

УДК 550.348.436

Землетрясение 15 декабря 2021 г. ($M_w=4.8$) на Южном Байкале

© 2025 г. Я.Б. Радзиминович^{1,2}, А.И. Филиппова^{2,3}, Н.А. Гилёва¹,
В.И. Мельникова^{1,4}, Е.А. Кобелева¹

¹БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия; ²ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия;
³ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия; ⁴ИЗК СО РАН, г. Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 05.12.2024 г.

Аннотация. Представлены результаты детального анализа данных о землетрясении, произошедшем 15 декабря 2021 г. в пределах Мишихинской депрессии в южной впадине озера Байкал. Несмотря на умеренный энергетический уровень, землетрясение ощущалось на больших эпицентральных расстояниях и вызвало заметный отклик у населения, в связи с чем его можно считать значимым для района Южного Байкала. На основе совместной инверсии амплитудных спектров поверхностных волн и знаков первых вступлений P -волн были получены основные очаговые параметры: сейсмический момент ($M_0=1.6 \cdot 10^{16}$ Н·м), моментная магнитуда ($M_w=4.8$), глубина очага ($h=22$ км), а также механизм очага, характеризующийся рифтовым типом и представляющий собой почти чистый сброс. Возможно, что очаг землетрясения связан с локальным разломом в центральной части Мишихинской депрессии, не отражённым на современных картах активной тектоники. Макросейсмические данные о землетрясении собраны посредством онлайн-анкеты, размещённой на интернет-сайте Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Максимальная наблюдаемая интенсивность сотрясений составила V баллов по шкале MSK-64 в населённых пунктах на южном побережье оз. Байкал на расстоянии 19–23 км. Интенсивность сотрясений IV балла наблюдалась на расстоянии до 170 км. Полученные результаты представляют интерес в работах по оценке и уточнению сейсмической опасности Южного Прибайкалья.

Ключевые слова: землетрясение, механизм очага, макросейсмические данные, Южный Байкал.

Для цитирования: Радзиминович Я.Б., Филиппова А.И., Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Кобелева Е.А. Землетрясение 15 декабря 2021 г. ($M_w=4.8$) на Южном Байкале // Российский сейсмологический журнал. – 2025. – Т. 7, № 1. – С. 42–57. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.1.03>. – EDN: KLRMPL

Введение

Южная впадина оз. Байкал и, в частности, район её юго-западного замыкания характеризуется весьма высокой сейсмичностью. Сильные землетрясения, сопровождавшиеся повреждениями зданий в ближней зоне, наблюдались здесь неоднократно. К их числу можно отнести, например, историческое событие 11 апреля 1902 г. ($M=6.6$) [Новый каталог ..., 1977], а также инструментально зарегистрированные землетрясения 25 февраля 1999 г. ($M_w=5.9$) [Ruzhich et al., 2002] и 27 августа 2008 г. ($M_w=6.3$) [Radziminovich et al., 2010; Melnikova et al., 2012; 2013]. Среди менее сильных, но ощущавшихся на значительной территории событий можно упомянуть зем-

летрясения 22 мая 1912 г. ($M=5.3$) [Минчиковский, 1914; Новый каталог ..., 1977], 30 августа 1966 г. ($MLH=5.5$) [Солоненко и др., 1970] и 22 мая 1981 г. ($M_w=5.4$) [Голенецкий и др., 1984]. Вместе с тем общее количество сильных землетрясений в районе южной оконечности оз. Байкал сравнительно невелико (рис. 1). По этой причине определённый интерес представляют умеренные сейсмические события, вызвавшие, тем не менее, заметные макросейсмические проявления и в ряде случаев причинившие материальный ущерб. В качестве примеров можно привести землетрясения 11 мая 1987 г. ($M_w=5.3$) [Голенецкий, 1990], 12 мая 1991 г. ($m_b=5.1$) [Голенецкий и др., 1994], 7 февраля 1996 г. ($m_b=4.6$) [Голенецкий и др., 2002].

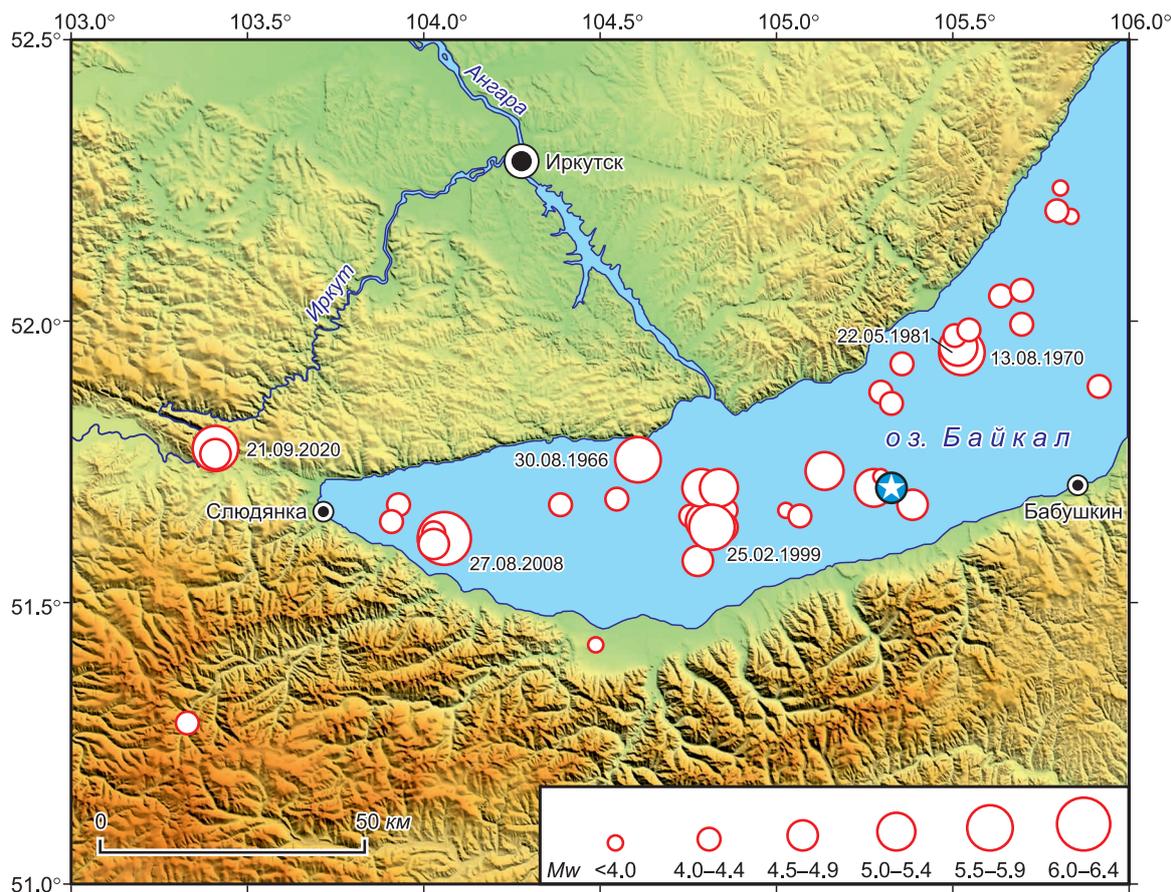


Рис. 1. Землетрясения Южного Байкала за период 1960–2021 гг. с $M_w=3.8–6.3$.

Звёздочкой в синем кружке отмечен эпицентр землетрясения 15 декабря 2021 года. Моментная магнитуда M_w приведена по прямым определениям [Global ..., 2024], по каталогу ISC-GEM [Storchak et al., 2015; Di Giacomo et al., 2015], или рассчитана из энергетического класса K_p по соотношению из работы [Середкина, Гилёва, 2016]. Даты указаны для наиболее сильных землетрясений

К числу землетрясений среднего энергетического уровня относится сейсмическое событие, произошедшее 15 декабря 2021 г. в акватории оз. Байкал вблизи его южного побережья. Несмотря на умеренную магнитуду, землетрясение ощущалось на значительных эпицентральных расстояниях и на фоне высокой сейсмической активности в течение 2021 г. вызвало заметный резонанс у населения Южного Прибайкалья. В данной статье приводится детальный анализ сеймотектонической позиции и макросейсмических проявлений этого сейсмического события.

Инструментальные данные

Эпицентр землетрясения 15 декабря 2015 г. был локализован по данным 34 региональных сейсмических станций Байкальского (24 стан-

ции), Бурятского (7) и Алтае-Саянского (3) филиалов ФИЦ ЕГС РАН, а также станций ULN (Монголия) и SAY (ИЗК СО РАН) (рис. 2). Ближайшей к эпицентру станцией является «Большое Голоустное» (BGT, 38 км), наиболее удалённой оказалась станция «Тупик» (TUR, 1020 км). Три станции расположены в пределах 50 км от эпицентра, 11 станций удалены на расстояния до 200 км. Максимальная азимутальная брешь не превышает 59° , в связи с чем условия регистрации можно охарактеризовать как достаточно благоприятные. Землетрясение предварялось двумя форшоками, первый из которых (03^h08^m , $K_p=11.3$) произошёл приблизительно за 10 часов до главного толчка, второй – в 03^h14^m . В течение 20 дней после главного события было зарегистрировано 13 слабых афтершоков в диапазоне $K_p=6.2–6.9$, при этом большая часть повторных толчков пришлась на 15 и 16 декабря 2021 года.

Землетрясение 15 декабря 2021 г. было зарегистрировано также несколькими международными сейсмологическими агентствами (табл. 1). Решения по данным разных агентств в целом неплохо согласуются между собой, при этом наименьшие ошибки определения получены в Байкальском филиале ФИЦ ЕГС РАН (BAGSR).

