

УДК 550.34

## Определение исходного балла сейсмичности и проведение микрорайонирования участка основных сооружений Колымской ГЭС

© 2022 г. Е.И. Алёшина<sup>1</sup>, Л.И. Карпенко<sup>1</sup>, С.В. Курткин<sup>1</sup>, **Б.М. Седов<sup>1</sup>**,  
Е.И. Ведерников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия;

<sup>2</sup>АО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка», г. Дубна, Россия

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

**Аннотация.** С учётом геолого-геофизических и сейсмологических материалов для района Колымской ГЭС раскрыта природа землетрясений, проведено детальное сейсмическое районирование (ДСР) и сейсмомикрорайонирование (СМР). Исходными материалами ДСР являлись схемы тектонического районирования Магаданской области, данные сейсмологического мониторинга в окрестностях сооружений ГЭС, проводимого Магаданским филиалом ФИЦ ЕГС РАН. Выделено восемь зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) и десять разломов, генерирующих землетрясения. Определено местоположение очагов потенциально возможных максимальных землетрясений. Они приурочены к крупнейшим глубинным разломам – Дебинскому, Чай-Юрьинскому и Улахан – и могут вызвать сотрясения в районе основных сооружений интенсивностью  $I=8.8$ , 8.5 и 8.4 баллов, что согласуется с картой ОСР-2015-С, выбранной в качестве основной для объектов с повышенным уровнем ответственности. По результатам ДСР исходная сейсмичность района Колымской ГЭС по карте ОСР-2015-С составила 8.8 баллов. При повторяемости ~5000 лет магнитуда наиболее опасного для сооружений Колымской ГЭС землетрясения составит  $M=6.5$  при эпицентральной расстоянии 10 км. Полученные результаты ДСР явились исходными оценками сейсмических воздействий при проведении СМР. Основой СМР является качество грунтов верхней части разреза, на которых построены сооружения. В качестве эталонного был выбран участок выхода скальных грунтов, где исходная сейсмичность с учётом ДСР составила 7.8 балла. Расчётным путём получены приращения балльности и расчётная интенсивность сейсмического воздействия на участках основных сооружений КГЭС. При этом на участках, характеризующихся различными инженерно-геологическими условиями грунтов верхней части разреза, использовался как метод непосредственной регистрации землетрясений и взрывов, так и метод сейсмических жёсткостей. По данным обоих методов, расчётная сейсмичность района основных сооружений Колымской ГЭС составила 8 баллов с периодом повторяемости 1 раз в 5000 лет, что на 1 балл ниже карты ОСР-2015-С.

**Ключевые слова:** Колымская ГЭС, ДСР, сейсмичность, сеймотектоника, зоны ТМА, ПВМЗ, зоны ВОЗ, СМР, сейсмопрофилирование.

**Для цитирования:** Алёшина Е.И., Карпенко Л.И., Курткин С.В., Седов Б.М., Ведерников Е.И. Определение исходного балла сейсмичности и проведение микрорайонирования участка основных сооружений Колымской ГЭС // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 97–111. DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.07. – EDN: BKVSVM

### Введение

Колымская ГЭС им. Ю.И. Фриштера является основой энергосистемы Магаданской области. Первый агрегат был запущен в 1981 году. Станция находится в зоне вечной мерзлоты, имеет внутрискальное расположение машинного зала.

Целью исследований являются уточнение сейсмических условий территории размещения основных сооружений ГЭС на основе карты общего сейсмического районирования ОСР-2015-С, обследование строения массива горных пород, оценка возможных сейсмических воздействий проектных землетрясений и сейсмическое микрорайонирование (СМР) территории.

Полевые работы на участках основных сооружений Колымской ГЭС проведены в летний период 2019 года. Исходными материалами ДСР являлись схемы тектонического районирования Магаданской области, данные сейсмологического мониторинга, проводимого Магаданским филиалом ФИЦ ЕГС РАН в окрестностях сооружений Колымской ГЭС.

За весь период инструментальных наблюдений (1967–2020 гг.) интенсивность сотрясений в районе основных сооружений Колымской ГЭС не превышала 5 баллов, что существенно ниже, чем указано на картах общего сейсмического районирования территории РФ ОСР-2015 [Уломо́в, Шумилина, 2015].

