

УДК 550.34

Сейсмическое районирование района Тэутэджакского рудного поля (Магаданская область)

© 2023 г. Е.И. Алёшина, Л.И. Карпенко, С.В. Курткин, В.В. Атрохин,
Ю.В. Габдрахманова

МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия

Поступила в редакцию 25.07.2022 г.

Аннотация. Представлены результаты исследований по сейсмическому районированию района Тэутэджакского рудного поля (Магаданская область). На стадии детального сейсмического районирования (ДСР) выделено десять зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) и восемь разломов, генерирующих землетрясения. Определены местоположение очагов и магнитуда потенциально возможных максимальных землетрясений, которые приурочены к крупнейшим глубинным и скрытым разломам фундамента. По результатам ДСР исходная (фоновая) сейсмичность в районе рудного поля для объектов с повышенным уровнем ответственности – 9 баллов, магнитуда наиболее опасного землетрясения согласно расчётам составит $MS=7.5$. Исходная сейсмичность для объектов с нормальным уровнем ответственности – 8 баллов, магнитуда наиболее опасного землетрясения составит $MS=6.8$. Согласно проведённым работам по сейсмическому микрорайонированию (СМР), грунты в районе рудного поля относятся к I категории по сейсмическим свойствам, уточнённая исходная сейсмичность снижается на 1 балл. Методом сейсмических жёсткостей и методом регистрации землетрясений и взрывов получены приращения балльности для десяти участков, характеризующихся различными инженерно-геологическими условиями. Результаты исследований нашли отражение на карте-схеме приращения интенсивности сейсмических воздействий района Тэутэджакского рудного поля.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, сейсмическая активность, зоны ВОЗ, интенсивность сотрясений, детальное сейсмическое районирование, сейсмическое микрорайонирование, сейсмопрофилирование.

Для цитирования: Алёшина Е.И., Карпенко Л.И., Курткин С.В., Атрохин В.В., Габдрахманова Ю.В. Сейсмическое районирование района Тэутэджакского рудного поля (Магаданская область) // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 1. – С. 60–74. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.1.04>. – EDN: HQCLQO

Введение

Развитие золотодобычи в Магаданской области связано с освоением месторождений, входящих в Яно-Колымскую золоторудную провинцию. Одним из ресурсных потенциалов горнодобывающего комплекса региона является Тэутэджакское рудное поле, расположенное в юго-восточной части сейсмического пояса Черского [Имаев и др., 2000; Сейсмотектоника ..., 2017]. По данным карт ОСР-2015, объект исследований располагается в 7-, 8- и 9-балльных зонах расчётной сейсмической интенсивности [Общее ..., 2015].

Целью исследований является оценка сейсмической опасности объектов повы-

шенного и нормального уровня ответственности, строящихся на участках с различными грунтовыми условиями в районе Тэутэджакского рудного поля, в зависимости от периода повторяемости землетрясений 1000 и 5000 лет.

Исходными материалами исследований являлись тектонические схемы Магаданской области [Кузнецов, 2001], геолого-геофизические материалы [Горячев и др., 2001], фондовые отчёты ФГУП «Магадангеология» (Сидоров В.А. и др., 2003–2006), данные сейсмологического мониторинга, проводимого Магаданским филиалом (МФ) ФИЦ ЕГС РАН, каталоги землетрясений, научные отчёты и публикации о сейсмичности Северо-Востока России.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при проектировании и строительстве объектов горнодобывающего комплекса на площади исследований. Работы по уточнению исходной сейсмичности и СМР в окрестностях рудного поля ранее не проводились.

Основные сведения о сейсмотектонике района исследований

Район Тэутэджакского рудного поля располагается в юго-восточной части Верхояно-Колымской складчатой системы, протягивающейся от побережья Северного Ледовитого океана до Охотского моря. Особенностью складчатой системы являются зоны концентрации линейных структур преимущественно северо-западного простирания [Гончаров и др., 2002]. В пределах Верхояно-Колымской складчатой зоны располагается сейсмический пояс Черского, геодинамика которого определяется взаимодействием Евразийской и Североамериканской литосферных плит [Mackey, 2010]. Землетрясения этого пояса представляют основную сейсмическую опасность для объектов горнопромышленного комплекса Магаданской области.

Работы по определению сейсмичности проводятся в юго-восточной части пояса Черского. В геологическом плане объект исследований расположен в зоне сочленения Куллар-Нерского турбидитового террейна континентального склона и Арmano-Вилигинского террейна активной континентальной окраины Верхояно-Колымской орогенной области, в пределах деформированных горных пород ретско-юрских отложений, смятых в складки и нарушенных разломами Арmano-Вилигинского террейна. Ретско-юрские толщи были ороговикованы под влиянием позднеюрского и раннемелового магматизма, что повлияло на плотность и крепость пород. Позднеюрские интрузии представлены субпластовыми дайкообразными телами и дайками диорит-порфиритов сравнительно небольших размеров. Раннемеловой магматизм представлен гранитами сибердыкского комплекса Омчанского массива, простирающимися на глубину до 4–5 км. Тектонические нарушения пространственно совпадают с морфологией речной сети; преобладают разломы широтного, северо-западного и северо-восточного простирания, глубина заложения которых оценивается в 10–30 км.

Разрывные нарушения района можно разделить на две возрастные группы: разломы, возникновение которых сопряжено со складчато-

стью в конце позднеюрской – начале раннемеловой эпохи, и разломы, заложенные со второй половины раннего мела до палеогена. В неоген-четвертичное время произошло подновление уже существующих и заложение новых разломов.

Разломы первой группы по времени образования сопряжены с этапами складкообразования и представлены сбросо-надвидами, надвидами, субпластовыми срывами и продольными крутопадающими сбросо-сдвигами. Амплитуда горизонтальных и вертикальных перемещений по разломам надвигового, сбросо-надвигового и сбросо-сдвигового типов изменяется от нескольких метров до десятков и сотен метров, реже достигает 1 км. Вертикальные перемещения по разломам взбросо-надвигового и сбросо-сдвигового типа составляют сотни метров – первые километры. Тектонические движения по разломам первой группы, по-видимому, неоднократно подновлялись в связи с последующим развитием территории в условиях активной континентальной окраины.

Разрывные структуры второй группы наиболее широко развиты и представлены мощными зонами разломов широтного, северо-западного и северо-восточного простирания, глубина заложения которых по гравиметрическим данным оценивается в 10–30 км. Они характеризуют состояние растяжения земной коры, контролируют размещение свит даек различного состава и возраста, аллохтонных и автохтонных интрузивов и связанных с ними разнопорядковых магматогенных структур, вмещающих рудно-метасоматические системы с различными типами оруденения. Отдельные разломы зон прослеживаются на десятки и сотни километров. Каждый из них, в зависимости от состава вмещающих пород, представляет собой зону смятия или дробления мощностью от первых до 70–150 м.

Методика проведённых работ

Комплекс проведённых работ выполнен в соответствии с действующими нормативными документами на строительство в сейсмически опасных районах [СП 14.13330.2018, 2018; СП 283.1325800.16, 2016; СП 286.1325800.2016, 2016; РСН 65-87, 1988], включал сбор, обобщение и анализ литературных, фондовых и архивных материалов, геолого-геофизических данных по району исследований. На стадии ДСР проводился анализ сейсмотектонической обстановки, выделялись зоны возможных очагов

землетрясений (ВОЗ), определялось местоположение очагов потенциально возможных максимальных землетрясений (ПВМЗ) с оценкой балльности на рассматриваемом объекте. Полученные результаты ДСР явились исходными оценками сейсмических воздействий при проведении СМР.