Тензор сейсмического момента

Тензор сейсмического момента (ТСМ) в приближении double-couple и глубина очага землетрясения 15 декабря 2021 г. рассчитывались путём совместной инверсии амплитудных спектров поверхностных волн, зарегистрированных

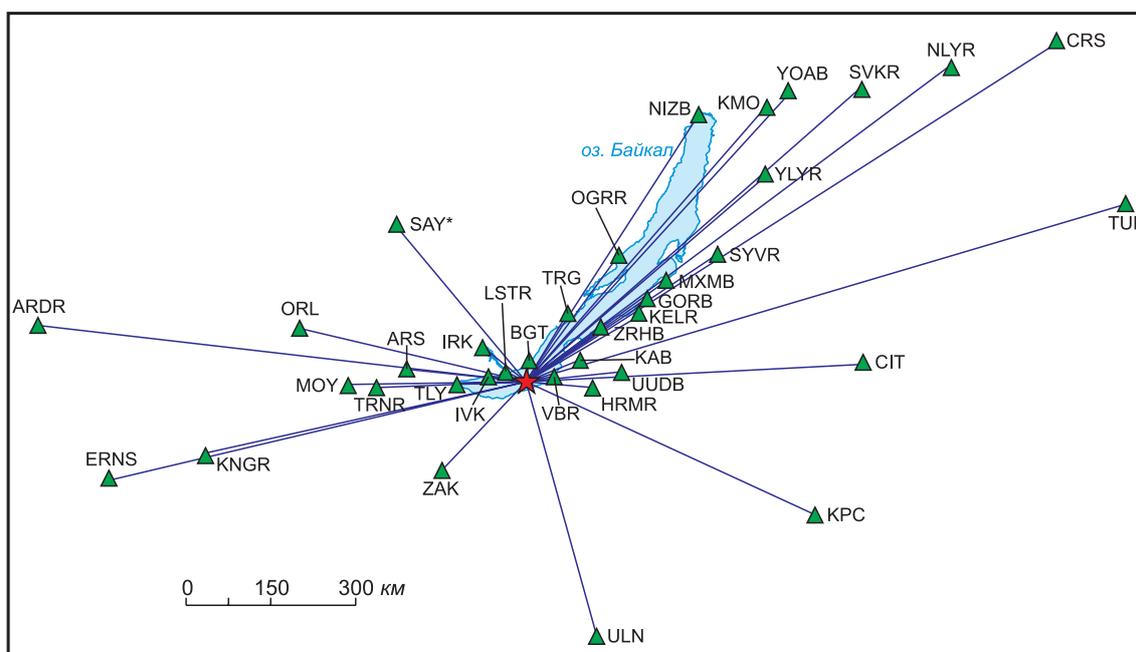


Рис. 2. Положение эпицентра землетрясения 15 декабря 2021 г. относительно региональных сейсмических станций, данные которых были использованы для определения основных параметров.

Коды сейсмических станций – международные, за исключением станции SAY, отмеченной звёздочкой

Таблица 1. Основные параметры землетрясения 15 декабря 2021 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , чч:мм:сс.с	δt_0 , с	Гипоцентр				Магнитуда
			φ , °N	λ , °E	h , км	δh , км	
BAGSR	13:44:51.8	0.14	51.71	105.33	17	2	$K_p=13.0(\pm 0.2)/28$
MOS	13:44:50.5	1.04	51.678	105.355	14		$m_b=4.9/46; M_s=4.2/7$
NEIC	13:44:51.26	1.13	51.765	105.309	10	1.8	$m_b=4.9/141$
GCMT	13:44:52.9	0.30	51.76	105.23	21.7	1.2	$M_w=4.8/83; M_s=4.9/23$
GFZ	13:44:53.56	0.26	51.667	105.257	10		$m_b=4.7/24$
IDC	13:44:49.9	0.41	51.7224	105.3822	0f		$m_b=4.3/26; M_s=3.9/25$
ISC	13:44:52.27	0.54	51.7467	105.3470	16.1	3.43	$m_b=4.8/178; M_s=4.1/33$

Примечание: BAGSR – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия (<http://seis-bykl.ru>); MOS – ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия (<http://www.ceme.gsras.ru>); NEIC – National Earthquake Information Center, США (<https://earthquake.usgs.gov>); GCMT – The Global CMT Project, Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University, США (<https://www.globalcmt.org>); GFZ – Helmholtz Centre Potsdam (Германия, <https://geofon.gfz-potsdam.de>); IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBTO), Австрия (<https://www.ctbto.org>); ISC – International Seismological Centre, Thatcham, Великобритания (<http://www.isc.ac.uk>). В графе «Магнитуда» число после косой черты – количество сейсмических станций. f – фиксированное значение глубины.

на телесеismicких расстояниях, и знаков первых вступлений P -волн, определённых по данным региональной сети seismicких станций [Bukchin, 1990; Lasserre et al., 2001]. Для выделения поверхностных волн использовались записи станций seismicких сетей II, IU и IC [Albuquerque ..., 1992; 2014; Scripps ..., 1986], расположенных на эпицентральных расстояниях $20\text{--}50^\circ$. В обработке использовались только записи с высоким отношением сигнал/шум и нормальной поляризацией поверхностных волн. В результате были отобраны записи 11 seismicких станций в диапазоне эпицентральных расстояний $26.6\text{--}45.9^\circ$ (рис. 3а). Амплитудные спектры определялись методом спектрально-временного анализа (СВАН) [Levshin et al., 1989] в диапазоне периодов, в котором волны Релея и Лява выделялись наиболее надёжно. В данном случае для большинства станций этот диапазон составил $35\text{--}75$ с. Пример СВАН-обработки поверхностных волн от исследуемого seismicкого события на станции GNI ($azm=278.96^\circ$, $\Delta=42.54^\circ$) показан на рис. 3б–г. Знаки первых вступлений P -волн определялись по записям региональных станций (рис. 2). Углы падения объёмных волн рассчитывались с использованием модели земной коры из работы [Gileva et al., 2000].

В приближении double-couple TCM может быть полностью представлен скалярным seismicким моментом и механизмом очага землетрясения (положением нодальных плоскостей или осей главных напряжений). Эти параметры, а также глубина очага определялись путём минимизации функции нормированной невязки. Данная функция показывает, насколько амплитудные спектры поверхностных волн, соответствующие решению TCM, близки к наблюдаемым спектрам, а также учитывает долю знаков первых вступлений P -волн, не удовлетворяющих полученному механизму очага [Lasserre et al., 2001]. Моментная магнитуда оценивалась по скалярному seismicкому моменту с использованием соотношения из работы [Hanks, Kanamori, 1979]. Для расчётов параметров поверхностных волн в районе очага землетрясения и под seismicкими станциями (рис. 3а), а также их затухания применялись трёхмерная глобальная модель земной коры 3SMAC [Nataf, Ricard, 1996] и одномерная модель мантии PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]. Отметим, что выбранная нами проце-

дура инверсии устойчива относительно выбора модели среды [Melnikova et al., 2013; Seredkina, Kozmin, 2017; Seredkina et al., 2020].

В результате было получено, что очаг землетрясения 15 декабря 2021 г. сформировался на глубине 22 км под влиянием субгоризонтального растяжения юго-восточной–северо-западной ориентации (рис. 4а, 4б), т.е. в рифтовом поле напряжений [Мельникова, 2008; Heidbach et al., 2018; Seredkina, Melnikova, 2018]. Скалярный seismicкий момент данного события составил $M_0=1.6\cdot 10^{16}$ Н·м, а моментная магнитуда $M_w=4.8$. Данное решение характеризуется значением функции нормированной невязки – 0.246 , которое свидетельствует о близости синтетических и наблюдаемых амплитудных спектров поверхностных волн. При этом определённый нами механизм очага согласуется со всеми знаками первых вступлений P -волн, зарегистрированных на региональных seismicких станциях (рис. 4б).

Помимо данной работы, TCM и глубина очага землетрясения 15 декабря 2021 г. были рассчитаны ранее с использованием подходов [Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012] и опубликованы в GCMТ-каталоге [Global ..., 2024]. Согласно этим определениям, глубина рассматриваемого seismicкого события составила 21.7 км, $M_0=1.91\cdot 10^{16}$ Н·м, $M_w=4.8$, что хорошо согласуется с нашими оценками. GCMТ-решение практически полностью соответствует модели double-couple (несдвигающая составляющая TCM $<1\%$) и, как и наше решение, показывает, что землетрясение произошло под влиянием рифтового поля напряжений (рис. 4в). Небольшие отличия в фокальных механизмах на рис. 4б, 4в могут быть связаны, в первую очередь, с различным частотным диапазоном используемых данных. Так, в нашем решении, помимо относительно длиннопериодных ($35\text{--}75$ с) поверхностных волн, используемых также в GCMТ-инверсии, учитывались ещё и знаки первых вступлений P -волн, зарегистрированных высокочастотной аппаратурой. Отметим, что не все эти знаки удовлетворяют GCMТ-механизму очага, хотя все несогласующиеся с решением знаки находятся вблизи одной из нодальных плоскостей (рис. 4в). Кроме того, отличия в решениях могут быть следствием довольно высокой погрешности определения компоненты M_{rr} в GCMТ-тензоре [Global ..., 2024].