Сейсмическое районирование Колымской ГЭС проводилось как в предпостроечный период, так и по завершению строительства.

По карте СР-78 исходная (фоновая) сейсмичность района Колымской ГЭС для грунтов II категории составляла 7 баллов со средней повторяемостью раз в 10000 лет. По оценке сейсмической опасности района строящейся Колымской ГЭС 7-балльные сотрясения могут проявляться 1 раз в 2–3 тысячи лет с возможным приращением сейсмических эффектов на 1.5 балла на некоторых наиболее неблагоприятных в сейсмическом отношении участках в пределах промплощадки. После заполнения водохранилища ГЭС прогнозировалось увеличение вероятности 7-балльных сотрясений в этой зоне в 10 раз [Мишин и др., 1977].

С выходом в свет новой карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 (ОСР-2015) район Колымской ГЭС оказался в 8-балльной зоне по карте ОСР-97-В и в 9-балльной зоне – по карте ОСР-97-С [Уломо́в, Шумилина, 2015].

В результате проведённых в 2005 г. работ по уточнению исходной сейсмичности района основных сооружений Колымской ГЭС установлено: для проектного землетрясения интенсивность сотрясений составит 7 баллов, для максимального расчётного землетрясения – 9 баллов на средних по сейсмическим свойствам грунтах (Бесстрашнов В.М., Степанов В.В., Годзи́ковская А.А. Отчёт «Уточнение исходной сейсмичности района расположения основных сооружений Колымской ГЭС на р. Колыме». М.: ОАО «Инженерный центр ЕАС Гидропроект, Ленгидропроект, Теплоэлектропроект, фирма ОРПРЭС», 2005. 110 с.).

Проведённые в 2009 г. исследования показали, что участок основных сооружений Колымской ГЭС по сейсмоакустическим свойствам

гранитов, морфологии является исключительно благоприятным в сейсмическом отношении, что является основанием для понижения расчётной интенсивности сотрясений до 7 баллов с периодом повторяемости 1 раз в 1000 лет по ОСР-97-В (Седов Б.М., Алёшина Е.А., Гунбина Л.В., Курткин С.В. Отчёт «Инструментальные сейсмологические наблюдения для сейсмического микро-районирования участка основных сооружений Колымской ГЭС». Магадан: МФ ГС РАН, 2009. 130 с.).

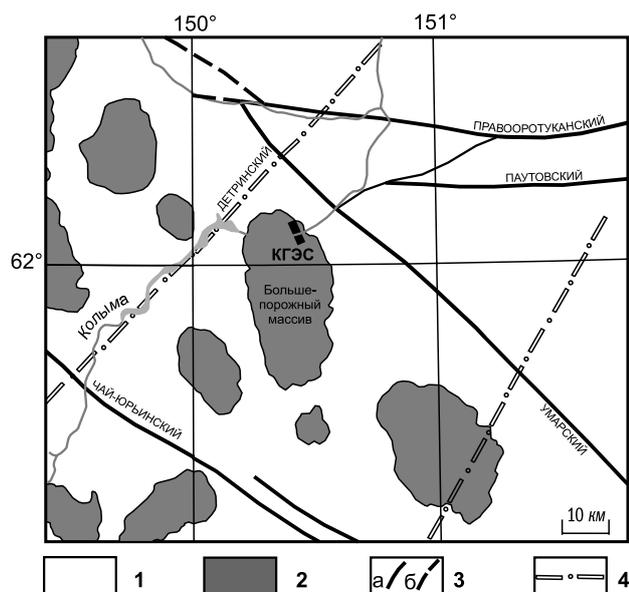
По данным ООО «Центр геодинамических исследований», в 2010 г. (с учётом грунтовых условий и прогнозируемого по данным теплофизических расчётов оттаивания многолетнемерзлых грунтов) основания сооружений находятся в нормальных эксплуатационных условиях.

Новые геолого-геофизические и сейсмологические материалы, значительные изменения верхней части разреза (ВЧР) на участках основных сооружений (удаление разрушенных гранитов, зачистки под постройки, оттайка пород, подземное строительство), высокая динамика процессов развития сейсмичности вновь потребовали проведения ДСР и СМР.