На стадии СМР методом сейсмического профилирования выполнялись полевые определения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн. Расчётным путём на участках, характеризующихся различными инженерно-геологическими условиями грунтов верхней части разреза (ВЧР), определялись приращения балльности и уточнённые величины интенсивности сейсмических воздействий. Использовался метод регистрации землетрясений и взрывов и метод сейсмических жёсткостей.

Детальное сейсмическое районирование

Площадь детальных сейсмологических исследований ограничена в координатах 59.3–62.0°N и 147.0–152.0°E, представляет прямоугольник, в центре которого располагается район исследований Тэутэджакское рудное поле. В пределах этой территории, на расстоянии ~150 км от объекта, находятся основные сейсмогенные зоны, землетрясения которых проявляются максимальными сотрясениями.

Анализ сейсмического режима

Для анализа сейсмического режима района Тэутэджакского рудного поля составлен сводный каталог землетрясений. Источниками данных служили: «Сводный каталог землетрясений Северо-Востока России с древнейших времён по 1974 г.», каталоги, опубликованные в ежегодных сборниках «Землетрясения СССР» (1965–1990 гг.), «Землетрясения Северной Евразии» (1991–2017 гг.), «Землетрясения России» (2018–2020 гг.), региональный каталог за 2021 год. Сводный каталог охватывает период времени с 1964 по 2021 год. За это время в пределах рассматриваемой территории локализованы эпицентры 1221 сейсмического события с энергетическим классом $K_p=4.9–14.0$.

Гипоцентры землетрясений расположены в пределах земной коры на глубинах $h \leq 33$ км. Основная масса событий сконцентрирована в диапазоне глубин 2–10 км (рис. 1). Отметим, что из анализа исключались землетрясения с нулевой и стандартной коровой ($h=33$ км) глубинами очагов и события, глубина которых не определена.



Рис. 1. Распределение количества землетрясений по глубинам гипоцентров.

Серая линия — все землетрясения ($1.8 \leq MS \leq 5.5$);
чёрная линия — сильные землетрясения ($3.4 \leq MS \leq 5.5$)

Классификация землетрясений Северо-Востока России осуществляется по энергетическим классам K_p шкалы Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1964]. В сводном каталоге данные были унифицированы по магнитуде MS . Зависимость между магнитудой MS и классом K_p для Магаданской области рассчитывалась по формуле из [Лутиков и др., 2019]:

$$MS = 0.5481 \cdot K_p - 2.1271. \quad (1)$$

Из сводного каталога были исключены: афтершоки; землетрясения роевых последовательностей; события, которые отмечены в каталоге как «вероятно взрыв»; заведомо непредставительные землетрясения с магнитудами $MS \leq 1.7$ ($K_p \leq 7.0$). После этого сводный каталог включал параметры 700 землетрясений с магнитудой $MS = 1.8–5.5$ ($K_p = 7.1–14.0$).

В табл. 1 представлено распределение количества землетрясений по годам и магнитудам.

Регулярные наблюдения в районе Тэутэджакского рудного поля начались с 1964 года. В табл. 1 жирным шрифтом выделены периоды представительной регистрации землетрясений для разных магнитуд. Низшей представительной магнитудой в период 2008–2021 гг. является $MS = 2.0$.

После выделения периодов представительной регистрации землетрясений был сформирован сводный представительный каталог землетрясений. В него вошли параметры 391 землетрясения с магнитудой $MS = 2.0–5.0$, зарегистрированного в период с 1964 по 2021 г. включительно (табл. 2).

Таблица 1. Распределение количества землетрясений в сводном каталоге по годам и магнитудам

Годы	MS								N
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	
1964–1977	24	55	21	16	5	3		1	125
1978–1982	13	36	10	4					63
1983–1987	6	11	6	8	3	1			35
1988–1992	12	23	13			1			49
1993–1997	3	9	7	4	2				25
1998–2002	10	18	11	4			1		44
2003–2007	35	35	10	1	1	2			84
2008–2012	54	30	8	5	1		1		99
2013–2017	61	26	12		1				100
2018–2021	57	10	6	3					76
N	275	253	104	45	13	7	2	1	700
N _{пред.}	172	101	67	29	13	7	2		391

На основании табл. 2 построен график повторяемости, дающий представление о среднем периоде повторения землетрясений соответствующих магнитуд в районе Тэутэджакского рудного поля (рис. 2).

Таблица 2. Распределение количества землетрясений по интервалам представительных наблюдений и магнитудам

MS	Годы	T _{пред.} , лет	N	N/T	lg(N/T)
2.0	2008–2021	13	172	13.2	1.1206
2.5	2003–2021	18	101	5.6	0.7482
3.0	1988–2021	33	67	2.0303	0.3075
3.5	1978–2021	43	29	0.6744	-0.1711
4.0	1964–2021	57	13	0.2281	-0.6419
4.5	1964–2021	57	7	0.1228	-0.9108
5.0	1964–2021	57	2	0.0351	-1.4547

Примечание: T_{пред.} – период представительных наблюдений в годах, N – общее количество землетрясений в соответствующем интервале магнитуд, N/T – среднее количество землетрясений в год в соответствующем интервале магнитуд.

Формула графика повторяемости имеет вид:

$$\lg(N/T_{пред.}) = -0.8567 \cdot MS + 2.8552, R_c = 0.997. \quad (2)$$

Высокий коэффициент линейной корреляции R_c=0.997 свидетельствует о достаточно высокой надёжности полученного результата. Наклон графика повторяемости в районе Тэутэджакского рудного поля по магнитуде MS равен b=0.86, что близко к значению (b=0.88),

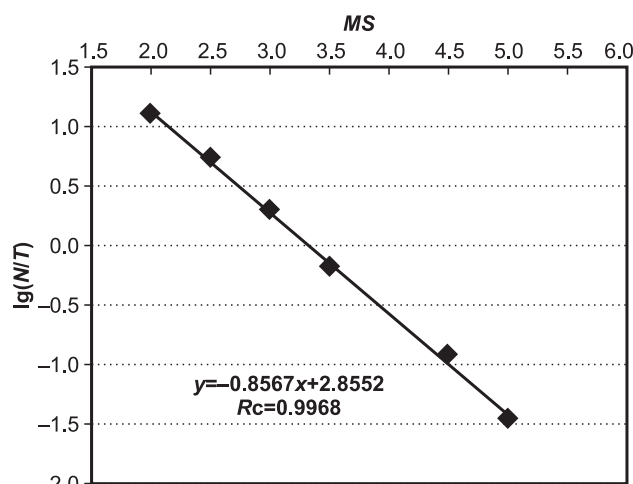


Рис. 2. График повторяемости землетрясений в районе Тэутэджакского рудного поля в интервале магнитуд 2.0–5.0

полученному в предыдущих исследованиях для Магаданской области [Лутиков и др., 2019], что свидетельствует об устойчивости параметра b.

Сильные землетрясения в районе Тэутэджакского рудного поля и их макросейсмические проявления

В районе исследований за весь период наблюдений имеются сведения о пяти ощутимых землетрясениях, сведения о которых приведены ниже.

Артыкское землетрясение 18 мая 1971 г. с MS=6.6–7.1 [Алёшина, Годзиковская и др., 2015; International ..., 2022] – самое сильное сейсмическое событие из инструментально зарегистрированных в системе сейсмического пояса Черского. Район Тэутэджакского рудного поля находился

на расстоянии 405 км ($\Delta=405$ км) юго-восточнее эпицентра, в 3-балльной зоне сотрясений.

Кулинское землетрясение 13 января 1972 г. с $M=5.7$ ($K_p=14$). Интенсивность сотрясений в районе рудного поля ($\Delta=150$ км) составила 4 балла.

