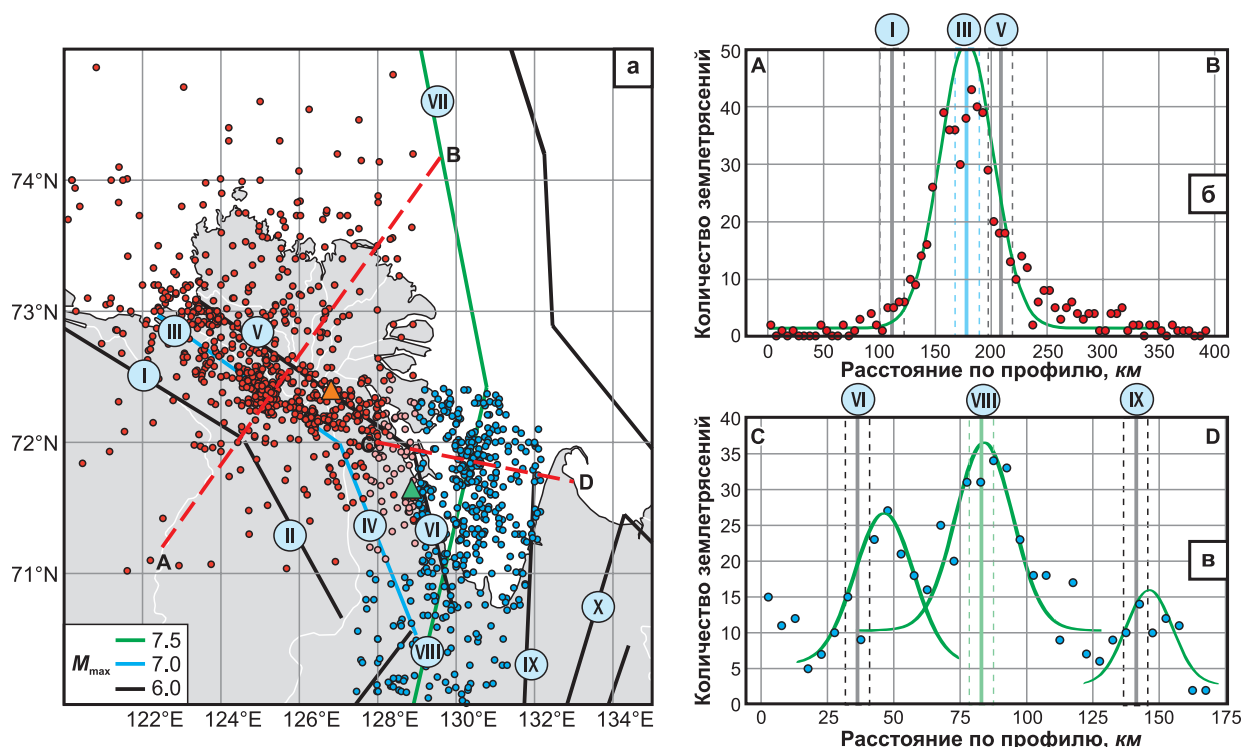


Рис. 8. Распределение эпицентров землетрясений в районе дельты р. Лены на фоне сейсмолинеаментов из ЛДФ-модели ОСР-97 (а); распределение количества очагов землетрясений вдоль профилей (сечения) А–В (б) и С–Д (в).

На рис. (а) изображены только очаги в коридорах, использованных для построения сечений.

Зелёный треугольник – расположение сейсмостанции «Тикси», оранжевый треугольник – расположение сейсмостанции «Столб». Красные круги – события, вошедшие в сечение А–В, синие – в С–Д, розовые – в оба сечения. На рис. (б) и (в) цветными линиями обозначены пересечения с сейсмолинеаментами, а пунктирными линиями – границы среднего возможного разброса очагов ± 10 км от их осевой линии (см. пояснения в тексте)

Рис. 8 показывает, что не всегда максимум нормального распределения количества очагов землетрясений вдоль профилей соответствует линии пересечения с сейсмолинеаментом. Это наблюдается даже с учётом среднего разброса очагов ± 10 км от их осевых линий: данный диапазон найден исходя из средней глубины очагов ~ 15 км и угла падения разломов $\sim 60^\circ$ (диапазон разброса обозначен на рис. 8б, в и рис. 9б, в). На разрезе А–В распределение сейсмичности чётко соответствует только расположению сейсмолинеамента III (рис. 8а). При этом сейсмолинеаменты III и V расположены достаточно близко, поэтому сложно разделить сейсмические события, относящиеся к каждому из них. Максимум нормального распределения количества очагов землетрясений вдоль профиля С–Д соответствует расположению сейсмолинеамента VIII, а также выделяются локальные сгущения очагов в районе сейсмолинеаментов VI и IX (рис. 8б).

Расположение сейсмолинеаментов согласно модели ОСР-2016 (рис. 9) в меньшей степени соответствует распределению сейсмичности по сравнению с моделью ОСР-97. Максимум нормального распределения количества очагов землетрясений вдоль профиля А–В не соответствует линии пересечения ни с одной из осей сейсмолинеаментов (№ 1–4) в районе дельты – рис. 9а. Вдоль профиля С–Д наибольший максимум распределения соответствует положению только одного из трёх сейсмолинеаментов (№ 6) в районе губы Буор-Хая – рис. 9б.

Таким образом, расположение ряда сейсмолинеаментов из ЛДФ-моделей ОСР-97 и ОСР-2016 слабо соответствует распределению эпицентров событий из современных сейсмических каталогов. Особенно это касается сейсмолинеаментов с $M_{\max} = 6.0–6.5$.