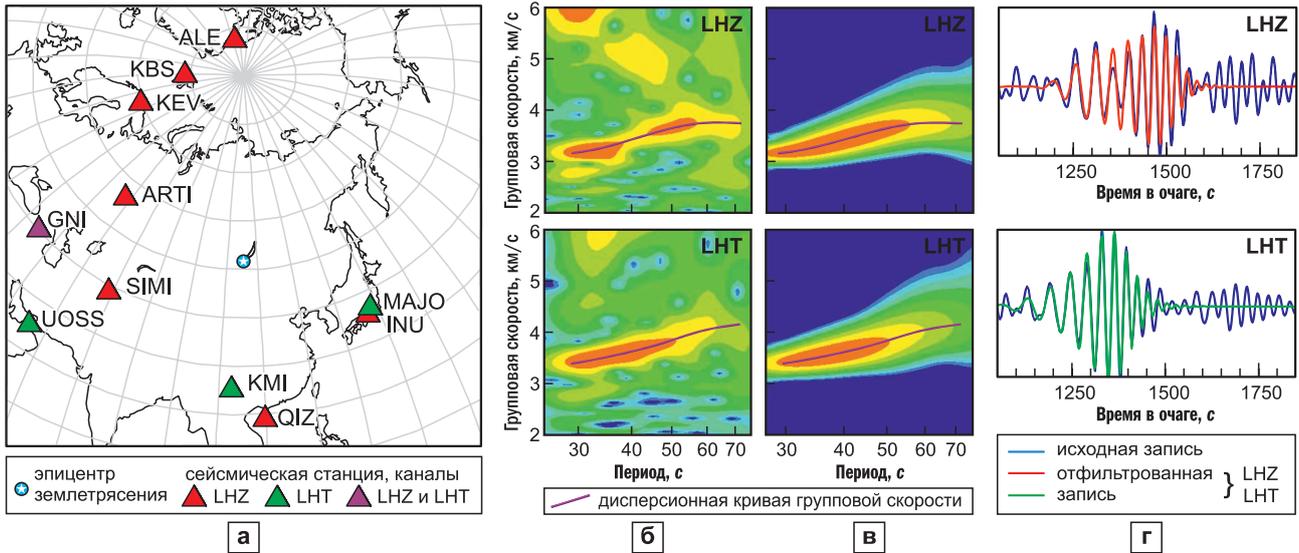


Рис. 3. Обработка записей поверхностных волн от землетрясения 15 декабря 2021 года. Сейсмические станции, на которых получены спектры поверхностных волн (а). Пример СВАН-обработки поверхностных волн на станции GNI (б–г): (б) и (в) – СВАН-диаграммы исходного и отфильтрованного сигнала соответственно, (г) – исходная запись и результат её фильтрации. Коды станций – международные. LHZ и LHT – вертикальная и трансверсальная (результат вращения горизонтальных компонент, направленных на восток и север) компоненты записи соответственно

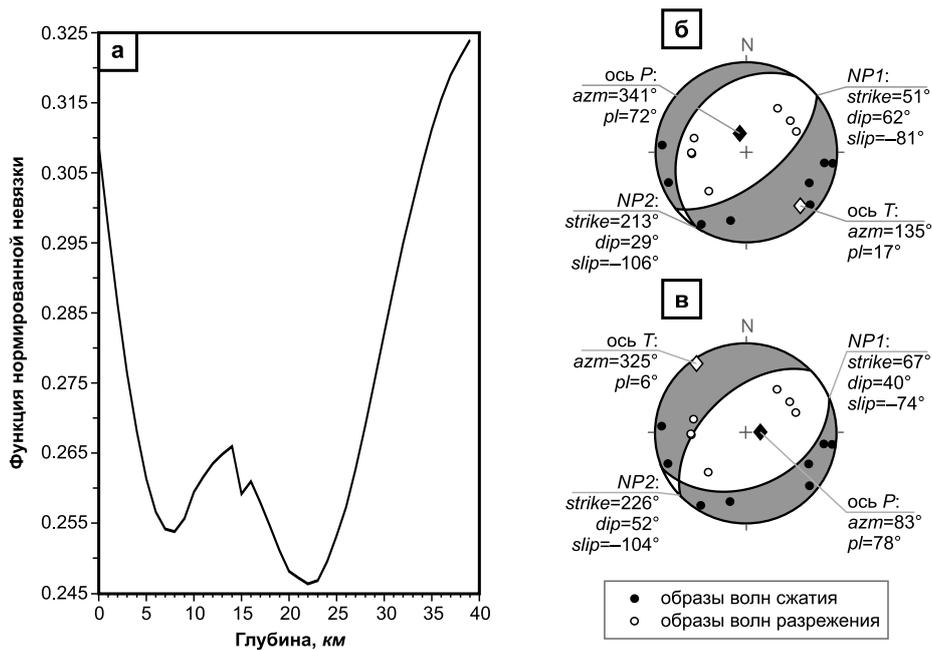


Рис. 4. Очаговые параметры землетрясения 15 декабря 2021 г., определённые в данной работе (а, б) и опубликованные в GCMT-каталоге (в) [Global ..., 2024]: а – зависимость функции нормированной невязки от глубины; б, в – диаграмма механизма очага землетрясения в проекции нижней полусферы. NP – нодальная плоскость, ось T/P – ось растяжения/сжатия, strike – направление простирания, dip – угол падения, slip – угол подвижки, azm – азимут, pl – угол погружения

Макросейсмические данные

Практически все макросейсмические сведения были собраны с помощью онлайн-анкеты,

размещённой на Интернет-сайте Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, за исключением информации, поступившей от сотрудников двух сейсмических станций – «Закаменск» (ZAK)

и «Тырган» (TRG) (рис. 2). Первые отклики очевидцев начали поступать лишь через 48 минут после возникновения землетрясения, хотя при предшествующих сейсмических событиях в Южном Прибайкалье реакция людей проявлялась почти сразу же, в течение первых минут [Radziminovich et al., 2024]. Столь значительная задержка объясняется перегрузкой сервера, вызванной массовыми обращениями пользователей к сайту БФ ФИЦ ЕГС РАН. В итоге в течение первых четырёх часов было получено всего 42 отклика. Общее количество откликов, поступивших за сутки после землетрясения, также оказалось невелико и составило 117 (рис. 5а). На фоне высокой посещаемости сайта БФ ФИЦ ЕГС РАН, обусловленной сильным Хубсугульским землетрясением 11 января 2021 г. ($M_w=6.8$) [Emanov et al., 2022], и сохранявшейся на протяжении всего 2021 г., этот результат выглядит весьма скромно. В продолжение двухнедельного периода, предшествующего землетрясению, среднее ежедневное количество визитов на сайт составляло 1862 (рис. 5б). В день землетрясения 15 декабря 2021 г. зарегистрировано 9237 визитов, в течение следующего дня (16 декабря) сайт был посещён 9388 раз. В следующие 15 суток среднее ежедневное число визитов на сайт оставалось на несколько повышенном уровне и составляло 2478.

В итоге макросейсмические данные о землетрясении 15 декабря 2021 г. были получены из 32 населённых пунктов (табл. 2). С наибольшей интенсивностью (V баллов по шкале MSK-64) землетрясение проявилось в пос. Мишиха и рабочем посёлке (рп) Танхой, расположенных на южном побережье оз. Байкал соответственно в 19 и 23 км от эпицентра (рис. 6). В этих пунктах отмечено раскачивание и скрип конструкций деревянных домов. Среди макросейсмических эффектов, наблюдавшихся внутри

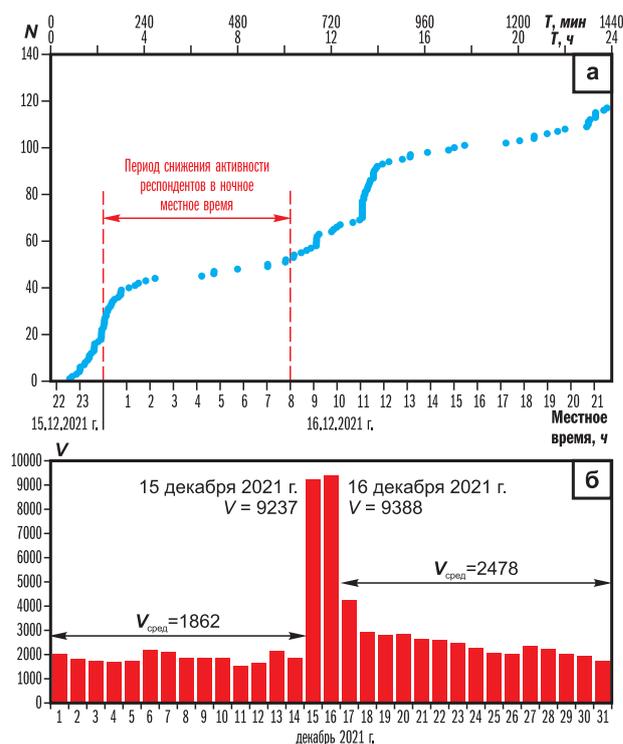


Рис. 5. Зависимость количества заполненных онлайн-анкет (N) от времени (T), прошедшего с момента возникновения землетрясения 15 декабря 2021 г. (а), и количество ежедневных посещений (V) интернет-сайта Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН в течение декабря 2021 г. (б)

помещений, очевидцы упоминают сильное раскачивание, и в ряде случаев — движение мебели, тряску предметов домашнего обихода, смещение с места незакреплённых предметов, дребезжание посуды и стёкол. Многие люди испытывали сильный испуг и покидали помещения. Отмечено беспокойство и испуг домашних животных (собаки, кошки). Во время землетрясения был слышен гул, который некоторые очевидцы сравнивают с взрывом.

Таблица 2. Интенсивность сотрясений в населённых пунктах Южного Прибайкалья при землетрясении 15 декабря 2021 г.