Эльгенское землетрясение 19 июня 1974 г. с $M=5.1$ ($K_p=13$). Район рудного поля ($\Delta=288$ км) находился в 3-балльной зоне сотрясений.

Купкинское землетрясение 8 ноября 1981 г. с $M=6.0$ ($K_p=13.3$). Площадь рудного поля ($\Delta=230$ км) находилась в 3–4-балльной зоне сотрясений.

Ланкучанское землетрясение 26 декабря 2009 г. с $M=5.0$ ($K_p=13.0$). Площадь рудного поля ($\Delta=124$ км) находилась в 3-балльной зоне сотрясений.

Таким образом, интенсивность сотрясений на изучаемой территории не превышала 4 баллов по шкале MSK-64 [Медведев и др., 1965].

Промышленные взрывы

При изучении сейсмичности в районе Тэутэджакского рудного поля анализировались бюллетени станций с целью исключения из каталога промышленных взрывов. Выбраны сейсмические события с энергетическим классом $K \leq 8.6$. Это максимальное значение энергетического класса регистрируемых в Магаданской области промышленных взрывов. Использованы круговые диаграммы распределения количества землетрясений по часам суток (рис. 3). Их анализ показал, что максимум событий

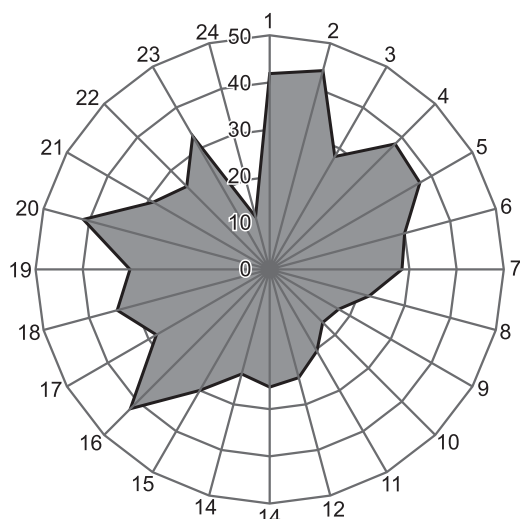


Рис. 3. Диаграмма распределения землетрясений в районе Тэутэджакского рудного поля по часам суток (местное время).

Радиальные шкалы – количество событий;
на окружности – местное время

приходится на 16, 20 часов и на 1–2, 4–5 часа ночи (время местное). Их число в это время в 3.4 раза превышает минимальные значения. Как правило, в ночное время взрывные работы не проводятся. Количество событий было выше среднего значения как в ночное, так и в дневное время. Следовательно, можно полагать, что среди зарегистрированных событий если и есть взрывы, то их количество незначительно и не влияет на статистику.

Сейсмогенные разломы

Сопоставление положения эпицентров с разломами показывает, что они в разной степени сейсмически активны, некоторые из них имеют участки, которые за период инструментальных наблюдений оказались зонами молчания и должны быть отнесены к асейсмичным.

Проанализированы восемь глубинных разломов, которые являются основными сейсмогенерирующими структурами района работ, определено местоположение потенциальных очагов землетрясений (3-1–3-8), от которых сейсмический эффект на площадках рудного поля может оказаться максимальным (табл. 3, рис. 4). При этом изучалась не общая длина разлома, а только эффективная его часть, равная максимальной длине активного сегмента.

Оценивая магнитуду «потенциально возможного максимального землетрясения» (ПВМЗ) на площади исследуемого рудного поля, будем исходить из установленной для сейсмически активных регионов связи максимальной магнитуды землетрясений с длиной глубинного разлома [Wells, Coppersmith, 1994]. Использовано следующее соотношение:

$$M=4.33+1.49 \cdot \lg(RLD), \quad (3)$$

где M – магнитуда землетрясения; RLD – подповерхностная длина разрыва сбросо-сдвигового разлома континентальной коры в километрах.

Оценка расчётной интенсивности сотрясений на площадке строительства проведена по формуле Н.В. Шебалина [Новый ..., 1977]:

$$I_0 = 1.5M - 3.5 \cdot \sqrt{h^2 + \Delta^2} + 3, \quad (4)$$

где I_0 – расчётная интенсивность сотрясения в эпицентре; M – магнитуда землетрясения, h – глубина очага землетрясения; Δ – эпицентральный расстояние.

Также с помощью формулы (4) получены значения максимальной магнитуды землетрясений с $I_0=7, 8$ и 9 баллов (периоды повторяемости 500,

1000 и 5000 лет по карте ОСР-2015), исходя из условия, что они приурочены к разлому и произошли на минимальном расстоянии от Тэутэджака на глубине максимального землетрясения по каталогу. Значения этих магнитуд даны в графах 7, 8 и 9 табл. 3.

Согласно табл. 3, максимальная расчётная интенсивность сотрясений в районе рудного поля $I_0=10$ баллов при потенциально возможном максимальном землетрясении 3-1 с расчётной магнитудой $M=8.1$ в зоне Хуренского разлома на расстоянии 5 км от объекта.

Вероятность возникновения подобного события не поддаётся расчёту, поскольку неизвестна скорость подвижек по Хуренскому разлому. Его вероятность вне карты ОСР-2015-С [Общее ..., 2018], т.е. его повторяемость реже, чем один

раз в 5000 лет (<0.5%). Поэтому примем максимальную расчётную интенсивность ПВМЗ 3-1 $I_0=9$ баллов с расчётной магнитудой $M=7.5$, периодом повторяемости 5000 лет, как указано в карте ОСР-2015-С (табл. 3).

Зоны ВОЗ

Для прогнозного анализа сейсмической опасности в окрестностях Тэутэджакского рудного поля определено положение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). Большинство землетрясений приурочено к крупнейшим глубинным разломам и скрытым разломам фундамента. Выделены десять зон ВОЗ (рис. 3), характеристики зон представлены в табл. 4. Оценка расчётной интенсивности сотрясений в районе Тэутэджака проведена по формуле (4).

Таблица 3. Характеристики сейсмогенных разломов

Название разлома	Длина, км	Глубина очага максимального землетрясения по каталогу, км	Минимальное расстояние от Тэутэджака до очага ПВМЗ, км	Максимальная расчётная магнитуда M по длине разлома	Максимальная расчётная интенсивность сотрясений на площадке (по $M_{расч}$), балл	Расчётная магнитуда ПВМЗ, период повторяемости:		
						500 лет, карта А 7 баллов	5000 лет, карта В 8 баллов	5000 лет, карта С 9 баллов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Хуренский (3-1)	170	30	5	8.1	10.0	6.1	6.8	7.5
Тенькинский		24						
южный сегмент (3-2)	82		50	7.2	7.7	6.7	7.4	8.1
средний сегмент (3-3)	78		110	7.1	6.5	7.5	8.1	8.8
Малтанский (скрытый разлом фундамента) (3-4)	~100	5	73	7.3	7.4	7.0	7.7	8.4
Челомджа-Ямский								
западный сегмент (3-5)	138	10	58	7.5	8.1	6.8	7.5	8.1
восточный сегмент (3-6)	205	5	74	7.8	8.2	7.0	7.7	8.4
Нельгасиг-Кырчанский (скрытый разлом фундамента) (3-7)	~85	5	75	7.2	7.2	7.0	7.7	8.4
Чай-Юрьинский	185	1	88	7.7	7.8	7.2	7.9	8.5
средний сегмент (3-8)								
Кыш-Анмандыканский	34	10	120	6.6	5.6	7.5	8.2	8.9
южный сегмент (3-9)								
Кава-Ямский	127	20	125	7.5	6.9	7.6	8.2	8.9
средний сегмент (3-10)								

Примечание: в графах 7, 8, 9 зачёркнуты числа в случаях, когда расчётная магнитуда при ПВМЗ значительно меньше, чем по картам ОСР-2015. Это означает, что данная зона ВОЗ не обладает достаточным потенциалом, позволяющим достичь максимального сейсмического эффекта на рассматриваемом временном интервале.