#### **Основные сведения о сейсмотектонике района исследований**

Сооружения Колымской ГЭС находятся в пределах юго-восточной части сейсмического пояса Черского северо-западного простирания [Имаев и др., 2000; Сейсмотектоника ..., 2017]. По геолого-геофизическим данным рассматриваемый район приурочен к системе поперечных (по отношению к генеральному простиранию пояса) разломов, образующих системы субпараллельных зон дизъюнктивных нарушений [Кузнецов, 2001]. По косвенным признакам и характеру проявления на дневной поверхности эти нарушения отнесены к скрытым разломам фундамента. К одному из них – Детринскому, на участке между гранитными интрузиями Малых и Больших порогов – приурочена долина реки Колымы, которая пересекает массив в субширотном направлении (рис. 1).

Участок основных сооружений Колымской ГЭС расположен в пределах северо-западной части Большепорожского гранитоидного массива, который по геологическим данным является батолитоподобным, относящимся к Колымскому интрузивному комплексу [Кузнецов, 2001]. В пределах основных сооружений граниты однородны по составу. Массив Больших порогов



**Рис. 1.** Тектоническая схема участка Колымской ГЭС [Кузнецов, 2001].

1 – терригенный комплекс чехла срединных массивов; 2 – гранитоидные массивы; 3 – глубинные разломы установленные (а), предполагаемые (б); 4 – скрытые разломы фундамента

имеет слегка вытянутую на юг эллипсоидную форму и занимает площадь около 600 км<sup>2</sup>.

По геофизическим данным Большепорожская интрузия имеет максимальную мощность гранитов в центре, её значение – 4–5 км. Границы параллельны простиранию вмещающих складчатых структур. Её поверхность по данным картирования погружается под вмещающие осадочные породы: на западе под углами 50–60°, на севере – 80–90°, на востоке – 70–80°. Интрузив сложен порфировидными биотитовыми гранитами верхнеюрского – нижнемелового возраста. Граниты Больших порогов на северо-западе прорывают и метаморфизуют среднеюрские алевролитоглинистые сланцы. В обнажениях граниты разделены на блоки различного объёма с субвертикальными и субгоризонтальными поверхностями [Воронков, 2009]. На космических снимках на Большепорожском гранитном массиве отчетливо дешифрируются линеаменты субмеридионального простирания с характерными признаками активных разломов. С их положением совпадает зона эпицентров слабых землетрясений, которая с юга примыкает непосредственно к участку ГЭС. Разломы северо-восточного и широтного простирания практически не выражены ни в рельефе, ни на космоснимках, что позволяет отнести их к неактивным в настоящее время.

### Детальное сейсмическое районирование

Площадь детальных сейсмологических исследований ограничена в координатах  $\varphi=60.7-63.5^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=147.0-153.5^{\circ}\text{E}$  и представляет трапецию, в центре которой располагаются сооружения Колымской ГЭС. В пределах этой территории на расстоянии ~150 км от объекта находятся основные сейсмогенные зоны, землетрясения которых проявляются максимальными сотрясениями на площади сооружений Колымской ГЭС.

### Анализ сейсмического режима

Для анализа сейсмического режима района Колымской ГЭС составлен сводный каталог землетрясений. Источниками данных служили: «Сводный каталог землетрясений Северо-Востока России с древнейших времён по 1974 г.» [Алёшина и др., 2015]; каталоги, опубликованные в ежегодных сборниках («Землетрясения в СССР» за 1965–1990 гг., «Землетрясения Северной Евразии» за 1991–2015 гг., «Землетрясения России» за 2016–2019 гг.); каталог за 2020 г. из годового отчёта о научно-исследовательской работе Магаданского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

Сводный каталог охватывает период времени с 1924 г. по октябрь 2020 года. За это время в пределах рассматриваемой территории локализованы эпицентры более 1685 сейсмических событий с энергетическим классом  $K_p=4.0-14.0$ .