№	Пункт	Координаты		Δ , км	Количество сообщений	I , баллы
		φ , °N	λ , °E			
1	пос. Мишиха	51.652	105.589	19	2	V
2	рп Танхой	51.554	105.118	23	12	V
3	пос. Ключевка	51.688	105.758	30	1	IV–V
4	г. Бабушкин	51.712	105.865	37	5	IV–V
5	г. Иркутск	52.267	104.333	92	43	IV
6	с. Баклаши	52.226	104.049	105	1	IV
7	г. Слюдянка	51.659	103.706	112	2	IV
8	пос. Оронгой	51.532	107.052	120	1	IV
9	г. Ангарск	52.537	103.886	135	16	IV

№	Пункт	Координаты		Δ , км	Количество сообщений	I, баллы
		φ , °N	λ , °E			
10	с. Сотниково	51.881	107.475	148	1	IV
11	г. Кяхта	50.351	106.449	170	1	IV
12	г. Гусиноозерск	51.283	106.500	94	1	III–IV
13	рп Маркова	52.216	104.210	95	8	III–IV
14	г. Шелехов	52.214	104.100	101	3	III–IV
15	д. Рудовщина	52.609	104.698	109	1	III–IV
16	д. Грановщина	52.463	104.293	109	1	III–IV
17	г. Улан-Удэ	51.833	107.617	158	1	III–IV
18	г. Усолье-Сибирское	52.752	103.645	163	6	III–IV
19	с. Зырянск	52.265	107.779	178	1	III–IV
20	г. Закаменск	50.373	103.287	206	4	III–IV
21	с. Оса	53.387	103.877	210	1	III–IV
22	г. Петровск-Забайкальский	51.283	108.833	247	1	III–IV
23	рп Залари	53.563	102.509	280	1	III–IV
24	пос. Дзержинск	52.278	104.392	90	1	III
25	пгт Каменск	51.984	106.584	91	1	III
26	с. Шигаево	52.181	106.467	94	1	III
27	д. Тьрган	52.757	106.340	135	1	III
28	рп Тельма	52.698	103.710	156	1	III
29	рп Михайловка	52.961	103.284	196	1	III
30	г. Свирск	53.086	103.333	204	1	III
31	г. Братск	56.133	101.614	548	1	III
32	турбаза Шумак	51.966	101.867	239	1	II–III

Почти так же, с менее выраженными эффектами, землетрясение ощущалось в пос. Ключевке ($\Delta=30$ км) и г. Бабушкине ($\Delta=37$ км). В помещениях раскачивалась и дрожала мебель, дребезжала посуда, колебалась бытовая техника. Очевидцы землетрясения испытывали испуг, однако оставались на своих местах. Также было отмечено беспокойство домашних животных. Был слышен подземный гул. Интенсивность сотрясений оценивается в IV–V баллов.

Интенсивность сотрясений, соответствующая IV баллам, наблюдалась в семи населённых пунктах в диапазоне эпицентральных расстояний от 92 до 170 км, в том числе в городах Иркутске, Ангарске, Слюдянке. В Иркутске землетрясение ощущалось многими жителями практически во всех административных районах города, вне зависимости от этажности и типа здания. В помещениях замечено дрожание мебели, дребезжание посуды и стёкол в шкафах, колебание жидкости в посуде, лёгкое раскачивание висячих предметов и листьев комнатных растений. Был слышен скрип конструктивных элементов зданий. Испуг испытывали около 28% очевидцев, однако помещения практически никто не покидал. Некоторые очевидцы отметили беспокойство домашних животных.

В 12 населённых пунктах, расположенных на эпицентральных расстояниях от 94 до 280 км, интенсивность сотрясений оценивается в III–IV балла. Макросейсмические эффекты в этих пунктах были в целом менее выражены по сравнению с областью IV-балльных сотрясений, однако ощущались все же достаточно уверенно. Очевидцы характеризуют землетрясение как лёгкое дрожание, сопровождаемое поскрипыванием стен и потолков, а также дребезжанием посуды. Испуг отмечен в единичных случаях, в основном люди отреагировали на землетрясение спокойно.

Наиболее удалённым пунктом, в котором были зафиксированы ощутимые сотрясения, оказался г. Братск ($\Delta=548$ км), где интенсивность сотрясений оценивается в III балла (рис. 6). Факт ощутимости умеренного землетрясения на столь значительном эпицентральной расстоянии вызывает удивление. Можно предположить, что после серии сильных землетрясений на юге Восточной Сибири в 2020–2021 гг., уверенно ощущавшихся и в Братске, население этого города стало более внимательно относиться к сейсмическим проявлениям, в результате чего событие 15 декабря 2021 г. также не осталось незамеченным.

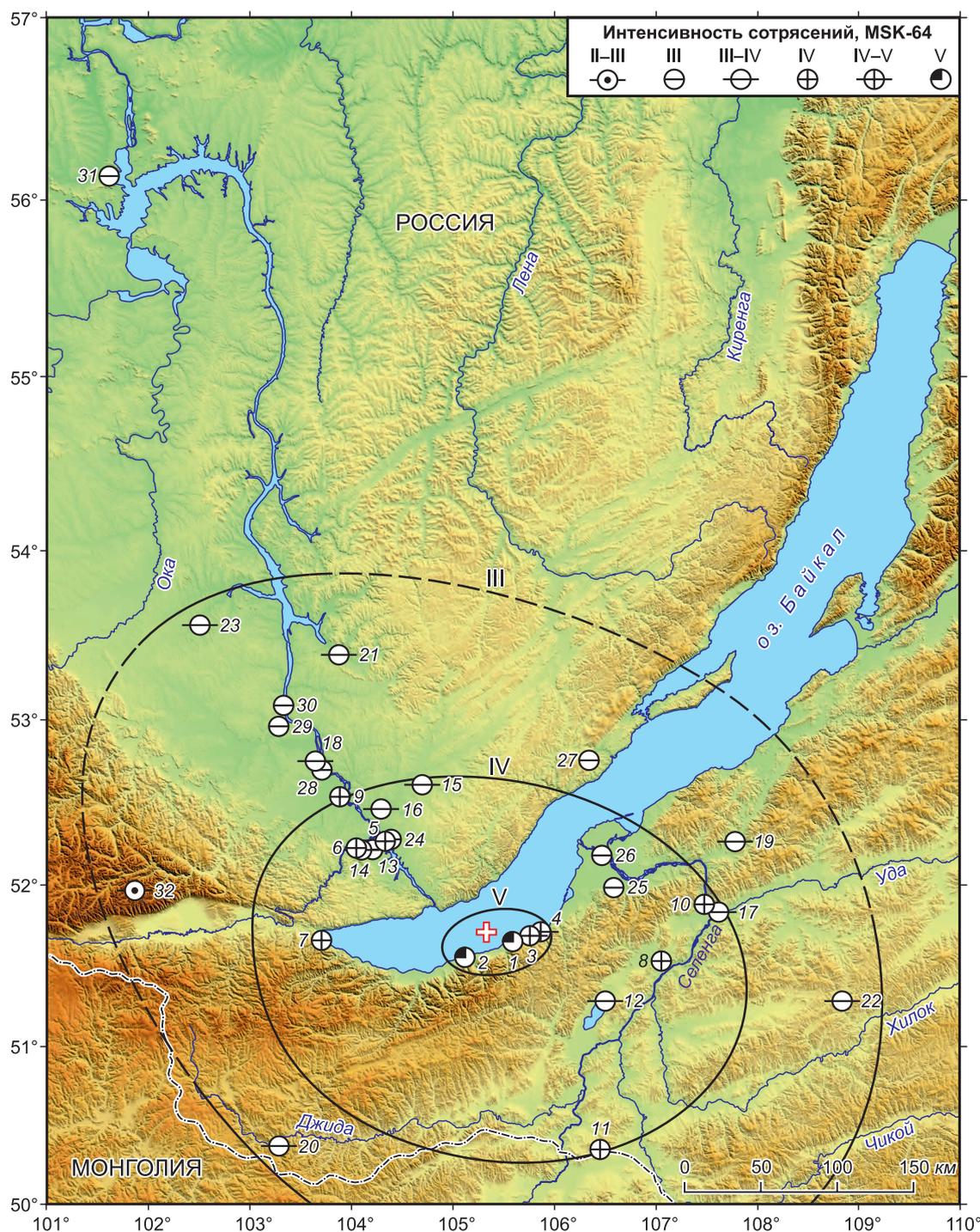


Рис. 6. Макросейсмические проявления землетрясения 15 декабря 2021 г.

Крестиком обозначен инструментальный эпицентр землетрясения. Чёрными линиями показаны изосейсты (сплошной линией – достоверные, пунктирной – предполагаемые). Римскими цифрами указана интенсивность сотрясений. Номера населённых пунктов соответствуют таковым в табл. 2

Землетрясение 15 декабря 2021 г. позволило сопоставить макросейсмические и инструментальные оценки интенсивности сотрясений. Это оказалось возможным для Иркутска и Закаменска, где расположены сейсмические станции БФ ФИЦ ЕГС РАН, позволяющие регистриро-

вать пиковые ускорения грунта (PGA), и откуда поступила макросейсмическая информация, достаточная для уверенной оценки интенсивности сотрясений. В итоге для обоих пунктов выявлены заметные расхождения в макросейсмических и инструментальных оценках. В Иркутске

макросейсмическая интенсивность сотрясений на основании свидетельств очевидцев оценивается в IV балла, в то время как интенсивность, рассчитанная по значению PGA с использованием соотношения из сейсмической шкалы ШСИ-17 [ГОСТ ..., 2017], составила 2.7 балла. Для Закаменска эти оценки составляют соответственно III–IV и 2.3 балла (рис. 7). Возможные причины расхождений макросейсмических и инструментальных оценок интенсивности при землетрясениях в Южном Прибайкалье рассматривались нами ранее [Radziminovich et al., 2023]. Вместе с тем какие-либо однозначные выводы, равно как и уточнение корреляционных связей между сильными движениями грунта и макросейсмической интенсивностью, требуют дальнейшего увеличения числа пар значений « PGA – макросейсмическая интенсивность» и, соответственно, повышения представительности выборки. Землетрясение 15 декабря 2021 г., таким образом, также внесло небольшой вклад в дальнейшее решение этого вопроса.