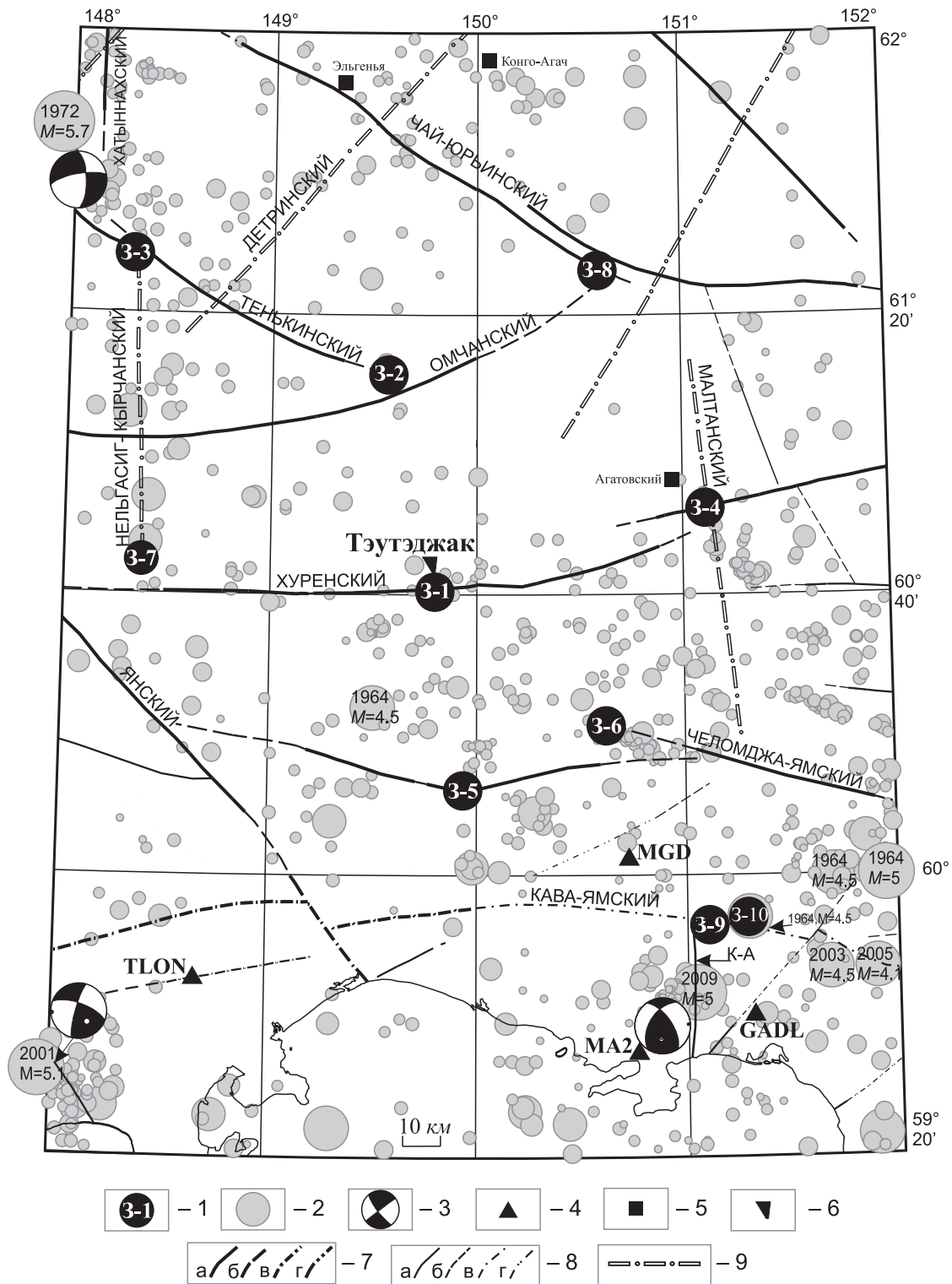


Рис. 4. Положение основных сейсмогенерирующих разломов в районе Тэутэджакского рудного поля, механизмы очагов сильнейших зарегистрированных землетрясений, и очаги потенциально возможных максимальных землетрясений (ПВМЗ) 3-1–3-10.

1 – очаг потенциально возможного максимального землетрясения ПВМЗ; 2 – эпицентры землетрясений; 3 – механизм очага землетрясения в проекции нижней полусферы; 4 – сейсмостанция; 5 – полигон горнодобывающего предприятия; 6 – Тэутэджак; 7 – крупнейшие разломы установленные (а), предполагаемые (б), скрытые под более молодыми образованиями установленные (в) и предполагаемые (г); 8 – прочие тектонические нарушения установленные (а), предполагаемые (б), скрытые под более молодыми образованиями установленные (в) и предполагаемые (г); 9 – скрытые разломы фундамента

Таблица 4. Характеристики зон ВОЗ

Название зоны ВОЗ	Протяжённость продольной и поперечной осей, км	Число событий в зоне с $K_p \geq 10$	Максимальное землетрясение в каталоге (по магнитуде)	Глубина очага, км	Тип подвижки в очаге	Расстояние от эпицентра до Тэутэджака, км	Расчётная интенсивность сотрясений в районе Тэутэджака, балл
1	2	3	4	5	6	7	8
Хуренская	170×15	нет	22.11.1985 $K=9.1, M=3.1$	30	—	3	2.5
Тенькинская	190×35	19	Кулинское 13.01.1972 $K=14.0, M=5.7$	24	правосторонний сдвиг со сбросом ¹	150	3.9
Челомджинская	126×15	1	11.02.1964 $K=12.0, M=4.5$	10	—	40	4.1
			09.09.1987 $K=10.8, M=3.9$	5	—	69	2.4
Челомджа-Ямская	35×20	3	26.11.2002 $K=10.5, M=3.8$	5	—	73	2.2
Малтанская	100×20	нет	15.06.2017 $K=9.5, M=3.3$	5	—	74	1.4
Нельгасиг-Кырчанская	85×20	5	19.08.1973 $K=11.0, M=4.0$	5	—	74	2.5
Чай-Юрьинская	180×20	нет	19.08.1973 $K=9.5, M=3.3$	1	—	95	1.1
Ланкучанская	40×110	3	Ланкучанское 26.12.2009 $K=13.0, M=5.0$	10	взброс с компонентами сдвига ²	130	3.1
Ямская	80×40	18	20.01.1944 $M=5.0$	20	—	145	2.9
Мотыклейская	50×27	6	Мотыклейское 07.01.2001 $K=13.1, M=5.1$	6	правосторонний сдвиг с компонентами взброса ³	183	2.7

Примечание: ¹ – [Козьмин, 1984]; ² – [Алёшина, Гунбина и др., 2015]; ³ – [Global ..., 2022].

Расчётная интенсивность сотрясений (графа 8) определена по максимальному землетрясению в каталоге (графа 4).

Выводы по ДСР

1. Наклон графика повторяемости в районе Тэутэджакского рудного поля по магнитуде MS равен $\gamma=0.85$, что близко к значению $b=0.88$, полученному в предыдущих исследованиях для Магаданской области [Лутиков и др., 2019], и свидетельствует об устойчивости параметра b .