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  $M_s$ . Зависимость между магнитудой  $M_s$  и классом  $K_p$  рассчитывалась по формуле 1, полученной в [Лутиков и др., 2019] для Магаданской области:

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

Из сводного каталога были исключены: афтершоки, землетрясения роевых последовательностей; события, которые отмечены в каталоге как «вероятно взрыв»; заведомо непредставительные землетрясения с магнитудами  $M_s \leq 1.7$  ( $K_p \leq 7.0$ ). После этого сводный каталог состоял из 937 землетрясений с магнитудой  $M_s=1.8-5.5$  ( $K_p=7.1-14.0$ ).

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

Регулярные наблюдения в районе Колымской ГЭС начались с 1968 года. В табл. 1 выделены периоды представительной регистрации землетрясений для разных магнитуд. Анализ табл. 1 показал, что низшей представительной магнитудой является  $M_S=2.0$  в период 2011–2020 гг.

После выделения периодов представительной регистрации землетрясений был сформирован сводный представительный каталог землетрясений района Колымской ГЭС. В него вошли 472 землетрясения с магнитудами  $M_S=2.0-5.5$ ,

зарегистрированные за период с 1968 по 2020 г. включительно. По данным этого каталога построен график повторяемости.

В табл. 2 показано распределение количества землетрясений по интервалам представительных наблюдений и магнитудам.

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

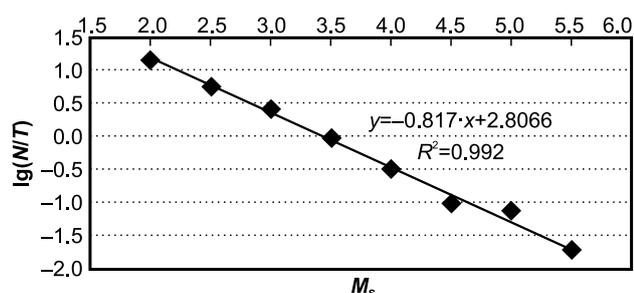
**Таблица 1.** Распределение количества землетрясений в сводном каталоге по годам и магнитудам

| Годы        | $M_S$ |     |     |     |     |     |     |     | $N$ |
|-------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             | 2.0   | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 |     |
| 1924–1967   |       |     |     |     | 1   |     | 1   | 1   | 3   |
| 1968–1975   | 24    | 85  | 25  | 11  | 2   | 1   | 1   | 1   | 150 |
| 1976–1980   | 25    | 66  | 11  | 6   | 3   | 1   |     |     | 112 |
| 1981–1985   | 35    | 34  | 10  | 4   | 1   |     | 2   |     | 86  |
| 1986–1990   | 22    | 16  | 10  | 6   | 1   |     |     |     | 55  |
| 1991–1995   | 16    | 17  | 12  | 3   | 4   | 2   |     |     | 54  |
| 1996–2000   | 12    | 16  | 17  | 6   | 2   | 1   |     |     | 54  |
| 2001–2005   | 37    | 30  | 17  | 7   | 3   |     |     |     | 94  |
| 2006–2010   | 57    | 29  | 8   | 6   | 1   |     |     |     | 101 |
| 2011–2015   | 78    | 26  | 14  |     | 1   |     | 1   |     | 120 |
| 2016–2020   | 65    | 27  | 15  | 2   |     |     |     |     | 109 |
| $N$         | 371   | 346 | 139 | 51  | 18  | 5   | 5   | 2   | 937 |
| $N_{пред.}$ | 143   | 112 | 139 | 51  | 17  | 5   | 4   | 1   | 472 |

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

| $M_S$ | Годы      | $T_{пред.}$ лет | $N$ | $N/T$    | $\lg(N/T)$ |
|-------|-----------|-----------------|-----|----------|------------|
| 2.0   | 2011–2020 | 10              | 143 | 14.3     | 1.155336   |
| 2.5   | 2001–2020 | 20              | 112 | 5.6      | 0.748188   |
| 3.0   | 1968–2020 | 53              | 139 | 2.622642 | 0.418739   |
| 3.5   | 1968–2020 | 53              | 51  | 0.962264 | -0.016706  |
| 4.0   | 1968–2020 | 53              | 17  | 0.320755 | -0.493827  |
| 4.5   | 1968–2020 | 53              | 5   | 0.094340 | -1.025306  |
| 5.0   | 1968–2020 | 53              | 4   | 0.075472 | -1.122216  |
| 5.5   | 1968–2020 | 53              | 1   | 0.018868 | -1.724276  |

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.