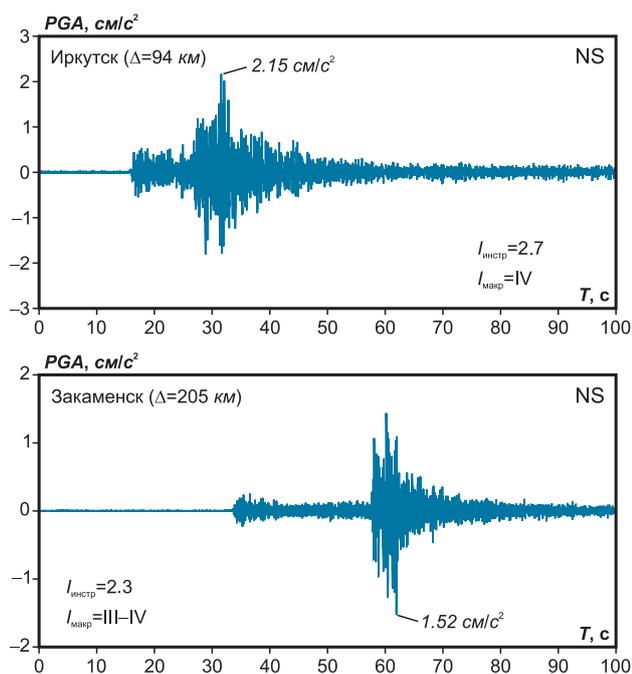


Рис. 7. Пиковые ускорения грунта (PGA), полученные на сейсмических станциях «Иркутск» (IRK) и «Закаменск» (ZAK) при землетрясении 15 декабря 2021 г. (горизонтальная компонента NS).

T – время с момента возникновения землетрясения

Обсуждение

Очаг землетрясения 15 декабря 2021 г. находился в пределах Мишихинской депрессии, считающейся одним из основных структурных эле-

ментов южной впадины оз. Байкал [Levi et al., 1995]. Кристаллический фундамент залегает на глубине около 8 км от поверхности озера [Levi et al., 1995] и перекрыт слоем отложений мощностью до 7 км [Hutchinson et al., 1992]. Несмотря на длительную историю исследований впадины оз. Байкал, данные о её активной тектонике нельзя назвать исчерпывающими. Существующие на сегодняшний день карты и схемы разломов, составленные разными авторами [Levi et al., 1997; Lunina, 2016; Zelenin et al., 2022], во многом различаются между собой. Мишихинская депрессия в этом контексте не является исключением. Согласно современным представлениям, с севера Мишихинская депрессия ограничена Обручевским разломом, с юга – разломом Черского [Levi et al., 1997; Lunina, 2016]. В то же время по данным сейсмического профилирования здесь предполагается наличие большого числа локальных разломов различного простирания [Levi et al., 1997]. Достоверных данных об их кинематике нет, и практически единственным источником информации о типах подвижек являются механизмы очагов землетрясений. В этой связи механизм очага землетрясения 15 декабря 2021 г., равно как и подобная информация о других сейсмических событиях рассматриваемого района, представляет определённый интерес.

Эпицентр землетрясения 15 декабря 2021 г. образует довольно тесную группу с событиями 11 мая 1987 г. и 19 ноября 1992 г. (рис. 8). Все три землетрясения имеют очень похожие механизмы очагов, представляющие собой практически чистые сбросы по плоскостям северо-восточного простирания. Это позволяет предположить их приуроченность к одной и той же активной структуре. Пологая плоскость в механизмах очагов даёт основания допустить, что подвижки произошли по разлому Черского, который ограничивает южный борт впадины оз. Байкал и, возможно, имеет характер листрического сброса. Нельзя исключить и то, что пологие плоскости отражают другую локальную структуру, протягивающуюся параллельно разлому Черского и скрытую под осадочной толщей Мишихинской депрессии. Наличие листрических сбросов в районе Южного Байкала ранее предполагалось, в частности, в работах [Hutchinson et al., 1992; Logatchev, Zorin, 1992]. Вместе с тем возможен и альтернативный вариант: все три события могли быть связаны со скрытым внутривпадинным разломом, круто падающим на юго-восток. На наиболее актуальной на сегодняшний день карте активных разломов Евразии [Zelenin et al., 2022],

включающей, в том числе, территорию Южного Прибайкалья, такой разлом не обозначен. Обнаружение подобной структуры весьма затруднительно за счёт её субаквального положения, а также мощной толщи отложений, однако данные о механизмах очагов землетрясений позволяют предполагать её существование.

Стоит отметить, что среднестатистические характеристики напряжённо-деформированного состояния земной коры Южного Байкала свидетельствуют о том, что Мишихинская депрессия в целом находится под влиянием режима устойчивого субгоризонтального северо-западного–юго-восточного удлинения (растяжения). При переходе к субширотному западному участку Байкальского рифта усиливается роль северо-восточного–юго-западного сжатия, способствующего появлению сдвиговых смещений в очагах землетрясений [Mel'nikova, Radziminovich, 2007], что наглядно демонстрируют фокальные механизмы отдельных землетрясений (рис. 8).

Определённый интерес представляет сравнение макросейсмического поля землетрясения 15 декабря 2021 г. с проявлениями других событий в рассматриваемом районе, близких по местоположению эпицентра и энергетическому уровню. К таковым можно отнести землетрясения 11 мая 1987 г. [Голенецкий, 1990] и 12 мая 1991 г. [Голенецкий и др., 1994]. Основные различия во всех трёх случаях касаются эффектов в ближней зоне. В 1987 г. максимальная наблюдаемая интенсивность сотрясений не превысила IV балла, причём как в ближайших к эпицентру населённых пунктах (20–30 км), так и в относительно удалённых (до 200 км) [Голенецкий, 1990]. Напротив, при землетрясении 12 мая 1991 г. в пунктах, расположенных на южном побережье оз. Байкал на практически таком же расстоянии (20–30 км) от эпицентра, макросейсмические эффекты соответствовали VI–VII баллам [Голенецкий и др., 1994]. Землетрясение 15 декабря 2021 г. ощущалось на рассто-

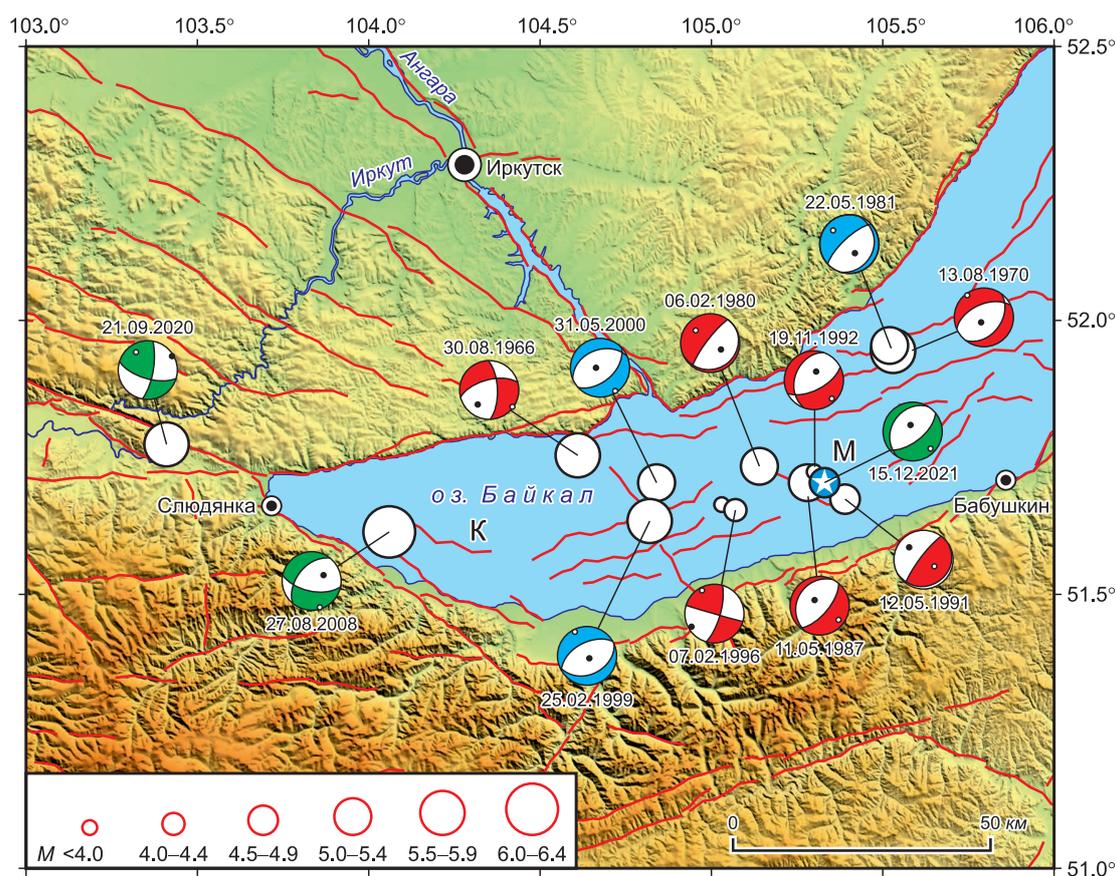


Рис. 8. Механизмы очагов умеренных и сильных землетрясений Южного Байкала.