2. В окрестностях Тэутэджакского рудного поля выделены десять зон ВОЗ и восемь разломов, генерирующих землетрясения. Определено местоположение потенциальных очагов землетрясений, от которых сейсмический эффект на площадке строительства может быть максимальным.

3. Большинство землетрясений, в том числе и самые сильные, приурочены к крупнейшим глубинным разломам и скрытым разломам фундамента. Наиболее опасные очаги потенциально возможных максимальных землетрясений ПВМЗ 3-1, 3-5 и 3-6 приурочены к Хуренскому и Челомджа-Ямскому активным разломам. Эти землетрясения могут вызвать в окрестностях рудного поля сотрясения интенсивностью $I=9.0, 8.1$ и 8.2 балла соответственно (табл. 3), что согласуется с картой ОСР-2015-В и ОСР-2015-С [Общее ..., 2018]. По карте макросейсмической бальности Магаданской области при среднем периоде повторения сейсмических воздействий один раз в 5000 лет расчётный сейсмический балл в районе рудного поля составляет $7.0-8.5$ [Лутиков и др., 2019].

4. Согласно механизмам очагов землетрясений, современные типы подвижек по разломам – сдвиги со сбросами и взбросами. Близ эпицентров преобладают субвертикальные смещения ($63-68^\circ$).

5. Сотрясения на изучаемой территории до настоящего времени не превышали 4 баллов, что существенно ниже, чем указано на картах ОСР-2015.

6. По результатам ДСР исходную (фоновую) сейсмичность района Тэутэджакского рудного поля при строительстве особо ответственных объектов по карте ОСР-2015-С следует принять 9 баллов. Магнитуда наиболее опасного землетрясения, согласно расчётам, составит $MS=7.5$ при эпицентральной расстоянии 5 км. При строительстве объектов с нормальным уровнем ответственности по карте ОСР-2015-В следует принять 8 баллов, магнитуда наиболее опасного землетрясения, согласно расчётам, составит $MS=6.8$ при эпицентральной расстоянии 5 км. Необходимо отметить, что при вероятностном анализе сейсмической опасности рассматривались самые неблагоприятные условия.

Сейсмическое микрорайонирование (СМР)

СМР методом сейсмологической регистрации землетрясений

Для определения сотрясения поверхности при землетрясениях в районе Тэутэджакского рудного поля были установлены четыре временные сейсмостанции ТЖК1–4 (рис. 4). Созданная локальная сеть сейсмических станций позволила

регистрировать сейсмические события энергетического класса $K \geq 6.4$ на эпицентральных расстояниях до ~ 508 км.

В качестве эталонного выбран участок выхода скальных грунтов (диоритовых порфиринов) в месте установки сейсмостанции ТЖК4 (профиль № 1). Методом сейсмического профилирования по профилю № 1 нами установлена скорость продольных $V_p=5.051$ км/с и поперечных волн $V_s=2.828$ км/с. Объёмная плотность диоритовых порфиринов $\rho=2.7$ г/см³. Эти грунты относятся к I категории по сейсмическим свойствам, и они приняты в качестве эталонных. В соответствии с табл. 4.1 из [СП 14.13330.2018, 2018] величина исходной сейсмичности здесь уменьшается на 1 балл.

С учётом выше изложенного обоснования, уточнённая исходная сейсмичность на эталонном участке составляет 8 баллов по карте ОСР-2015-С для объектов с повышенным уровнем ответственности и 7 баллов по карте ОСР-2015-В для объектов с нормальным уровнем ответственности.

Для определения приращения балльности ΔI на различных участках использовали записи десяти местных землетрясений и семи промышленных взрывов с энергетическими классами $K=6.4-11.3$, которые зарегистрированы на эпицентральных расстояниях $\Delta=130-508$ км. Использовались максимальные амплитуды поперечной волны S , измерялся полный вектор амплитуды по горизонтальным составляющим NS и EW .

Каталог использованных землетрясений представлен в табл. 5.

Таблица 5. Параметры землетрясений и взрывов, использованных для определения приращения балльности

Дата			Время в очаге			Координаты		Глубина, км	Энергетический класс K_p	Магнитуда M
день	месяц	год	час	мин	с	φ , °N	λ , °E			
Землетрясения										
18	6	2020	12	42	26.2	60.04	152.67	24	8.1	2.6
18	6	2020	16	43	55.2	63.26	149.79	27	7.0	2.0
19	6	2020	22	19	17.7	59.98	145.43	5	7.0	2.0
20	6	2020	00	26	33.1	64.99	146.05	5	11.3	4.2
20	6	2020	03	43	35.9	59.85	152.88	29	7.5	2.3
20	6	2020	20	21	15.9	61.62	146.29	4	7.2	2.1
21	6	2020	03	41	55.2	59.35	147.96	0	6.4	1.6
26	6	2020	06	46	59.8	63.04	145.87	24	8.1	2.6
28	6	2020	19	06	24.8	58.76	149.47	25	7.2	2.1
2	7	2020	18	43	30.2	61.47	153.76	0	7.0	2.0

Дата			Время в очаге			Координаты		Глубина, км	Энергетический класс K_p	Магнитуда M
день	месяц	год	час	мин	с	φ , °N	λ , °E			
Взрывы										
18	6	2020	08	57	32.7	61.97	149.70	0	6.8	1.9
19	6	2020	07	54	19.6	61.97	149.70	0	6.9	2.0
21	6	2020	03	05	30.0	61.54	147.87	0	7.1	2.1
22	6	2020	02	17	28.5	61.54	147.87	0	6.9	2.0
22	6	2020	08	04	29.0	61.97	149.70	0	7.4	2.3
23	6	2020	06	14	22.7	61.98	149.60	0	7.0	2.0
25	6	2020	02	21	28.9	61.64	147.82	0	7.1	2.1

Примечание: глубина 0 км выбрана и зафиксирована программой обработки землетрясений NYP2DT [Mackey, 1999] для приповерхностных и коровых очагов соответственно.

Для определения приращения бальности использовано соотношение [СП 283.1325800.2016, 2016; РСН 65-87, 1988]:

$$\Delta I = 3.3 \cdot \lg \frac{A_1^{\max}}{A_3^{\max}}, \quad (5)$$

где ΔI – приращение сейсмической интенсивности (в баллах); A_1 – максимальная амплитуда колебаний на исследуемом участке; A_3 – максимальная амплитуда колебаний на эталонном участке.

Методом сейсмологической регистрации землетрясений получены приращения бальности ΔI на участках. Результаты исследований приведены в табл. 6.

Таблица 6. Значения приращения бальности по методу регистрации землетрясений

Место установки станции	Код станции	Приращение бальности, ΔI
Карьер	ТЖК1	0.18
Склад ВМ	ТЖК2	0.19
Хвостохранилище	ТЖК3	1.10
ЗИФ	ТЖК4	эталон

СМР методом сейсмических жёсткостей

Определение приращения бальности по методу сейсмических жёсткостей проводилось по данным измерений скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) сейсмических волн. Для определения их скоростей выполнено сеймопрофилирование по десяти продольным профилям (рис. 5). Для регистрации продольных P - и поперечных S -волн использовались шестиканальные станции «Байкал» с частотой дискретизации регистратора 4000 *отсч/с*. В результате

полевых работ установлено, что свойства грунтов практически не меняются в пределах каждого объекта. Исключение – площадка ДЭС, где пройдены два профиля.