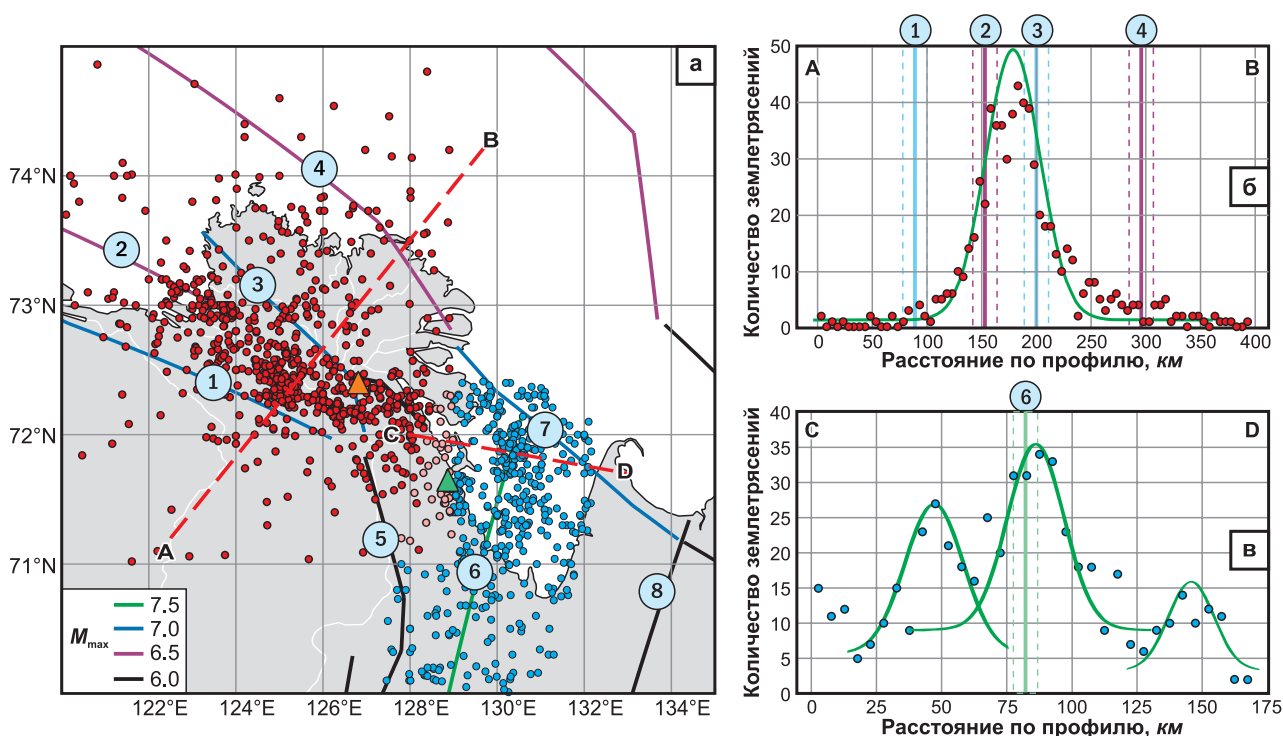


Рис. 9. Распределение эпицентров землетрясений в районе дельты р. Лены на фоне сейсмолинементов из ЛДФ-модели ОСП-2016 (а); распределение количества очагов землетрясений вдоль профилей (сечения) А–В (б) и С–D (в).

На рис. (а) изображены только очаги в коридорах, использованных для построения сечений.

Зелёный треугольник – расположение сейсмостанции «Тикси», оранжевый треугольник – расположение сейсмостанции «Столб». Красные круги – события, вошедшие в сечение А–В, синие – в С–D, розовые – в оба сечения. На рис. (б) и (в) цветными линиями обозначены пересечения с сейсмолинементами, а пунктирными линиями – границы среднего возможного разброса очагов ± 10 км от их осевой линии (см. пояснения в тексте)

Сравнение $M_{\max}$ и повторяемостей землетрясений для основных сейсмолинементов района дельты р. Лены по имеющимся данным

В табл. 5 представлены данные о $M_{\max}$ и потоке землетрясений для сейсмолинементов III и VIII согласно модели ОСП-97 (рис. 8). Эти структуры находятся вблизи выделенных в настоящей работе сейсмолинементов «Оленёк» и «Буор-Хая». Аналогично в табл. 6 приведены данные сейсмолинементов из модели ОСП-2016 (рис. 9). Согласно этой модели, сейсмолинемент № 6 в целом по расположению соответствует сейсмолинементу «Буор-Хая», в то время как сейсмолинементы 1, 2, 3 не соответствуют сейсмолинементу «Оленёк», но являются ближайшими к нему. Характеристики сейсмолинементов «Оленёк» и «Буор-Хая» были представлены в табл. 2.

Значение $M_{\max}=6.2$ для сейсмолинемента «Оленёк» ниже, чем значения $M_{\max}=6.5–7.0$ сейсмолинементов III (ОСП-97) и № 1–3 (ОСП-2016) в той же области. Значение $M_{\max}=7.6$ для сейсмолинемента «Буор-Хая» примерно соответствует

значениям $M_{\max}=7.5$ сейсмолинементов VIII (ОСП-97) и № 6 (ОСП-2016) в той же области. Повторяемости для сейсмолинементов «Оленёк» и «Буор-Хая» заметно отличаются от таковых из моделей ОСП-97 и ОСП-2016 в интервале магнитуд 6.0–6.5. Для магнитуд ≥ 7.0 различия менее выражены.

Выявленные отличия объясняются тем, что в моделях ОСП-97 и ОСП-2016 повторяемость землетрясений на конкретном сейсмолинементе вычисляется из общерегионального потока землетрясений данной магнитуды и его длины, нормированной на суммарную длину всех линементов этой же магнитуды в регионе. Подобный метод расчёта позволяет получать оценки повторяемости при недостатке данных о землетрясениях, однако не учитывает локальные изменения в потоке землетрясений на конкретном разломе или его участке. Поэтому важно учитывать также сейсмичность средней и малой магнитуды, полученную в рамках локального мониторинга.