**Рис. 2.** График повторяемости землетрясений района Колымской ГЭС в интервале магнитуд 2.0–5.5

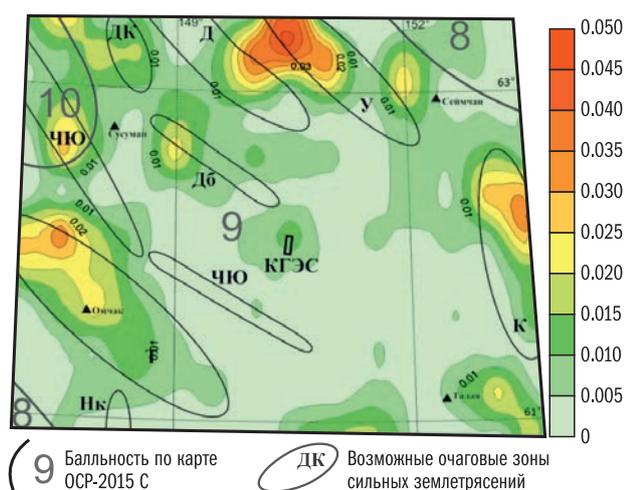
Формула графика повторяемости имеет вид:

$$\lg(N/T_{\text{пред}}) = -0.8171 \cdot M_s + 2.8066, R_c = 0.992. \quad (2)$$

Наклон графика повторяемости для района Колымской ГЭС по магнитуде  $M_s$  равен  $b=0.8171$ , что близко к значению ( $b=0.88$ ), полученному в предыдущих исследованиях для Магаданской области [Лутиков и др., 2019].

### Сейсмическая активность

Для детального знания повторяемости землетрясений на рассматриваемой территории строилась матрица сейсмической активности  $A_{3,3}$ , являющаяся аналогом сейсмической активности  $A_{10}$ , которая с матрицей  $M_{\text{max}}$  используется для расчёта сейсмической сотрясаемости [Ризниченко, 1979]. В матрице сейсмической активности  $A_{3,3}$  магнитуда  $M_{3,3}$  соответствует землетрясениям с энергетическим классом  $K=10$ . Значения  $A_{3,3}$  отнесены к центрам узлов координатной сетки. Расчёты велись для ячеек размером  $0.25^\circ$  по широте и  $1^\circ$  по долготе (рис. 3).



**Рис. 3.** Карта сейсмической активности  $A_{3,3}$  в районе сооружений Колымской ГЭС.

В центре рисунка прямоугольником выделена площадка основных сооружений Колымской ГЭС; треугольник — сейсмические станции

Полученное распределение сейсмической активности  $A_{3,3}$  позволило выделить зоны, которые отличаются повышенным уровнем сейсмичности, значительно превышающим окружающие участки. Значение сейсмической активности  $A_{3,3}$  на площадке Колымской ГЭС составило  $A_{3,3}=0.013$ . Максимальные значения сейсмической активности  $A_{3,3}$  в районе исследований достигают  $A_{3,3}=0.043$ . Они вполне согласуются с ранее полученными значениями  $A_{3,3}=0.01–0.05$  [Лутиков и др., 2019].

### Сильные землетрясения в районе Колымской ГЭС и их макросейсмические проявления

Сильнейшие землетрясения зарегистрированы на севере территории в 1924 г. с магнитудой  $M=5.5$ , в 1972 г. с  $M=4.9$  (Эльгенское-I), в 2014 г. с  $M=4.5$  (Эльгенское-II); на востоке в 1972 г. с  $M=5.7$  (Кулинское); на западе в 1981 г. с  $M=6.0$  (Купкинское) (рис. 4). Гипоцентры землетрясений расположены в пределах земной коры на глубинах  $h \leq 46$  км. Большинство событий, в том числе и самые сильные, сконцентрированы в диапазоне глубин 5–14 км. Для сильнейших землетрясений, произошедших в окрестностях Колымской ГЭС, имеются параметры механизмов очагов, по которым определялся тип подвижки по разлому и угол наклона плоскости падения [Козьмин, 1984; Сейсмотектоника ..., 2017; Global ..., 2020].