Стереогаммы механизмов очагов приведены в проекции нижней полусферы. Зелёным цветом показаны решения, полученные по данным поверхностных волн в данной работе и в [Mel'nikova et al., 2013; Filippova et al., 2022], синим цветом – решения GСMT, красным цветом – решения по знакам первых вступлений Р-волн [Солоненко и др., 1993; Mel'nikova, Radziminovich, 1998; Голенецкий и др., 2002]. Красные линии – активные разломы по [Zelenin et al., 2022]. К – Култукская депрессия, М – Мишихинская депрессия

ниях 19–23 км от эпицентра с интенсивностью V баллов (табл. 2).

Возможно, что различия в макросейсмических проявлениях в ближней зоне сопоставимых по параметрам землетрясений обусловлены различиями в механизмах очагов (рис. 8). Если события 1987 и 2021 гг. характеризуются сбросовыми подвижками в очаге, то землетрясение 1991 г. интерпретируется как взброс. В то же время общей для всех трёх землетрясений чертой является некоторая вытянутость области III–IV-балльных сотрясений к северо-западу и юго-востоку от эпицентра, что отчасти связано, по-видимому, с более слабым затуханием сейсмических волн в пределах Сибирской платформы и Забайкалья. Кроме того, в северо-западном направлении от эпицентра, вдоль долины р. Ангары, расположены крупные города с многоэтажной застройкой, где очевидцы могли ощущать сотрясения более отчётливо.

Выводы

Полученные данные о землетрясении 15 декабря 2021 г., несмотря на его умеренный энергетический уровень, можно рассматривать как существенное дополнение к нашим знаниям о сейсмичности Южного Байкала. Механизм очага землетрясения относится к рифтовому типу и типичен для исследуемого района, однако в совокупности с аналогичными данными о других сейсмических событиях он даёт основания предполагать наличие локального внутривпадинного сбросового разлома, не обозначенного на современных картах активной тектоники. Интенсивность сотрясений при рассматриваемом событии не достигла порога, при котором возникают повреждения зданий. Тем не менее землетрясение вызвало довольно острую реакцию населения Южного Прибайкалья, особенно заметную на фоне других сильных событий 2021 года. Важно также и то, что землетрясение 15 декабря 2021 г. продемонстрировало уязвимость онлайн-анкеты перед массовым обращением к интернет-сайту со стороны пользователей, даже при умеренном сейсмическом событии. Таким образом, полученные данные представляют интерес в аспекте отладки и усовершенствования онлайн-анкеты, предназначенной для сбора макросейсмических данных.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской

Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР в 1987 году. – М.: Наука, 1990. – С. 76–85.
- Голенецкий С.И., Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Курушин Р.А., Масальский О.К. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ГС РАН, 2002. – С. 81–94. – EDN: VBAJAX
- Голенецкий С.И., Демьянович М.Г., Фомина Е.В., Чипизубов А.В., Авдеев В.А., Кочетков В.М. Землетрясения 22 и 27 мая 1981 г. на Байкале // Землетрясения в СССР в 1981 году. – М.: Наука, 1984. – С. 66–74.
- Голенецкий С.И., Ружич В.В., Дреннова Г.Ф. Землетрясение 12 (13) мая 1991 г. в районе г. Бабушкина и сейсмичность Южного Байкала // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35, № 10. – С. 27–36.
- ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 32 с.
- Мельникова В.И. Деформационные параметры земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. – 37 с. – EDN: QDZEDX
- Минчиковский М.Я. Байкальские землетрясения 1912 г. // Известия Постоянной Центральной сейсмической комиссии. Т. 6. Вып. 2. – Петроград, 1914. – С. 163–171.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
- Середкина А.И., Гилёва Н.А. Зависимость между моментной магнитудой и энергетическим классом для землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Сейсмические приборы. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 29–38. – EDN: WAZAED
- Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М. Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – С. 113–122.
- Солоненко В.П., Павлов О.В., Хилько С.Д., Хромовских В.С. Землетрясение 30 августа 1966 г. в Южном Байкале // Землетрясения в СССР в 1966 году. – М.: Наука, 1970. – С. 182–186.
- Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS. New China Digital Seismograph Network [Data set]. – International Federation of Digital Seismograph Networks, 1992. – DOI: 10.7914/SN/IC
- Albuquerque Seismological Laboratory /USGS. Global Seismograph Network (GSN – IRIS/USGS) [Data set].

- International Federation of Digital Seismograph Networks, 2014. – DOI: 10.7914/SN/IU
- Bukchin B.G.* Determination of source parameters from surface wave recording allowing for uncertainties in the properties of medium // *Izvestiia Akademii nauk SSSR: Fizika Zemli.* – 1990. – V. 25. – P. 723–728.
- Di Giacomo D., Bondár I., Storchak D.A., Engdahl E.R., Bormann P., Harris J.* ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed *MS* and *mb*, proxy *M_w*, final magnitude composition and completeness assessment // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* – 2015. – V. 239. – P. 33–47. – DOI: 10.1016/j.pepi.2014.06.005
- Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Model // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* – 1981. – V. 25, N 4. – P. 297–356. – DOI: 10.1016/0031-9201(81)90046-7
- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* – 1981. – V. 86. – P. 2825–2852. – DOI: 10.1029/JB086iB04p02825
- Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The Global CMT project 2004–2010: Centroid moment tensors for 13,017 earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* – 2012. – V. 200–201. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Emanov A.F., Emanov A.A., Chechel' nitskii V.V., Shevkunova E.V., Radziminovich Y.B., Fateev A.V., Kobeleva E.A., Gladyshev E.A., Arapov V.V., Artemova A.I., Podkorytova V.G.* The Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 ($M_w=6.7$, $ML=6.9$) and early aftershocks // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* – 2022. – V. 58, N 1. – P. 59–73. – DOI: 10.1134/S1069351322010025. – EDN: EHDDBHU
- Filippova A.I., Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Melnikova V.I., Radziminovich Y.B., Gileva N.A.* Source process of the September 21, 2020 M_w 5.6 Bystraya earthquake at the south-eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia) // *Tectonophysics.* – 2022. – V. 822. – P. 229162. – DOI: 10.1016/j.tecto.2021.229162. – EDN: DQTPPV
- Gileva N.A., Melnikova V.I., Radziminovich N.A., Deverchere J.* Location of earthquakes and average velocity parameters of the crust in some areas of the Baikal region // *Russian Geology and Geophysics.* – 2000. – V. 41, N 5. – P. 609–615. – EDN: TLFOJB
- Global CMT Web Page. On-line Catalog [Site].* – Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA, 2024. – URL: <http://www.globalcmt.org> (дата обращения 15.02.2024).
- Hanks T., Kanamori H.* A moment magnitude scale // *Journal of Geophysical Research.* – 1979. – V. 84, N B5. – P. 2348–2350. – DOI: 10.1029/JB084iB05p02348
- Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.-L., Zoback M.* The World stress map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // *Tectonophysics.* – 2018. – V. 744. – P. 484–498. – DOI: 10.1016/j.tecto.2018.07.007
- Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Scholz C.A., Klitgord K.D.* Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data // *Geology.* – 1992. – V. 20, N 7. – P. 589–592. – DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2
- Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R.* Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ($M_w=5.2$) and 1995 July 21 Yongen ($M_w=5.6$) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // *Geophysical Journal International.* – 2001. – V. 144, N 1. – P. 206–220. – DOI: 10.1046/j.1365-246x.2001.00313.x
- Levi K.G., Babushkin S.M., Badardinov A.A., Buddo V.Y., Larkin G.V., Miroshnichenko A.I., Sankov V.A., Ruzhich V.V., Wong H.K., Delvaux D., Colman S.* Active Baikal tectonics // *Russian Geology and Geophysics.* – 1995. – V. 36, N 10. – P. 143–154. – EDN: SXRQRN
- Levi K.G., Miroshnichenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D.* Active faults of the Baikal depression // *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine.* – 1997. – V. 21, N 2. – P. 399–434. – EDN: MNMVQP
- Levshin A.L., Yanovskaya T.B., Lander A.V., Bukchin B.G., Barmin M.P., Ratnikova L.I., Its E.N.* Seismic surface waves in a laterally inhomogeneous Earth. V. I. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1989. – 304 p.
- Logatchev N.A., Zorin, Y.A.* Baikal rift zone: Structure and geodynamics // *Tectonophysics.* – 1992. – V. 208, N 1–3. – P. 273–286. – DOI: 10.1016/0040-1951(92)90349-B
- Lunina O.V.* The digital map of the Pliocene–Quaternary crustal faults in the southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2016. – V. 7, N 3. – P. 407–434. – DOI: 10.5800/GT-2016-7-3-0215. – EDN: WQSCZV
- Melnikova V.I., Gileva N.A., Aref'ev S.S., Bykova V.V.* The 2008 Kultuk earthquake with $M_w=6.3$ in the South of Baikal: spatial-temporal analysis of seismic activation // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* – 2012. – V. 48, N 7. – P. 594–614. – DOI: 10.1134/S1069351312060031. – EDN: RGLZAP
- Melnikova V.I., Gileva N.A., Arefyev S.S., Bykova V.V., Seredkina A.I.* The August 27, 2008, $M_w=6.3$ Kultuk earthquake (South Baikal): The stress-strain state of the source area from the aftershock data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* – 2013. – V. 49, N 4. – P. 563–576. – DOI: 10.1134/S1069351313040071. – EDN: RFHJQF
- Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A.* Mechanisms of action of earthquake foci in the Baikal Region over the period 1991–1996 // *Russian Geology and Geophysics.* – 1998. – V. 39, N 11. – P. 1597–1606. – EDN: TLEXON
- Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A.* Parameters of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Baikal rift zone based on seismological data // *Doklady Earth*