Таблица 5. Поток землетрясений вдоль основных сейсмолинеamentов в районе дельты р. Лены согласно модели ОСР-97

№	$M_{\max}$	$N (M=6.0)$	$N (M=6.5)$	$N (M=7.0)$	$N (M=7.5)$
III	7.0	$6.467 \cdot 10^{-3}$	$2.317 \cdot 10^{-3}$	$5.310 \cdot 10^{-4}$	—
VIII	7.5	$1.078 \cdot 10^{-2}$	$3.864 \cdot 10^{-3}$	$8.850 \cdot 10^{-4}$	$2.210 \cdot 10^{-4}$

Таблица 6. Поток землетрясений вдоль основных сейсмолинеamentов в районе дельты р. Лены согласно модели ОСР-2016

№	$M_{\max}$	$N (M=6.0)$	$N (M=6.5)$	$N (M=7.0)$	$N (M=7.5)$
1	7.0	$1.981 \cdot 10^{-3}$	$1.199 \cdot 10^{-3}$	$5.957 \cdot 10^{-4}$	—
2	6.5	$1.815 \cdot 10^{-3}$	$1.099 \cdot 10^{-4}$	—	—
3	7.0	$1.457 \cdot 10^{-3}$	$8.823 \cdot 10^{-4}$	$4.383 \cdot 10^{-4}$	—
6	7.5	$2.495 \cdot 10^{-3}$	$1.511 \cdot 10^{-3}$	$7.506 \cdot 10^{-4}$	$8.901 \cdot 10^{-4}$

Сейсмогенный слой и известные локальные скоростные модели

Подавляющее большинство землетрясений в области исследования происходят на глубине 5–30 км (рис. 5, 6) со средней глубиной около 12.5 км. В каталоге ISC есть единичные события на глубинах свыше 30 км (рис. 5). Подобные глубинные события были зафиксированы в районе бухты Буор-Хая в эксперименте с донными станциями [Ковачев и др., 1994], и в рамках локального мониторинга в дельте [Аветисов, 2000], но не подтверждаются данными локального мониторинга проекта СИОЛА [Geissler et al., 2017; Plötz et al., 2025]. Таким образом, сейсмичность ниже границы Мохоровичича не может считаться достоверно установленной.

Полученная в настоящем исследовании скоростная модель поперечных волн (V_s), рассчитанная методом инверсии приёмных функций (rftn96), показывает выраженные скачки скорости на глубинах ~15, 30 и 40 км (рис. 10). Эти значения хорошо соответствуют известным глубинам границ, описанных ранее для Усть-Ленского прогиба. Так, по данным [Аветисов, Гусева, 1991], на глубине 18–20 км находится верхняя граница горизонта К1, далее на 29–31 км — переход к аномальной мантии, а на 39–40 км — граница с нормальной мантией. Профиль глубинного зондирования «ШПАТ» [Атлас ..., 2013] демонстрирует границы на схожих глубинах: отражающие горизонты на 17 и 28 км, а также границу Мохоровичича на ~46 км. При этом обе модели, полученные при помощи приёмных функций (программой rftn96 и модель по методу Л.П. Винника [Vinnik et al., 2017]), занижают поперечные скорости по сравнению с данными профиля «ШПАТ». Разница в скоростях и глубинах, определённых методом, осно-

ванным на обменных волнах от землетрясений, и методом ГСЗ, хорошо известна [Аветисов, Гусева, 1991]. В нашем случае во время инверсии на всех глубинах фиксировался показатель $V_p/V_s=1.78$ из начальной скоростной модели. При этом профиль «ШПАТ» указывает на аномально низкий $V_p/V_s=1.65$ в нижней коре. Расчёт скорости продольных волн при обычном показателе $V_p/V_s=1.78$ даёт скорость $V_p=7.4$ км/с на глубинах 40–48 км, близкую к $V_p=7.5$ км/с, указанную в профиле ГСЗ.

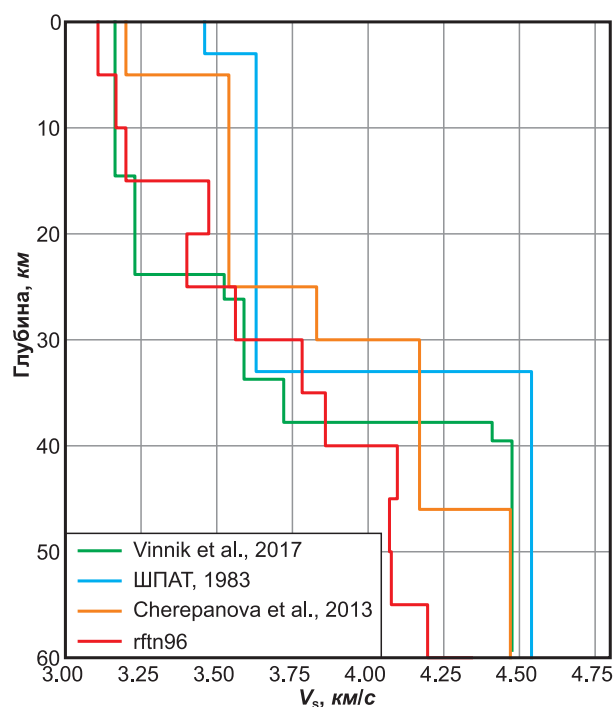


Рис. 10. Сравнение полученной в данном исследовании скоростной модели (rftn96) поперечных волн V_s с существующими скоростными моделями района дельты р. Лены

Сравнение с другими моделями (CRUST 1.0 [Laske et al., 2013] и SibCrust [Cherepanova et al., 2013]) также показывает хорошее соответствие глубин: 15 км для верхней границы средней коры, 30 км — переход к нижней коре и 40–42 км — граница мантии. Все указанные модели (рис. 10) в целом подтверждают наличие выраженной геологической границы на глубине 30 км, соответствующей основанию сейсмогенного слоя в данном районе.