На каждом профиле, в зависимости от горно-геологических условий, устанавливались десять или пять сейсмоприёмников СВ-5. Расстояние между датчиками 20 м. При этом длина профилей была 180 и 80 м соответственно. На профиле № 10 (Склад пустой породы (ПП)) расстояние между датчиками было 40 м, длина профиля – 360 м. Сейсмический сигнал возбуждался взрывом в пункте, удалённом от первого сейсмодатчика на расстояние 20 и 40 м с обеих сторон профиля (на участке Склад ПП – 40 и 80 м). На профиле № 5 (Карьер) сейсмический сигнал возбуждался ударом кувалды. Выполнялось по два удара в каждом пункте. Наблюдения проводились по системе встречных годографов. Координаты пунктов ударов определялись приборами GPS, встроенными в «Байкал». После вывода сейсмограмм проводилось выделение времени первых вступлений продольной P - и поперечной S -волн (t_p и t_s). Для профилей построены прямые и обратные годографы продольных и поперечных волн, по которым вычислены скорости V_p , V_s .

Для расчёта приращения бальности принимались скорости волн для самых неблагоприятных условий. Если значения скоростей волн прямых и обратных годографов различались незначительно, то при расчёте принималось среднее значение скоростей волн для всего профиля. Если значения скоростей волн встречных годографов значительно превышали скорости волн прямых годографов, то в расчёте использовались значения прямых годографов с низкими скоростями.

Приращение сейсмической интенсивности за счёт различия грунтовых условий ΔI определялось по формуле [РСН 65-87, 1988]:

$$\Delta I = 1.67 \cdot \lg \frac{\bar{V}(P, S)_3 \cdot \bar{\rho}}{\bar{V}(P, S)_1 \cdot \bar{\rho}}, \quad (6)$$

где $V(P, S)_3$ и $V(P, S)_1$ – средневзвешенные значения скоростей распространения продольных или поперечных волн на эталонном и исследуемом участках; ρ – плотность грунтов.

Значения скоростей продольных и поперечных волн определены по осреднённому прямой линией наблюденному годографу. Значения объёмной плотности приняты по результатам лабораторных работ по определению физико-механических свойств скальных грунтов. Использовались данные ближайших инженерно-геологических разрезов и скважин. По этим дан-

ным скальные грунты представлены диоритовыми порфиритами, диоритами, андезитами, метаморфизованными алевритами с песчаниками. Породы в разной степени трещиноватые и выветрелые. Скальные грунты практически на всей территории перекрыты гравийно-галечным грунтом иногда с песчаным заполнителем мощностью 0–16 м.

Значения приращения сейсмической интенсивности ΔI , полученные методом сейсмических жёсткостей, приведены в табл. 7. В качестве эталонного выбран участок выхода скальных грунтов в месте установки сейсмостанции ТЖК4, профиль 1.

Сводные результаты определения приращения балльности методами регистрации землетрясений и сейсмических жёсткостей приведены в табл. 8.

Таблица 7. Значения приращения балльности по методу сейсмических жёсткостей

№ профиля и участок	Плотность пород, ρ	V_p , км/с	Сейсмическая жёсткость ρ по P	ΔI_p	V_s , км/с	Сейсмическая жёсткость ρ по S	ΔI_s
1 ЗИФ	2.70	5.051	13.64	эталон	2.828	7.64	эталон
2 Посёлок	2.54	3.895	9.89	0.23	2.029	5.15	0.29
3 Склад ВМ	2.54	3.367	8.55	0.34	1.840	4.67	0.36
4 Хвостохранилище	2.58	2.984	7.70	0.41	1.584	4.09	0.45
5 Карьер	2.54	4.706	11.95	0.10	2.807	7.13	0.05
6 ДЭС	2.54	2.433	6.18	0.57	1.257	3.19	0.63
7 АХОВ	2.54	3.561	9.04	0.30	1.916	4.87	0.33
8 Водозабор	2.54	3.706	9.41	0.27	1.935	4.91	0.32
9 ДЭС 2	2.54	2.151	5.46	0.66	0.862	2.19	0.91
10 Склад ПП	2.54	4.913	12.48	0.06	2.203	5.60	0.23

Таблица 8. Сводная таблица результатов определения приращения балльности методами регистрации землетрясений и сейсмических жёсткостей

Объект	Приращение балльности, ΔI		Принято ΔI , балл
	Метод регистрации землетрясений	Метод сейсмических жёсткостей	
Карьер	0.18	0.10	0.18
Склад ВМ	0.19	0.36	0.36
Хвостохранилище	1.10	0.45	1.10
ЗИФ	эталон	эталон	0.00
ДЭС		0.63	0.63
ДЭС 2		0.91	0.91
АХОВ		0.33	0.33
Водозабор		0.32	0.32
Склад ПП		0.23	0.23
Посёлок		0.29	0.29

Карта-схема приращения интенсивности сейсмических воздействий в районе Тэутэджакского рудного поля показана на рис. 5.

Заключение

С учётом новых геолого-геофизических и сейсмологических материалов для района Тэутэджакское рудное поле проведены ДСР и СМР.

По результатам ДСР исходная (фоновая) сейсмичность по карте ОСР-2015-С принята – 9 баллов, по карте ОСР-2015-В – 8 баллов, при периоде повторяемости ~5000 лет. Магнитуда наиболее опасного землетрясения по карте ОСР-2015-С, согласно расчётам, составит $MS=7.5$ при эпицентральной расстоянии 5 км, по карте ОСР-2015-В – $MS=6.8$. При проведении СМР в качестве эталонного участка была выбрана площадка выхода скальных грунтов, где уточнённая исходная сейсмичность с учётом ДСР составила по карте ОСР-2015-С – 8 баллов для объектов с повышенным уровнем ответственности, по карте ОСР-2015-В – 7 баллов для объектов с нормальным уровнем ответственности.

По данным двух методов (регистрации землетрясений и сейсмических жёсткостей) расчётным путём получены приращения балльности на участках, характеризующихся различными инженерно-геологическими условиями. Значения приращения балльности $\Delta I=0.18-1.1$. Построена карта-схема приращения интенсивности сейсмических воздействий.

Таким образом, интенсивность сотрясений в районе Тэутэджакского рудного поля по карте ОСР-2015-С составит $I=8.18-9.1$, по карте ОСР-2015-В $I=7.18-8.1$.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и 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.gstras.ru/unu/>).