- Sciences. – 2007. – V. 416, N 1. – P. 1137–1139. – DOI: 10.1134/S1028334X07070355. – EDN: MWQZSV
- Nataf H.-C., Ricard Y.* 3SMAC: On a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1996. – V. 95, N 1–2. – P. 101–122. – DOI: 10.1016/0031-9201(95)03105-7
- Radziminovich Y.B., Filippova A.I., Melnikova V.I., Gileva N.A.* Moderate earthquakes ($M=4.1–4.8$) in 2011–2019 in the area of the Goloustnaya river delta (Southern Baikal Region): A detailed analysis // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2023. – V. 59, N 11. – P. 1587–1604. – DOI: 10.1134/S0001433823100079. – EDN: MOSJHX
- Radziminovich Y.B., Imaev V.S., Radziminovich N.A., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Chipizubov A.V.* The August 27, 2008, $M_w=6.3$, Kultuk earthquake effects in the near epicenter zone: Macroseismic survey results // *Seismic Instruments*. – 2010. – V. 46, N 2. – P. 107–120. – DOI: 10.3103/S0747923910020027. – EDN: TGLKSZ
- Radziminovich Y.B., Novopashina A.V., Lukhneva O.F., Gileva N.A., & Kuz'mina E.A.* The September 21, 2020 ($M_w=5.6$) Bystraya earthquake at the southwestern flank of the Baikal rift zone: a milestone in macroseismology of Eastern Siberia // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2024. – V. 60, N 5. – P. 944–959. – DOI: 10.1134/S1069351324700861. – EDN: QPGKBS
- Ruzhich V.V., Semenov R.M., Alakshin A.M., Melnikova V.I., Chipizubov A.V., Arzhannikov S.G., Smekalin O.P., Emel'yanova I.A., Dem'yanovich M.G., Radziminovich N.A.* The 25 February 1999 South Baikal earthquake: Seismotectonics and regional geodynamics // *Russian Geology and Geophysics*. – 2002. – V. 43, N 5. – P. 448–458. – EDN: TNSYOV
- Scripps Institution of Oceanography.* Global Seismograph Network – IRIS/IDA [Data set]. – International Federation of Digital Seismograph Networks, 1986. – DOI: 10.7914/SN/II
- Seredkina A., Melnikova V., Radziminovich Y., Gileva N.* Seismicity of the Erguna region (Northeastern China): Evidence for local stress redistribution // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2020. – V. 110. – P. 803–815. – DOI: 10.1785/0120190182. – EDN: ZRGGBO
- Seredkina A.I., Kozmin B.M.* Source parameters of the Taimyr earthquake of June 9, 1990 // *Doklady Earth Sciences*. – 2017. – V. 473, N 1. – P. 342–345. – DOI: 10.1134/S1028334X1702026X. – EDN: BBCYQW
- Seredkina A.I., Melnikova V.I.* Seismotectonic crustal strains of the Mongol-Baikal seismic belt from seismological data // *Moment tensor solutions – a useful tool for seismotectonics* / Ed. S. D'Amico. – Switzerland: Springer Natural Hazards, 2018. – P. 497–517. – DOI: 10.1007/978-3-319-77359-9_22
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H.K., Bormann P., Villaseñor A.* The ISC-GEM Global instrumental earthquake catalogue (1900–2009): Introduction // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2015. – V. 239. – P. 48–63. – DOI: 10.1016/j.pepi.2014.06.009
- 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, N 10. – P. 4489–4503. – DOI: 10.5194/essd-14-4489-2022. – EDN: JDRWYB

Сведения об авторах

Радзиминович Ян Борисович, канд. геол.-мин. наук, нач. сектора Байкальского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Иркутск, Россия; ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: yan.radziminovich@gmail.com

Филиппова Алена Игоревна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Troitsk, Россия; зав. лабораторией ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: ale@izmiran.ru

Гилёва Надежда Алексеевна, нач. отдела БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия. E-mail: nagileva@crust.irk.ru

Мельникова Валентина Ивановна, д-р геол.-мин. наук, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск, Россия; инженер 1-й категории БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия. E-mail: vimel@crust.irk.ru

Кобелева Елена Анатольевна, канд. физ.-мат. наук, директор БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия. E-mail: ekobeleva@crust.irk.ru

The December 15, 2021 Mw=4.8 earthquake on South Baikal

© 2025 Ya.B. Radziminovich^{1,2}, A.I. Filippova^{2,3}, N.A. Gileva¹, V.I. Melnikova^{1,4}, E.A. Kobeleva¹

¹BB GS RAS, Irkutsk, Russia; ²IEPT RAS, Moscow, Russia; ³IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia; ⁴IEC SB RAS, Irkutsk, Russia

Received December 5, 2024

Abstract The article presents the results of a detailed analysis of data on the earthquake that occurred on December 15, 2021, within the Mishikha depression in the southern basin of Lake Baikal. Despite a moderate energy level, the earthquake was felt at large epicentral distances and caused a noticeable public response, and therefore can be considered as significant one for the South Baikal region. Based on the joint inversion of amplitude spectra of surface waves and P-wave first-motion polarities, earthquake source parameters were obtained: seismic moment ($M_0=1.6 \cdot 10^{16}$ N·m), moment magnitude (Mw=4.8), focal depth ($h=22$ km), as well as a focal mechanism, characterized by rift-type movements and representing an almost pure normal fault. It is possible that the earthquake source is associated with a local fault in the central part of the Mishikha depression, which is not shown on modern maps of active tectonics. Macroseismic data on the earthquake was collected via an online questionnaire posted on the website of the Baikal Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. The maximum observed shaking intensity was V (MSK-64) in settlements on the southern coast of Lake Baikal at a distance of 19–23 km. The shaking intensity IV (MSK-64) was observed at a distance of up to 170 km. The obtained results are of interest in studies on assessing and refining the seismic hazard of the Southern Baikal region.

Keywords Earthquake, focal mechanism, macroseismic data, South Baikal.

For citation Radziminovich, Ya.B., Filippova, A.I., Gileva, N.A., Melnikova, V.I., & Kobeleva, E.A. (2025). [The December 15, 2021 Mw=4.8 earthquake on South Baikal]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(1), 42-57. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.1.03>. EDN: KLRMPL

References

- Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS. (1992). New China Digital Seismograph Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. DOI: [10.7914/SN/IC](https://doi.org/10.7914/SN/IC)
- Albuquerque Seismological Laboratory/USGS. (2014). Global Seismograph Network (GSN - IRIS/USGS) [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. DOI: [10.7914/SN/IU](https://doi.org/10.7914/SN/IU)
- Bukchin, B.G. (1990). Determination of source parameters from surface wave recording allowing for uncertainties in the properties of medium. *Izvestiia Akademii nauk SSSR: Fizika Zemli*, 25, 723-728.
- Di Giacomo, D., Bondár, I., Storchak, D.A., Engdahl, E.R., Bormann, P., & Harris, J. (2015). ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed MS and mb, proxy Mw, final magnitude composition and completeness assessment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 239, 33-47. DOI: [10.1016/j.pepi.2014.06.005](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.005)
- Dziewonski, A.M., & Anderson, D.L. (1981). Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4), 297-356. DOI: [10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
- Dziewonski, A.M., Chou, T.-A., & Woodhouse, J.H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86, 2825-2852. DOI: [10.1029/JB086iB04p02825](https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825)
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewonski, A.M. (2012). The Global CMT project 2004–2010: Centroid moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9. DOI: [10.1016/j.pepi.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002)
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Chechel'nitskii, V.V., Shevkunova, E.V., Radziminovich, Y.B., Fateev, A.V., Kobeleva, E.A., Gladyshev, E.A., Arapov, V.V., Artemova, A.I., & Podkorytova, V.G. (2022). The Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 (Mw=6.7, ML=6.9) and early aftershocks. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58(1), 59-73. DOI: [10.1134/S1069351322010025](https://doi.org/10.1134/S1069351322010025). EDN: EHDBHU
- Filippova, A.I., Bukchin, B.G., Fomochkina, A.S., Melnikova, V.I., Radziminovich, Y.B., & Gileva, N.A. (2022). Source process of the September 21, 2020 Mw 5.6 Bystraya