Выводы

По современным сейсмологическим данным были уточнены параметры сейсмического режима района дельты р. Лены. Выделены две основные сейсмоактивные линейные зоны — сейсмолинеamentы «Оленёк» и «Буор-Хая», установлены их характеристики по глубине очагов, типу напряжённого состояния, максимальной магнитуде и повторяемости землетрясений. Сопоставление распределения сейсмичности с моделями зон возникновения очагов землетрясений для карт ОСР-97 и ОСР-2016 показало необходимость корректировки существующих моделей для более точного учёта локальных особенностей региона. Полученные результаты могут быть использованы для детального сейсмического районирования района дельты р. Лены.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 23-17-00125 (создание и анализ Сводного каталога, расчёт параметров выделенных сейсмолинеamentов) и Государственного задания № FMWE-2024-0026 (сравнительный анализ с другими данными по региону).

Литература

- Аветисов Г.П. Ещё раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 3. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. — С. 104–114. — EDN: VDUKWN
- Аветисов Г.П., Гусева Ю.В. Глубинное строение района дельты Лены по сейсмологическим данным // Советская геология. — 1991. — № 4. — С. 73–81. — EDN: TZPOZV
- Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. Электронное издание. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. — 94 с. — URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/>
- База данных «Землетрясения России» [сайт]. — [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024]. — URL: <http://eqru.gsr.ru/> (дата обращения 12.12.2024).
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. — 2017. — Т. 8, № 4. — С. 711–736. — DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0314. — EDN: ZWRGNL
- Гаврилов В.П. Пояса нефтегазоаккумуляции Арктики, перспективы их освоения // Геология нефти и газа. — 2013. — № 1. — С. 12–22. — EDN: PVGJIZ
- Драчев С.С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. — 2000. — № 6. — С. 43–58. — EDN: DUJMXF
- Землетрясения в СССР в 1976 году / Отв. ред. И.В. Горбунова, Н.В. Кондорская, Н.В. Шебакин. — М.: Наука, 1980. — 191 с.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. — М.: ГЕОС, 2000. — 226 с. — EDN: TIOCP
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Мельникова В.И., Середкина А.И., Маккей К.Д. и др. Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики / Отв. ред. Л.П. Имаева, И.И. Колодезников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. — 136 с.
- Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сейсмотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // Геотектоника. — 2019. — № 5. — С. 62–77. — DOI: 10.31857/S0016-853X2019562-77. — EDN: XDTZFH
- Ковачев С.А., Кузин И.П., Соловьев С.Л. Кратковременное изучение микросейсмичности губы Буор-Хая, море Лаптевых, с помощью донных сейсмографов // Физика Земли. — 1994. — № 7–8. — С. 65–76.
- Крылов А.А., Лобковский Л.И., Ковачев С.А. и др. Геодинамические режимы в Лаптевоморском регионе согласно новейшим сейсмологическим данным // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2023. — Т. 513, № 2. — С. 224–230. — DOI: 10.31857/S2686739723601783. — EDN: ZPSWAN
- Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П., Файн И.В., Яковенко О.И. Цунамиопасность арктического побережья России. Часть 1. Каталог вероятных цунамигенных землетрясений // Геориск. — 2019. — Т. 13, № 2. — С. 18–32. — DOI: 10.25296/1997-8669-2019-13-2-18-32. — EDN: XDQFWN
- Материалы по сейсмичности Сибири, март–апрель 1989 г. / Отв. ред. С.И. Голенецкий. — Иркутск: АН СССР Сибирское отделение, Дальневосточное отделение, 1991. — С. 104–105.
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. — М.: МГК АН СССР, 1965. — 11 с.
- Парфенов Л.М., Козьмин Б.М., Гриненко О.В. и др. Геодинамика сейсмического пояса Черского // Вулканология и сейсмология. — 1988. — № 1. — С. 75–89.