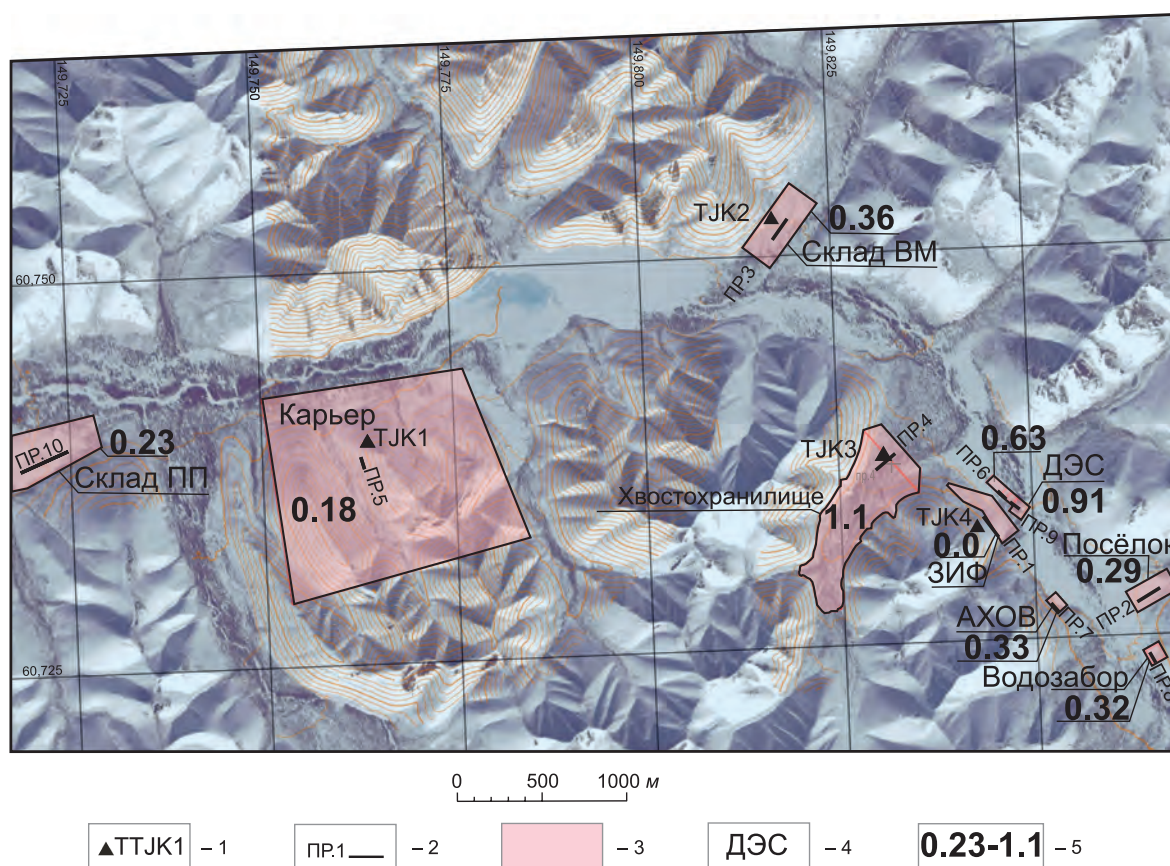


Рис. 5. Карта-схема приращения интенсивности сейсмических воздействий, положение сейсмических станций временной локальной сети и продольных сейсмопрофилей.

1 – сейсмическая станция; 2 – профиль и его номер; 3 – участок исследований;
4 – название участка; 5 – приращение балльности ΔI

Литература

- Алёшина Е.И., Годзиковская А.А., Гунбина Л.В., Коломица М.В., Седов Б.М. Сводный каталог землетрясений Северо-Востока России с древнейших времён по 1974. – Обнинск, Магадан: ГС РАН, 2015. – 152 с.
- Алёшина Е.И., Гунбина Л.В., Иванова Е.И., Карпенко Л.И., Седов Б.М. Ланкучанское землетрясение 26 декабря 2009 г. с $K_p=13.0$, $MPSP=4.5$, $I_0=6-7$ (Северо-Восток) // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 344–352. – EDN: WGNFDF
- Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинское золоторудное месторождение. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. – 250 с.
- Горячев Н.А., Сидоров В.А., Гамянин Г.Н., Алексеенко А.В., Жуков О.В. Предварительные данные о золото-редкометалльной минерализации Тэутэджакского рудного поля // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. Материалы XI сессии Северо-Восточного отделения ВМО «Региональная научно-практическая конференция, посвящённая 100-летию со дня рождения Ю.А. Билибина»: в 3 томах. Т. 2. Металлогения. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. – С. 168–169.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии. – М.: ГЕОС, 2000. – 227 с. – EDN: ТЮСРЛ
- Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизм очагов землетрясений. – М.: Наука, 1984. – 125 с.
- Кузнецов В.М. Схема тектонического районирования Охотско-Колымского водораздела. Масштаб 1:1 000 000. – Магадан: ФГУП «Магадангеология», 2001. – 8 листов.
- Лутиков А.И., Андреева Н.В., Габсатарова И.П., Донцова Г.Ю., Карпенко Л.И. Сейсмичность и оценка сейсмической опасности Северо-Востока РФ (Магаданская область) в масштабе, близком к масштабу ДСР // Вопросы инженерной сейсмологии. – Т. 46, № 3. – 2019. – С. 16–31. – EDN: BWZCFP
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
- Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСП-2015. Приложение А // СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. – М.: Стандартинформ, 2018. – С. 59–99. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293736/4293736459.pdf>
- Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Труды ИФЗ АН СССР; № 32 (199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
- РСН 65-87. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. – М.: Госстрой РСФСР, 1988. – 8 с.
- Сейсмоструктура северо-восточного сектора Российской Арктики / Отв. ред. Л.П. Имаева, И.И. Колодезников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 134 с.
- СП 286.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования. – М.: Минстрой, 2016. – 33 с.
- СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. – М.: Стандартинформ, 2018. – 116 с. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293736/4293736459.pdf>
- СП 283.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования. – М.: Минстрой, 2016. – 21 с.
- Global CMT Catalog Search // Global CMT Web Page [Site]. – URL: <http://www.globalcmt.org>. – Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA, 2022.
- International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2022. DOI: 10.31905/D808B830
- Mackey K.G. Seismological studies in Northeast Russia. Dissertation for the degree of PhD. – Michigan State University: Department of Geological Sciences, 1999. – 346 p.
- Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E., Stead R.J., Steck L.K., Gunbina L.V., Leyshuk N., Shibaev S.V., Koz'min B.M., Имаев В.С., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Masal'ski O.K., Gileva N.A., Bormatov V.A., Voitenok A.A., Levin Y.N., Fokina T.A. 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. – EDN: OHNJER
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – V. 84. – P. 974–1002.

Сведения об авторах

Алёшина Евгения Ильинична, нач. отдела Магаданского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (МФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Магадан, Россия. E-mail: Evgeniya@memsd.ru

Карпенко Лариса Ивановна, канд. геол.-мин. наук, уч. секретарь МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия. E-mail: Larisa@memsd.ru

Курткин Сергей Валерьевич, директор МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия. E-mail: kurs@memsd.ru

Атрохин Владимир Владимирович, нач. отдела МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия. E-mail: OTON@memsd.ru

Габдрахманова Юлия Викторовна, инженер 2 кат. МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия. E-mail: julia@memsd.ru

Seismic zoning of the Teutejak ore field area (Magadan region)

© 2023 E.A. Alyeshina, L.I. Karpenko, S.V. Kurtkin, V.V. Atrokhin,
J.V. Gabdrakhmanova

MB GS RAS, Magadan, Russia

Received July 25, 2022

Abstract. Earthquakes' nature was studied and detailed seismic zoning and seismic micro-zoning were carried out for the Teutejak ore field area (Magadan region), considering geological, geophysical and seismological data. Detailed seismic zoning was based on tectonic zoning maps of Magadan region and seismological monitoring data in the vicinity the Teutejak ore field area, carried out by MB GS RAS. 10 source zones and 8 faults generating earthquakes were identified. Hypocenters of potential maximum earthquakes were determined. They are associated with the largest deep faults (Khurensky and Chelomdzha-Yamsky) and can cause ground shake in the area of main structures. According to the results of the JSR, the initial (background) seismicity in the area of the ore field for objects with an increased level of responsiveness is 9 points, the magnitude of the most dangerous earthquake according to calculations will be $MS = 7.5$. The initial seismicity for objects with a normal level of responsibility is 8 points, the magnitude of the most dangerous earthquake will be $MS = 6.8$. The obtained results of the detailed seismic zoning were the initial estimates of seismic impacts for seismic micro-zoning. The initial seismicity for objects with a normal level of responsibility is 8 points, the magnitude of the most dangerous earthquake will be $MS = 6.8$. The calculated increment of the score and the calculated intensity of the seismic impact on the 10 areas, characterized by different engineering and geological conditions of the soils of the upper part of the section, both the method of direct registration of earthquakes and explosions, and the method of acoustic stiffness were used. The research results are shown on detailed seismic zoning map.