Артыкское землетрясение с  $M=6.6–7.1$  — самое сильное сейсмическое событие из инструментально зарегистрированных в системе сейсмического пояса Черского. Оно произошло 18 мая 1971 г. [Козьмин, 1984; Алёшина и др., 2015; ISC ..., 2020]. Сооружения Колымской ГЭС находились на расстоянии 308 км ( $\Delta=308$  км) юго-восточнее эпицентра, в 4-балльной зоне сотрясений.

Кулинское землетрясение с  $M=5.7$  ( $K=14$ ) произошло 13 января 1972 г. [Козьмин, 1984; Алёшина и др., 2015]. Интенсивность сотрясений в районе Колымской ГЭС ( $\Delta=174$  км) составила 4 балла.

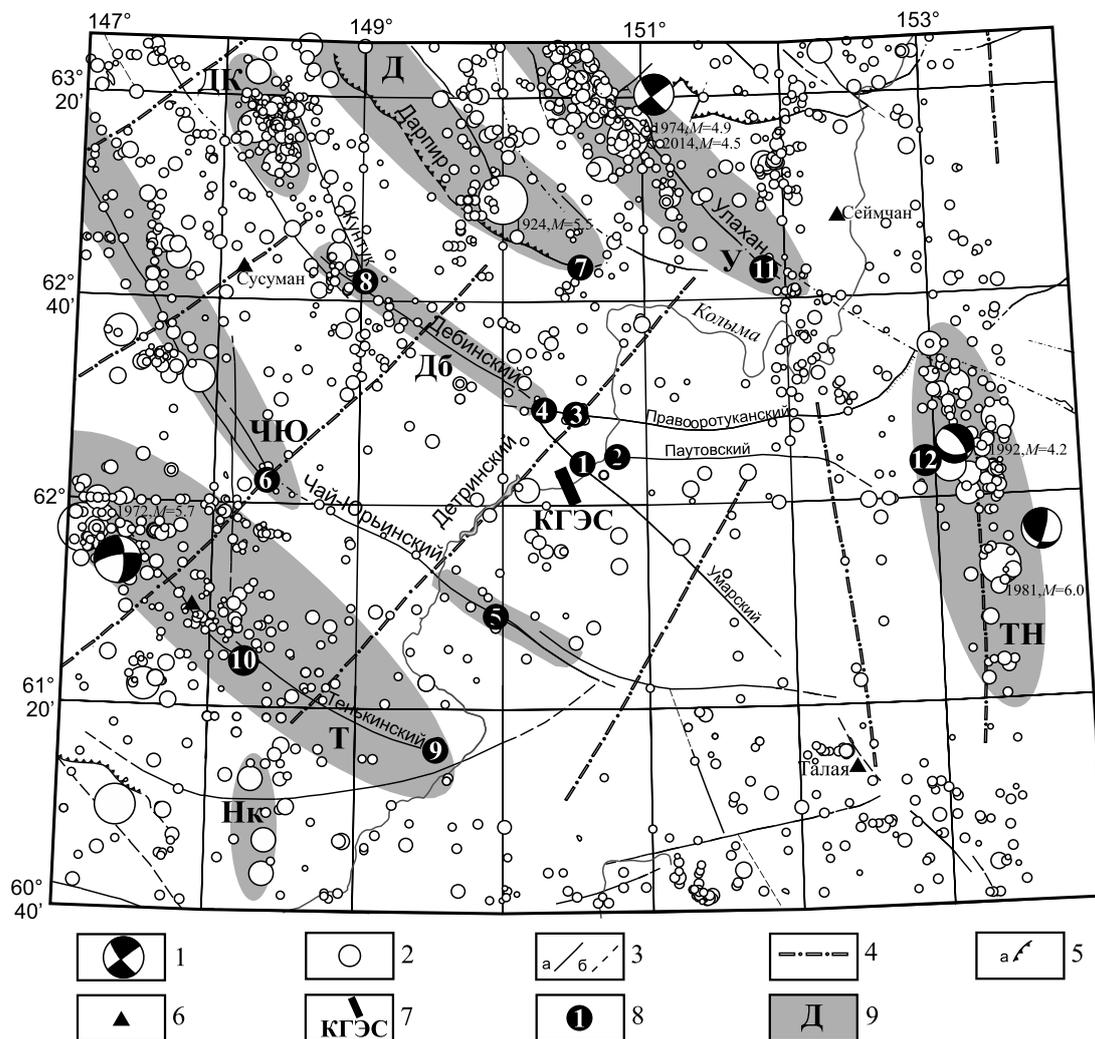
Эльгенское землетрясение с  $M=5.1$  ( $K=13$ ) зарегистрировано 19 июня 1974 г. [Козьмин, 1984]. Сооружения Колымской ГЭС ( $\Delta=129$  км) находилось в 5-балльной зоне сотрясений.