- Скворцов М.Б., Дзюбло А.Д., Грушевская О.В., Кравченко М.Н., Уварова И.В. Качественная и количественная оценка перспектив нефтегазоносности шельфа моря Лаптевых // Геология нефти и газа. — 2020. — № 1. — С. 5–19. — DOI: 10.31087/0016-7894-2020-1-5-19. — EDN: WOELJ
- СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. — М.: Минстрой России, 2018. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571>
- Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Пояснительная записка к комплекту карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. — 2016. — № 7. — С. 49–121. — EDN: WJDTLZ
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населённых пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. — М.: ОИФЗ РАН, 1999. — 57 с.
- Фомин А.Н., Меленевский В.Н. Катагенез органического вещества и перспективы нефтегазоносности протерозойских, палеозойских и мезозойских отложений Лено-Анабарского междуречья // Геология нефти и газа. — 2023. — № 6. — С. 31–39. — DOI: 10.47148/0016-7894-2023-6-31-39. — EDN: WLKXFU
- Шибяев С.В., Козьмин Б.М., Петров А.Ф., Тимиршин К.В. и др. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Якутия // Землетрясения России в 2016 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. — С. 54–59. — EDN: UYSSLG
- Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log_{10} N = a - bm$ and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research. — 1965. — V. 43. — P. 237–239.
- Are F., Reimnitz E. An overview of the Lena River delta setting: geology, tectonics, geomorphology, and hydrology // Journal of Coastal Research. — 2000. — V. 16, N 4. — P. 1083–1093.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // Eos. — 2018. — V. 99. — DOI: 10.1029/2018EO104623
- Cherepanova Yu., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia Z. Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data // Tectonophysics. — 2013. — V. 609. — P. 154–183. — DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.004
- Cook D.B., Fujita K., McMullen C.A. Present-day plate interaction in Northeast Asia: North American, Eurasian and Okhotsk plates // Journal of Geodynamics. — 1986. — V. 6. — P. 33–51. — DOI: 10.1016/0264-3707(86)90031-1
- Drachev S.S., Shkarubo S.I. Tectonics of the Laptev Shelf, Siberian Arctic // Geological Society, London, Special Publications. — 2017. — V. 460, N 1. — P. 263–283. — DOI: 10.1144/sp460.15
- Fujita K., Koz'min B.M., Mackey K.G. et al. Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan district, Russia // Stephan Mueller Special Publication Series. — 2009. — V. 4. — P. 117–145. — DOI: 10.5194/smsps-4-117-2009
- Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1974. — V. 64, N 5. — P. 1363–1367. — DOI: 10.1785/BSSA0640051363
- Geissler W.H., Baranov B., Shibaev S., Haberland C. et al. Seismicity and neotectonics of the Laptev Sea Region / Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016. — Bremerhaven: Alfred-Wegener-Institute, 2017. — V. 709. — P. 103–107. — DOI: 10.2312/BzPM_0709_2017
- Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project // Global CMT Web Page [Site]. — URL: <http://www.globalcmt.org> (дата обращения 05.10.2022).
- Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A. Integrated earthquake catalog of the eastern sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. — 2022. — V. 12, N 10. — A. 5010. — DOI: 10.3390/app12105010
- Herrmann R.B. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research // Seismological Research Letters. — 2013. — V. 84, N 6. — P. 1081–1088. — DOI: 10.1785/0220110096
- ISC-GEM. Global Instrumental Earthquake Catalogue // International Seismological Centre [Site]. — URL: <http://www.isc.ac.uk/iscgem/> (дата обращения: 11.10.2024).
- Kagan Y.Y. Seismic moment distribution revisited: I. Statistical results // Geophysical Journal International. — 2002. — V. 148, N 3. — P. 520–541. — DOI: 10.1046/j.1365-246X.2002.01594.x
- Kagan Y.Y. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: Regional comparison // Journal of Geophysical Research. — 1997. — V. 102, B2. — P. 2835–2852. — DOI: 10.1029/96JB03386
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophysical Journal International. — 1995. — V. 122, N 1. — P. 108–124. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x
- Kijko A. Estimation of the maximum earthquake magnitude $M_{\max}$ // Pure and Applied Geophysics. — 2004. — V. 161, N 8. — P. 1655–1681. — DOI: 10.1007/s00024-004-2531-4
- Kijko A., Singh M. Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation // Acta Geophysica. — 2011. — V. 59, N 4. — P. 674–700. — DOI: 10.2478/s11600-011-0012-6

- Krylov A.A., Egorov I.V., Kovachev S.A. et al. Ocean-bottom seismographs based on broadband MET sensors: Architecture and deployment case study in the Arctic // *Sensors*. — 2021. — V. 21. — A. 3979. — DOI: 10.3390/s21123979
- Krylov A.A., Novikov M.A., Kovachev S.A. et al. Features of seismological observations in the Arctic seas // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — V. 11. — A. 2221. — DOI: 10.3390/jmse11122221
- Kulyandina A.S., Tuktarov R.M., Shibaev S.V. Regional seismological observation network in Yakutia // *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*. — 2024. — V. 58, N I. — P. 29–37. — DOI: 10.31905/sblskmjs
- Langston C.A. Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic *P* and *S* waves // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1977. — V. 67, N 3. — P. 713–724. — DOI: 10.1785/BSSA0670030713
- Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. Update on CRUST1.0 – A 1-degree global model of Earth's crust // *Geophysical Research Abstracts*. — 2013. — V. 15. — Abstract EGU2013-2658.
- Ligorria J.P., Ammon C.J. Iterative deconvolution and receiver-function estimation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1999. — V. 89, N 5. — P. 1395–1400. — DOI: 10.1785/BSSA0890051395
- Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E. et al. Seismicity map of Eastern Russia, 1960–2010 // *Seismological Research Letters*. — 2010. — V. 81, N 5. — P. 761–768. — DOI: 10.1785/gssrl.81.5.761
- Pisarenko V.F., Lyubushin A.A., Lysenko V.B., Golubeva T.V. Statistical estimation of seismic hazard parameters: Maximum possible magnitude and related parameters // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1996. — V. 86, N 3. — P. 691–700. — DOI: 10.1785/bssa0860030691
- Pisarenko V.F., Rodkin M.V. Approaches to solving the maximum possible earthquake magnitude ($M_{\max}$) problem // *Surveys in Geophysics*. — 2022. — V. 43, N 2. — P. 561–595. — DOI: 10.1007/s10712-021-09673-1
- Plötz A., Krylov A.A., Geissler W.H., Shibaev S. et al. Local seismicity along the Olenek sector of the Lena-Anabar suture SW Laptev sea rift system – Rift-related or reactivation of the former passive margin of the Siberian craton? // *Tectonophysics*. — 2025. — V. 901. — A. 230676. — DOI: 10.1016/j.tecto.2025.230676
- Sornette D., Sornette A. General theory of the modified Gutenberg-Richter law for large seismic moments // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1999. — V. 89, N 4. — P. 1121–1130. — DOI: 10.1785/bssa0890041121
- Tate R.F. Unbiased estimation: Functions of location and scale parameters // *The Annals of Mathematical Statistics*. — 1959. — V. 30, N 2. — P. 341–366. — DOI: 10.1214/aoms/1177706256
- Vavrychuk V. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms // *Geophysical Journal International*. — 2014. — V. 199, Iss. 1. — P. 69–77. — DOI: 10.1093/gji/ggu224
- Vinnik L., Oreshin S., Makeyeva L., Dündar S. Fluid-filled porosity of magmatic underplates from joint inversion of *P* and *S* receiver functions // *Geophysical Journal International*. — 2017. — V. 209, Iss. 2. — P. 961–968. — DOI: 10.1093/gji/ggx067
- Vinnik L.P., Reigber C., Aleshin I.M., Kosarev G.L., Kaban M.K., Oreshin S.I., Roecker S.W. Receiver function tomography of the central Tien Shan // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2004. — V. 225, N 1–2. — P. 131–146.
- Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 1992. — V. 97, Iss. B8. — P. 11703–11728. — DOI: 10.1029/92JB00132