Keywords Seismic hazard, seismic activity, source zones, seismic shake parameters, detailed seismic zoning, seismic micro-zoning, seismic profiling.

For citation Alyeshina, E.A., Karpenko, L.I., Kurtkin, S.V., Atrokhin, V.V., & Gabdrakhmanova, J.V. (2023). [Seismic zoning of the Teutejak ore field area (Magadan region)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(1), 60-74. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.1.04>. EDN: HQCLQO

References

- Alyeshina, E.I., Godzikovskaya, A.A., Gunbina, L.V., et al. (2015). *Svodnyj Katalog zemletryasenij Severo-Vostoka Rossii s drevnejshih vremen po 1974* [Consolidated catalogue of earthquakes of the Northeast of Russia from ancient times to 1974]. Obninsk, Magadan, Russia: GS RAS Publ., 152 p. (In Russ.).
- Alyeshina, E.I., Gunbina, L.V., Ivanova, E.I., Karpenko, L.I., & Sedov, B.M. (2015). [Lankuchanskoe earthquake on December 26, 2009 with $K_R=13.0$, $MPSP=4.5$, $I_0=6-7$ (Northeast)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2009 god* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2009] (pp. 343-351). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: WGNFDF
- Global CMT Web Page. (2022). Global CMT Catalog Search. Retrieved from <http://www.globalcmt.org>
- Goncharov, V.I., Voroshin, S.V., & Sidorov, V.A. (2002). *Natalkinskoe zolotorudnoe mestorozhdenie* [Natalkinskoye gold deposit]. Magadan, Russia: NEISRI FEB RAS Publ., 250 p. (In Russ.).
- Goryachev, N.A., Sidorov, V.A., Gamyarin, G.N., Alekseenko, A.V., & Zhukov, O.V. (2001). [Preliminary data on gold-rare metal mineralization of the Teutejak ore field]. In *Problemy geologii i metallogeni Severo-Vostoka Azii na rubezhe tysyacheletij. T. 2. Metallogeniya* [Problems of geology and metallogeny of Northeast Asia at the turn of the Millennium. V. 2. Metallogeny] (pp. 16-31). Magadan, Russia: NEISRI FEB RAS Publ. (In Russ.).
- Imayev, V.S., Imayeva, L.P., & Kozmin, B.M. (2000). *Seismotektonika Yakutii* [Seismotectonics of Yakutia]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 227 p. (In Russ.). EDN: TIOCPL
- Imayeva, L.P., & Kolodeznikov, I.I. (Eds.). (2017). *Seismotektonika severo-vostochnogo sektora Rossijskoj Arktiki* [Seismotectonics of the northeastern sector of Russian Arctic]. Novosibirsk, Russia: Russian Academy of Sciences Publ., 134 p. (In Russ.).

- International Seismological Centre. (2022). On-line Bulletin. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>. DOI: 10.31905/D808B830
- Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1977). *Novyy katalog sil'nykh 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.).
- Kozmin, B.M. (1984). *Sejsmicheskie poyasa Iakutii i mekhanizm ochagov zemletryasenij* [Seismic belts of Yakutia and mechanism of earthquakes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 125 p. (In Russ.).
- Kuznetsov, V.M. (2001). *Skhema tektonicheskogo rajonirovaniya Ohotsko-Kolym'skogo vodorazdela. Masshtab 1:1 000 000* [Scheme of tectonic zoning of Okhotsk-Kolym'sky watershed. Scale 1:1,000,000]. Magadan, Russia: Magadan Federal State Unitary Enterprise «Magadangeologiya» Publ., 8 sheets. (In Russ.).
- Lutikov, A.I., Andreeva, N.V., Gabsatarova, I.P., Dontsova, G.Yu., & Karpenko, L.I. (2019). [Seismicity and assessment of the seismic hazard of the Northeast of the Russian Federation (Magadan region) on a scale close to the scale of the DSR]. *Voprosy inzhenernoj sejsmologii* [Questions of Engineering Seismology], 46(3), 16-31. (In Russ.). EDN: BWZCFP
- Mackey, K.G. (1999). *Seismological Studies in Northeast Russia. Dissertation for the degree of PhD.* Michigan State University, USA: Department of Geological Sciences Publ., 346 p.
- Mackey, K.G., Fujita, K., Hartse, H.E., Stead, R.J., Steck, L.K., Gunbina, L.V., Leyshuk, N., Shibaev, S.V., Koz'min, B.M., Imaev, V.S., Gordeev, E.I., Chebrov, V.N., Masal'ski, O.K., Gileva, N.A., Bormatov, V.A., Voitenok, A.A., Levin, Y.N., & Fokina, T.A. (2010). Seismicity map of Eastern Russia, 1960–2010. *Seismological Research Letters*, 81(5), 761-768. DOI: 10.1785/gssrl.81.5.761. EDN: OHNJER
- Medvedev, S.V., Sponheuer, W., & Karnik, V. (1965). *Shkala seismicheskoi intensivnosti MSK-64* [Seismic Intensity Scale MSK-64]. Moscow, Russia: Interdepart-
- mental Geophysical Commission of the USSR Acad. Sci. Publ., 11 p. (In Russ.).
- Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Eksperimental'naja seismika. Trudy IFZ ANSSSR N 32(199)* [Experimental seismic. Proceedings of the IPE AS USSR N 32(199)] (pp. 88-93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- RSN 65-87. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Sejsmicheskoe mikrorajonirovanie. Tekhnicheskie trebovaniya k proizvodstvu robot.* (1988). [RSN 65-87. Engineering survey for construction. Seismic microzoning. Technical requirements]. Moscow, Russia: Gosstroj RSFSR Publ., 8 p. (In Russ.).
- SP 286.1325800.2016. (2016). *Objecty stroitelniye povyshennoj otvetstvennosti. Pravila detal'nogo sejsmicheskogo rajonirovaniya* [Buildings of higher significance degree. Rules of detailed seismic zonation]. Moscow, Russia: Minstroj Publ., 33 p. (In Russ.).
- SP 14.13330.2018 (2018). *Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonakh* [Construction in seismic areas]. Moscow, Russia: Standartinform Publ., 116 p. (In Russ.). Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293736/4293736459.pdf>
- SP 14.13330.2018 (2018). *Obshchee sejsmicheskoe raionirovanie territorii Rossijskoi Federatsii OSR-2015. Prilozhenie A* [General seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-2015. Appendix A] (pp. 59–99). Moscow, Russia: Standartinform Publ. (In Russ.). Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293736/4293736459.pdf>
- SP 283.1325800.2016 (2016). *Objecty stroitelniye povyshennoj otvetstvennosti. Pravila sejsmicheskogo mikrorajonirovaniya.* [Buildings of higher significance degree. Rules of seismic microzoning]. Moscow, Russia: Minstroj Publ., 21 p. (In Russ.).
- Wells, D.L., & Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.

Information about authors

Alyeshina Evgeniya Ilyinichna, Head of Department of the Magadan Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (MB GS RAS), Magadan, Russia. E-mail: Evgeniya@memsd.ru

Karpenko Larisa Ivanovna, PhD, Scientific Secretary of the MB GS RAS, Magadan, Russia. E-mail: Larisa@memsd.ru

Kurtkin Sergey Valeryevich, Director of the MB GS RAS, Magadan, Russia. E-mail: kurs@memsd.ru

Atrokhin Vladimir Vladimirovich, Head of the Department of the MB GS RAS, Magadan, Russia. E-mail: OTON@memsd.ru

Gabdrakhmanova Julia Viktorovna, Engineer of the 2st cat. of the MB GS RAS, Magadan, Russia. E-mail: julia@memsd.ru