Купкинское землетрясение с  $M=5.2$  ( $K=13.3$ ) зарегистрировано 8 ноября 1981 г. ( $\Delta=161$  км). Колымская ГЭС находилась в 3–4-балльной зоне сотрясений [Владимирова и др., 1984]. Землетрясение с энергетическим классом  $K=10.8$  произошло 28 мая 1983 г. на расстоянии 13 км от основных сооружений КГЭС, макросейсмических проявлений этого землетрясения не отмечено.

### Промышленные взрывы

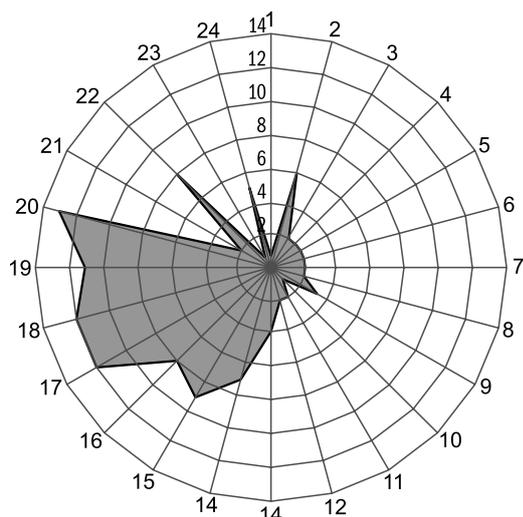
При изучении сейсмичности района Колымской ГЭС анализировались бюллетени станций с целью исключения из каталога промышленных взрывов. Выбраны сейсмические события с энергетическим классом  $K \leq 8.6$ , зарегистрированные в непосредственной близости от сооружений Колымской ГЭС на площади, ограниченной в координатах  $\varphi = 61.7\text{--}62.3^\circ\text{N}$  и  $\lambda = 149.0\text{--}151.0^\circ\text{E}$ . Их анализ показал, что 65% событий приурочено к узкому интервалу времени суток: 14–20 час местного времени (рис. 5). Из этого списка 43% событий произошли в

1974–1975 гг. (весь период наблюдений 1967–2019 гг.). Всё это даёт основание отнести их к промышленным взрывам. Эти сейсмические события исключены из каталога землетрясений, они не учитывались при анализе сейсмичности территории. Отметим, что вблизи сооружений Колымской ГЭС в 2018–2019 гг. велись взрывные работы на полигонах ручьёв Конго-Агач ( $\Delta = 22\text{ км}$ ) и Эльгенья ( $\Delta = 61\text{ км}$ ). Максимальный энергетический класс зарегистрированных на этих объектах промышленных взрывов  $K = 8.6$ , местное время проведения взрывных работ – с 17 до 20 часов.



**Рис. 4.** Положение основных сейсмогенерирующих разломов и зон ВОЗ в районе сооружений Колымской ГЭС, механизмы очагов сильнейших зарегистрированных землетрясений и очаги потенциально возможных максимальных землетрясений.

1 – механизм очага землетрясения в проекции нижней полусферы, зачернена область волн сжатия; 2 – эпицентры землетрясений; 3 – крупнейшие разломы установленные (а), предполагаемые (б); 4 – скрытые разломы фундамента; 5 – краевые ограничения шарьяжей; 6 – сейсмическая станция; 7 – сооружения Колымской ГЭС; 8 – очаг ПМЗ; 9 – зоны ВОЗ: ЧЮ – Чай-Юрьинская, Т – Тенькинская, ДК – Дебин-Кунтукская, Дб – Дебинская, Д – Дарпирская, У – Улаханская, К – Купкинская, Нк – Нелькобинская



**Рис. 5.** Диаграмма распределения событий по времени суток в пределах координат 61.7–62.3°N, 149–151°E за период 1967–2019 гг.