Сведения об авторах

Новиков Михаил Андреевич, мл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), г. Москва, Россия; мл. науч. сотр. Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет «Сириус»), пгт Сириус, Краснодарский край, Россия. E-mail: mihail.novikow@mail.ru

Крылов Артём Александрович, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), г. Москва, Россия; ст. науч. сотр. Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет «Сириус»), пгт Сириус, Краснодарский край, Россия. E-mail: artyomkrlyv@ocean.ru

Refinement of seismic regime parameters for the Lena River delta region

© 2025 M.A. Novikov^{1,2}, A.A. Krylov^{1,2}

¹IO RAS, Moscow, Russia; ²Sirius University, settlement Sirius, Krasnodar region, Russia

Received June 13, 2025

Abstract Remote Arctic seismically active areas, including the Lena Delta region, need more precise seismic-regime characterization and hazard zoning. Modern seismological data made it possible to identify two main seismolineaments in the Lena Delta and to determine for each: recurrence-plot parameters, seismogenic layer depth in the crust, maximum magnitude, principal stress-axis orientation, and generalized focal-mechanism parameters. Applying a Bayesian approach yielded robust estimates of the maximum magnitude despite the limited number of strong events. We built a one-dimensional crustal velocity model using the receiver-function method, which revealed zones of probable lithological boundaries. A comparative analysis with the corresponding seismolineaments from the Russian general seismic hazard zoning models highlighted the need to adjust existing models for better accounting of local features. The identified seismolineaments show distinct differences in recurrence rates and maximum magnitudes, indicating varied tectonic regimes within the study area. The results can be used for detailed seismic zoning of the Lena Delta and provide a foundation for improving seismic risk assessments and informing infrastructure planning in the Arctic.

Keywords Arctic, Lena River delta, seismic regime, earthquakes, seismic hazard, general seismic zoning, seismolineament.

For citation Novikov, M.A., & Krylov, A.A. (2025). [Refinement of seismic regime parameters for the Lena River delta region]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(3), 31–48. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.3.03>. EDN: TDNJGM

References

- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\lg N = a - bm$ and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research*, 43, 237–239.
- Are, F., & Reimnitz, E. (2000). An overview of the Lena River delta setting: Geology, tectonics, geomorphology, and hydrology. *Journal of Coastal Research*, 16(4), 1083–1093.
- Atlas “Opornye geologo-geofizicheskie profili Rossii”. *Glubinnyye seismicheskie razrezy ...* (2013). [Atlas “Reference geological-geophysical profiles of Russia”. Deep seismic sections ...]. St. Petersburg, Russia: VSEGEI Publ., 94 p. (In Russ.). Retrieved from <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/>
- Avetisov, G.P. (2000). [Once again on the earthquakes in the Laptev Sea]. In *Geologo-geofizicheskie kharakteristiki litosfery Arkticheskogo regiona. Vyp. 3* [Geological and geophysical characteristics of the Arctic region lithosphere. Iss. 3] (pp. 104–114). St. Petersburg, Russia: VNIIOkeanogeologiya Publ. (In Russ.). EDN: VDUKWN
- Avetisov, G.P., & Guseva, Yu.V. (1991). [Deep structure of the Lena Delta region from seismological data]. *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology], 4, 73–81. (In Russ.). EDN: TZPOZV
- Bachmanov, D.M., Kozhurin, A.I., & Trifonov, V.G. (2017). [The active faults of Eurasia database]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 8(4), 711–736. (In Russ.). DOI: [10.5800/GT-2017-8-4-0314](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314). EDN: ZWRGNL
- Baza dannyykh “Zemletryaseniia Rossii” [Database “Earthquakes of Russia”] (2024). Retrieved from <http://eqru.gsr.ru/> (Accessed December 12, 2024). (In Russ.).
- Blewitt, G., Hammond, W.C., & Kreemer, C. (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 99. DOI: [10.1029/2018EO104623](https://doi.org/10.1029/2018EO104623)
- Cherepanova, Yu., Artemieva, I.M., Thybo, H., & Chernia, Z. (2013). Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data. *Tectonophysics*, 609, 154–183. DOI: [10.1016/j.tecto.2013.05.004](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.004)
- Cook, D.B., Fujita, K., McMullen, C.A. (1986). Present-day plate interaction in northeast Asia: North American, Eurasian and Okhotsk plates. *Journal of Geodynamics*, 6, 33–51. DOI: [10.1016/0264-3707\(86\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0264-3707(86)90031-1)
- Drachev, S.S. (2000). [Tectonics of the Laptev Sea rift system]. *Geotektonika* [Geotectonics], 6, 43–58. (In Russ.). EDN: DUJMXF
- Drachev, S.S., & Shkarubo, S.I. (2017). Tectonics of the Laptev Shelf, Siberian Arctic. *Geological Society, London, Special Publications*, 460(1), 263–283. DOI: [10.1144/SP460.15](https://doi.org/10.1144/SP460.15)
- Fomin, A.N., & Melenevskii, V.N. (2023). [Catagenesis of organic matter and petroleum potential of Proterozoic,