- earthquake at the southeastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia). *Tectonophysics*, 822, 229162. DOI: 10.1016/j.tecto.2021.229162. EDN: DQTTPV
- Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Radziminovich, N.A., & Deverchere, J. (2000). Location of earthquakes and average velocity parameters of the crust in some areas of the Baikal region. *Russian Geology and Geophysics*, 41(5), 609-615. EDN: TLFOJB
- Global CMT Web Page. (2024). On-line Catalog. Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. Retrieved from <http://www.globalcmt.org>. Last accessed 15 February 2024.
- Golenetskii, S.I. (1990). [Earthquakes of Cisbaikalia and Transbaikalia]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1987 godu* [Earthquakes in the USSR in 1987] (pp. 76-85). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Golenetskii, S.I., Dem'yanovich, M.G., Fomina, E.V., Chipizubov, A.V., Avdeev, V.A., & Kochetkov, V.M. (1984). [The May 22 and May 27, 1981 Earthquakes on Lake Baikal]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1981 godu* [Earthquakes in the USSR in 1981] (pp. 66-74). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Golenetskii, S.I., Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Kurushin, R.A., & Masalskii, O.K. (2002). [Earthquakes of Cisbaikalia and Transbaikalia]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 1996 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 1996] (pp. 81-94). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: VBAJAX
- Golenetskii, S.I., Ruzhich, V.V., & Drennova, G.F. (1994). [Earthquake of May 12(13), 1991, in the vicinity of Babushkin town and seismicity of South Baikal]. *Geologiya i Geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 35(10), 124-132. (In Russ.).
- GOST R 57546-2017. (2017). [State Standard 57546-2017. Earthquakes. Seismic intensity scale]. Moscow, Russia: Standartinform Publ., 28 p. (In Russ.).
- Hanks, T., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), 2348-2350. DOI: 10.1029/JB084iB05p02348
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M.O., Zoback, M.-L., & Zoback, M. (2018). The World stress map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744, 484-498. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.07.007
- Hutchinson, D.R., Golmshtok, A.J., Zonenshain, L.P., Moore, T.C., Scholz, C.A., & Klitgord, K.D. (1992). Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data. *Geology*, 20(7), 589-592. DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2
- Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1977). *Novyj katalog sil'nyh zemletryasenij na territorii SSSR s drevnejshih vremyon do 1975 g.* [New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
- Lasserre, C., Bukchin, B., Bernard, P., Tapponier, P., Gaudemer, Y., Mostinsky, A., & Dailu, R. (2001). Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu (Mw=5.2) and 1995 July 21 Yongen (Mw=5.6) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China). *Geophysical Journal International*, 144(1), 206-220. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2001.00313.x
- Levi, K.G., Babushkin, S.M., Badardinov, A.A., Buddo, V.Y., Larkin, G.V., Miroshnichenko, A.I., Sankov, V.A., Ruzhich, V.V., Wong, H.K., Delvaux, D., & Colman, S. (1995). Active Baikal tectonics. *Russian Geology and Geophysics*, 36(10), 143-154. EDN: SXRQRN
- Levi, K.G., Miroshnichenko, A.I., San'kov, V.A., Babushkin, S.M., Larkin, G.V., Badardinov, A.A., Wong, H.K., Colman, S., & Delvaux, D. (1997). Active faults of the Baikal depression. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 21(2), 399-434. EDN: MNMVQP
- Levshin, A.L., Yanovskaya, T.B., Lander, A.V., Bukchin, B.G., Barmin, M.P., Ratnikova, L.I., & Its, E.N. (1989). *Seismic Surface Waves in a Laterally Inhomogeneous Earth*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 304 p.
- Logatchev, N.A., & Zorin, Y.A. (1992). Baikal rift zone: structure and geodynamics. *Tectonophysics*, 208(1-3), 273-286. DOI: 10.1016/0040-1951(92)90349-B
- Lunina, O.V. (2016). The digital map of the Pliocene-Quaternary crustal faults in the southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 7(3), 407-434. DOI: 10.5800/GT-2016-7-3-0215. EDN: WQSCZV
- Melnikova, V.I. (2008). *Deformatsionnyye parametry zemnoy kory Baykal'skoy riftovoy zony po seismologicheskim dannym* [The Deformation parameters of the Earth's crust of the Baikal rift zone according to seismological data]. Dissertation Abstract of Dr. Geol.-Min. Sciences. Irkutsk, Russia: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 37 p. EDN: QDZEDX
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Aref'ev, S.S., & Bykova, V.V. (2012). The 2008 Kultuk earthquake with Mw=6.3 in the South of Baikal: spatial-temporal analysis of seismic activation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 48(7), 594-614. DOI: 10.1134/S1069351312060031. EDN: RGLZAP
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Arefyev, S.S., Bykova, V.V., & Serechkina, A.I. (2013). The August 27, 2008, Mw=6.3 Kultuk earthquake (South Baikal): The stress-strain state of the source area from the aftershock data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(4), 563-576. DOI: 10.1134/S1069351313040071. EDN: RFHJQF
- Mel'nikova, V.I., & Radziminovich, N.A. (1998). Mechanisms of action of earthquake foci in the Baikal Region over the period 1991-1996. *Russian Geology and Geophysics*, 39(11), 1597-1606. EDN: TLEXON
- Mel'nikova, V.I., & Radziminovich, N.A. (2007). Parameters of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Baikal rift zone based on seismological data. *Doklady Earth Sciences*, 416(1), 1137-1139. DOI: 10.1134/S1028334X07070355. EDN: MWQZSV

- Minchikovskii, M.Y. (1914). [The Baikal earthquakes in 1912]. *Izvestiya Postoyannoy Tsentral'noy seismicheskoy komissii* [Proceedings of the Permanent Central Seismological Commission], 6(2), 163-171. (In Russ.).
- Nataf, H.-C., & Ricard, Y. (1996). 3SMAC: on a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 95(1-2), 101-122. DOI: 10.1016/0031-9201(95)03105-7
- Radziminovich, Y.B., Filippova, A.I., Melnikova, V.I., & Gileva, N.A. (2023). Moderate earthquakes (M=4.1-4.8) in 2011-2019 in the area of the Goloustnaya river delta (Southern Baikal Region): A detailed analysis. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 59(11), 1587-1604. DOI: 10.1134/S0001433823100079. EDN: MOSJHX
- Radziminovich, Y.B., Imaev, V.S., Radziminovich, N.A., Ruzhich, V.V., Smekalin, O.P., & Chipizubov, A.V. (2010). The August 27, 2008, Mw=6.3, Kultuk earthquake effects in the near epicenter zone: macroseismic survey results. *Seismic Instruments*, 46(2), 107-120. DOI: 10.3103/S0747923910020027. EDN: TGLKSZ
- Radziminovich, Y.B., Novopashina, A.V., Lukhneva, O.F., Gileva, N.A., & Kuz'mina, E.A. (2024). The September 21, 2020 (Mw=5.6) Bystraya earthquake at the south-western flank of the Baikal rift zone: A Milestone in macroseismology of Eastern Siberia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 60(5), 944-959. DOI: 10.1134/S1069351324700861. EDN: QPGKBS
- Ruzhich, V.V., Semenov, R.M., Alakshin, A.M., Mel'nikova, V.I., Chipizubov, A.V., Arzhannikov, S.G., Smekalin, O.P., Emel'yanova, I.A., Dem'yanovich, M.G., & Radziminovich, N.A. (2022). The 25 February 1999 South Baikal earthquake: Seismotectonics and regional geodynamics. *Russian Geology and Geophysics*, 43(5), 448-458. EDN: TNSYOV
- Scripps Institution of Oceanography. (1986). Global Seismograph Network – IRIS/IDA [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. DOI: 10.7914/SN/II
- Seredkina, A., Melnikova, V., Radziminovich, Y., & Gileva, N. (2020). Seismicity of the Erguna region (North-eastern China): Evidence for local stress redistribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110, 803-815. DOI: 10.1785/0120190182. EDN: ZRGGBO
- Seredkina, A.I. & Gileva, N.A. (2016). [Dependence between the moment magnitude and energy class for Cisbaikalia and Transbaikalia earthquakes]. *Seismicheskiye Pribory* [Seismic Instruments], 52(2), 29-38. EDN: WAZAED (In Russ.).
- Seredkina, A.I., & Kozmin, B.M. (2017). Source parameters of the Taimyr earthquake of June 9, 1990. *Doklady Earth Sciences*, 473(1), 342-345. DOI: 10.1134/S1028334X1702026X. EDN: BBCYQW
- Seredkina, A.I., & Melnikova, V.I. (2018). Seismotectonic crustal strains of the Mongol-Baikal seismic belt from seismological data. In S. D'Amico (Ed.), *Moment tensor solutions – a useful tool for seismotectonics* (pp. 497-517). Switzerland: Springer Natural Hazards. DOI: 10.1007/978-3-319-77359-9_22
- Solonenko, A.V., Solonenko, N.V., Mel'nikova, V.I., Koz'min, B.M., Kuchai, O.A., & Sukhanova, S.S. (1993). [Stresses and movements in the sources of earthquakes in Siberia and Mongolia]. In *Seismichnost' i seismicheskoe raionirovanie Severnoi Evrazii, vyp. 1* [Seismicity and Seismic Zoning of Northern Eurasia, Vol. 1] (pp. 113-122). Moscow, Russia: UIPE RAS Publ. (In Russ.).
- Solonenko, V.P., Pavlov, O.V., Khil'ko, S.D., & Khromovskikh, V.S. (1970). [The August 30, 1966, Earthquake on South Baikal]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1966 godu* [Earthquakes in the USSR in 1966] (pp. 182-186). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Engdahl, E.R., Harris, J., Bondár, I., Lee, W.H.K., Bormann, P., & Villaseñor, A. (2015). The ISC-GEM Global instrumental earthquake catalogue (1900-2009): Introduction. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 239, 48-63. DOI: 10.1016/j.pepi.2014.06.009
- Zelenin, E.A., Bachmanov, D.M., Garipova, S.T., Trifonov, V.G., & Kozhurin, A.I. (2022). The Active faults of Eurasia database (AFEAD): The ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 14(10), 4489-4503. DOI: 10.5194/essd-14-4489-2022. EDN: JDRWYB

Information about authors

Radziminovich Yan Borisovich, PhD, Head of Sector of the Baikal Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (BB GS RAS), Irkutsk, Russia; Senior Researcher of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences (IEPT RAS), Moscow, Russia. E-mail: yan.radziminovich@gmail.com

Filippova Alena Igorevna, PhD, Senior Researcher of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia; Head of Laboratory of the IEPT RAS, Moscow, Russia. E-mail: ale@izmiran.ru

Gileva Nadezhda Alekseevna, Head of Department of the BB GS RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: nagileva@crust.irk.ru

Melnikova Valentina Ivanovna, Dr., Chief Researcher of the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IEC SB RAS), Irkutsk, Russia; 1st Category Engineer of the BB GS RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: vimel@crust.irk.ru

Kobeleva Elena Anatolievna, PhD, Director of the BB GS RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: ekobeleva@crust.irk.ru