- Palaeozoic, and Mesozoic formations of Lena-Anabarsky interfluvium]. *Geologiya nefi i gaza* [Geology of Oil and Gas], 6, 31-39. (In Russ.). DOI: 10.47148/0016-7894-2023-6-31-39. EDN: WLKXFU
- Fujita, K., Koz'min, B.M., Mackey, K.G. et al. (2009). Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan district, Russia. In *Stephan Mueller Special Publication Series*, 4, 117-145. DOI: 10.5194/smssps-4-117-2009
- Gardner, J.K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363-1367. DOI: 10.1785/BSSA0640051363
- Gavrilov, V.P. (2013). [Arctic oil and gas accumulation belts: Prospects of their development]. *Geologiya nefi i gaza* [Geology of Oil and Gas], 1, 12-22. (In Russ.). EDN: PVGJIZ
- Geissler, W.H., Baranov, B., Shibaev, S., Haberland, C. et al. (2017). Seismicity and neotectonics of the Laptev Sea Region. In *Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016. Vol. 709* (pp. 103-107). Bremerhaven: Alfred-Wegener-Institute. DOI: 10.2312/BzPM_0709_2017
- Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project. (2022). *Global CMT Web Page*. Retrieved from <http://www.globalcmt.org> (Accessed October 5, 2022).
- Golenetsky, S.I. (Ed.). (1991). *Materialy po seismichnosti Sibiri, mart-aprel' 1989 g.* [Materials on the seismicity of Siberia, March-April 1989] (pp. 104-105). Irkutsk, Russia: Publishing House of the AS USSR, Siberian Branch, Far Eastern Branch. (In Russ.).
- Gorbunova, I.V., Kondorskaia, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1980). *Zemletryaseniia v SSSR v 1976 godu* [Earthquakes in the USSR in 1976]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 191 p. (In Russ.).
- Gvishiani, A.D., Vorobieva, I.A., Shebalin, P.N., Dzeboev, B.A., Dzeranov, B.V., & Skorkina, A.A. (2022). Integrated earthquake catalog of the eastern sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 12(10), 5010. DOI: 10.3390/app12105010
- Herrmann, R.B. (2013). Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84(6), 1081-1088. DOI: 10.1785/0220110096
- Imaev, V.S., Imaeva, L.P., & Koz'min, B.M. (2000). *Seismotektonika Iakutii* [Seismotectonics of Yakutia]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 226 p. (In Russ.). EDN: TIOCP
- Imaev, V.S., Imaeva, L.P., Koz'min, B.M., Mel'nikova, V.I., Seredkina, A.I., Mackey, K.D. et al. (2017). *Seismotektonika severo-vostochnogo sektora Rossiiskoi Arktiki. Otv. red. L.P. Imaeva, I.I. Kolodeznikov* [Seismotectonics of the north-eastern sector of the Russian Arctic. Eds. L.P. Imaeva, I.I. Kolodeznikov]. Novosibirsk, Russia: SB RAS Publ., 136 p. (In Russ.).
- Imaeva, L.P., Gusev, G.S., & Imaev, V.S. (2019). [Dynamics of the relief and seismotectonic activity of modern structures in the Lena River delta]. *Geotektonika* [Geotectonics], 53(5), 62-77. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0016-853X2019562-77. EDN: XDTZFH
- ISC-GEM. Global Instrumental Earthquake Catalogue. (2024). Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscgem/> (Accessed October 11, 2024).
- Kagan, Y.Y. (1997). Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: Regional comparison. *Journal of Geophysical Research*, 102(B2), 2835-2852. DOI: 10.1029/96JB03386
- Kagan, Y.Y. (2002). Seismic moment distribution revisited: I. Statistical results. *Geophysical Journal International*, 148(3), 520-541. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2002.01594.x
- Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R., & Buland, R. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times. *Geophysical Journal International*, 122(1), 108-124. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x
- Kijko, A. (2004). Estimation of the maximum earthquake magnitude M_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, 161(8), 1655-1681. DOI: 10.1007/s00024-004-2531-4
- Kijko, A., & Singh, M. (2011). Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation. *Acta Geophysica*, 59(4), 674-700. DOI: 10.2478/s11600-011-0012-6
- Kovachev, S.A., Kuzin, I.P., & Solov'ev, S.L. (1994). [Short-term study of microseismicity in Buor-Khaya Bay, Laptev Sea, using bottom seismographs]. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], (7-8), 65-76. (In Russ.).
- Krylov, A.A., Egorov, I.V., Kovachev, S.A. et al. (2021). Ocean-bottom seismographs based on broadband MET sensors: Architecture and deployment case study in the Arctic. *Sensors*, 21, 3979. DOI: 10.3390/s21123979
- Krylov, A.A., Lobkovsky, L.I., Kovachev, S.A., Baranov, B.V., Rukavishnikova, D.D., Tsukanov, N.V., Dozорова, K.A., & Semiletov, I.P. (2023). [Geodynamic regimes in the Laptev Sea region according to the latest seismological data]. *Doklady Rossiiskoi Akademii Nauk: Nauki o Zemle* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences], 513(2), 224-230. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2686739723601783. EDN: ZPSWAH
- Krylov, A.A., Novikov, M.A., Kovachev, S.A. et al. (2023). Features of seismological observations in the Arctic seas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 2221. DOI: 10.3390/jmse11122221
- Kulikov, E.A., Ivashchenko, A.I., Medvedev, I.P., Fine, I.V., & Yakovenko, O.I. (2019). [Tsunami hazards for the Arctic coast of Russia. Part 1: The catalogue of probable tsunami-genic earthquakes]. *Georisk* [Georisk], 13(2), 18-32. DOI: 10.25296/1997-8669-2019-13-2-18-32. EDN: XDQFWN
- Kulyandina, A.S., Tuktarov, R.M., & Shibaev, S.V. (2024). Regional seismological observation network in Yakutia. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, 58(1), 29-37. DOI: 10.31905/sblskmj
- Langston, C.A. (1977). Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(3), 713-724. DOI: 10.1785/BSSA0670030713

- Laske, G., Masters, G., Ma, Z., & Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0 – A 1-degree global model of Earth's crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-2658.
- Ligorria, J.P., & Ammon, C.J. (1999). Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(5), 1395-1400. DOI: 10.1785/BSSA0890051395
- Mackey, K.G., Fujita, K., Hartse, H.E. et al. (2010). Seismicity map of Eastern Russia, 1960-2010. *Seismological Research Letters*, 81(5), 761-768. DOI: 10.1785/gssrl.81.5.761
- Medvedev, S.V., Sponheuer, W., & Karnik, V. (1965). *Shkala seismicheskoi intensivnosti MSK-64* [Seismic Intensity Scale MSK-64]. Moscow, Russia: Interdepartmental Geophysical Commission of the USSR Acad. Sci. Publ., 11 p. (In Russ.).
- Parfenov, L.M., Koz'min, B.M., Grinenko, O.V. et al. (1988). [Geodynamics of the Chersky seismic belt]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Volcanology and Seismology], 1, 75-89. (In Russ.).
- Pisarenko, V.F., & Rodkin, M.V. (2022). Approaches to solving the maximum possible earthquake magnitude ($M_{\max}$) problem. *Surveys in Geophysics*, 43(2), 561-595. DOI: 10.1007/s10712-021-09673-1
- Pisarenko, V.F., Lyubushin, A.A., Lysenko, V.B., & Golubeva, T.V. (1996). Statistical estimation of seismic hazard parameters: Maximum possible magnitude and related parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(3), 691-700. DOI: 10.1785/BSSA0860030691
- Plötz, A., Krylov, A.A., Geissler, W.H., Shibaev, S. et al. (2025). Local seismicity along the Olenek sector of the Lena-Anabar suture SW Laptev Sea rift system – Rift related or reactivation of the former passive margin of the Siberian craton? *Tectonophysics*, 901, 230676. DOI: 10.1016/j.tecto.2025.230676
- Shibaev, S.V., Koz'min, B.M., Petrov, A.F. et al. (2018). [Results of seismic monitoring of various regions of Russia. Yakutia]. In *Zemletryaseniia Rossii v 2016 godu* [Earthquakes in Russia in 2016] (pp. 54-59). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: UYSSLG
- Skvortsov, M.B., Dzyublo, A.D., Grushevskaya, O.V., Kravchenko, M.N., & Uvarova, I.V. (2020). [Laptev Sea shelf: Qualitative and quantitative assessment of hydrocarbon potential]. *Geologiya nefii i gaza* [Geology of Oil and Gas], 1, 5-19. (In Russ.). DOI: 10.31087/0016-7894-2020-1-5-19. EDN: WOELJ
- Sornette, D., & Sornette, A. (1999). General theory of the modified Gutenberg-Richter law for large seismic moments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(4), 1121-1130. DOI: 10.1785/BSSA0890041121
- SP 14.13330.2018. *Stroitelstvo v seismicheskikh raionach. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81** (2018). [Building in seismic regions. Updated SNiP II-7-81*]. Moscow, Russia: Ministry of Construction Publ. (In Russ.). Retrieved from <https://docs.cntd.ru/document/550565571>
- Tate, R.F. (1959). Unbiased estimation: Functions of location and scale parameters. *The Annals of Mathematical Statistics*, 30(2), 341-366. DOI: 10.1214/aoms/1177706256
- Ulomov, V.I., & Schumilina, L.C. (1999). *Komplekt kart obshchego seismicheskogo rayonirovaniya territorii Rossijskoy Federacii – OSR-97. Masshtab 1:8000000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh rayonakh* [Set of maps of general seismic zoning of the territory of Russian Federation OSR-97. Scale 1:8000000. Explanatory note and list of cities and settlements located in seismic hazardous areas]. Moscow, Russia: UIPE RAS Publ., 57 p. (In Russ.).
- Ulomov, V.I., Bogdanov, M.I., Trifonov, V.G. et al. (2016). [Explanatory note to the set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-2016]. *Inzhenernye izyskaniia* [Engineering Surveys], 7, 49-121. (In Russ.). EDN: WJDTLZ
- Vavryuk, V. (2014). Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophysical Journal International*, 199(1), 69-77. DOI: 10.1093/gji/ggu224
- Vinnik, L., Oreshin, S., Makeyeva, L., & Dündar, S. (2017). Fluid-filled porosity of magmatic underplates from joint inversion of P and S receiver functions. *Geophysical Journal International*, 209(2), 961-968. DOI: 10.1093/gji/ggx067
- Vinnik, L.P., Reigber, C., Aleshin, I.M., Kosarev, G.L., Kaban, M.K., Oreshin, S.I., & Roecker, S.W. (2004). Receiver function tomography of the central Tien Shan. *Earth and Planetary Science Letters*, 225(1-2), 131-146.
- Zoback, M.L. (1992). First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8), 11703-11728. DOI: 10.1029/92JB00132

Information about authors

Novikov Mikhail Andreevich, Junior Researcher of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (IO RAS), Moscow, Russia; Junior Researcher of the Sirius University of Science and Technology (Sirius University), settlement Sirius, Krasnodar region, Russia. E-mail: mihaile.novikow@mail.ru

Krylov Artyom Alexandrovich, PhD, Senior Researcher of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (IO RAS), Moscow, Russia; Senior Researcher of the Sirius University of Science and Technology (Sirius University), settlement Sirius, Krasnodar region, Russia. E-mail: artyomkrlv@ocean.ru