### 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 десять глубинных разломов, которые являются основными сейсмогенерирующими структурами района работ, определено местоположение потенциальных очагов землетрясений (3-1–3-12), от которых сейсмический эффект на площадках объектов 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) вблизи сооружений Колымской ГЭС, будем исходить из установленной для сейсмически активных регионов связи максимальной магнитуды землетрясений с длиной глубинного разлома [Wells, Coppersmith, 1994]. Используем 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]:

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

где  $I_0$  – расчётная интенсивность сотрясения в эпицентре;  $M$  – магнитуда землетрясения;  $h$  – глубина очага землетрясения;  $\Delta$  – эпицентральный расстояние.

Разломы Умарский, Паутовский и Правооротуканский за весь период наблюдений были практически асейсмичны. К Умарскому разлому тяготеют семь событий с  $K=6.5–8.0$ , которые идентифицированы нами как промышленные взрывы. Паутовский разлом – асейсмичен, к Правооротуканскому разлому приурочены три слабые землетрясения, зарегистрированные в 2013, 2014 и 2018 гг. с низким энергетическим классом ( $K=6.7–7.8$ ). На рис. 3 показаны эпицентры потенциально возможных максимальных землетрясений (ПВМЗ), связанных с этими разломами (3-1, 3-2, 3-3).

Максимальная расчётная интенсивность сотрясений в районе сооружений Колымской ГЭС  $I=10.3$  балла при потенциально возможном максимальном землетрясении 3-1 с расчётной магнитудой  $M=7.5$  в зоне Умарского разлома на расстоянии 10 км от объекта (табл. 3). Вероятность подобного события не поддаётся расчёту, поскольку неизвестна скорость подвижек Умарского разлома. Его вероятность – вне карты ОСР-2015-С, т.е. его повторяемость реже, чем 1 раз в 5000 лет ( $<0.5\%$ ).

Большинство землетрясений, в том числе и самые сильные, приурочены к крупнейшим глубинным разломам: Дебинскому, Чай-Юрьинскому и Улахан. Наиболее опасны для сооружений Колымской ГЭС очаги потенциально возможных максимальных землетрясений ПВМЗ 3-4, 3-5 и 3-11, приуроченные к этим активным разломам. Они могут вызвать сотрясения в районе основных сооружения Колымской ГЭС интенсивностью  $I=8.8, 8.5$  и  $8.4$  баллов (табл. 3), что согласуется с картой ОСР-2015-С с периодом повторяемости 5000 лет. Необходимо отметить, что при вероятностном анализе сейсмической опасности рассматривались самые неблагоприятные условия.

### Зоны ВОЗ

Для прогнозного анализа сейсмической опасности в окрестностях сооружений Колымской ГЭС определено положение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). Большинство очагов связано с активными тектоническими разломами. Выделены восемь зон ВОЗ: Чай-Юрьинская, Тенькинская, Дебин-Кунтукская, Дебинская, Дарпирская, Улаханская, Купкинская и Нелькобинская. Характеристики зон представлены в табл. 4. Оценка расчётной интенсивности сотрясений на площадке проведена по формуле (4).

Таблица 3. Характеристики сейсмогенных разломов

| Название разлома                        | Длина, км | Глубина очага максимального землетрясения, км | Минимальное расстояние от сооружений КГЭС до очага, км | Максимальная расчётная магнитуда $M$ по длине разлома | Максимальная расчётная интенсивность сотрясений на площадке (по расч. $M$ ), балл | Расчётная магнитуда ПВМЗ, период повторяемости 5000 лет, карта С – 9 баллов |
|---|-----------|---|--|---|---|---|
| Умарский (З-1)                          | 131       | –   | 10   | 7.5   | 10.3  | 6.5   |
| Паутовский (З-2)                        | 96        | 5   | 22   | 7.3   | 9.2   | 7.2   |
| Правооротуканский (З-3)                 | 158       | 6   | 27   | 7.6   | 9.4   | 7.4   |
| Дебинский южный сегмент (З-4)           | 101       | 5   | 29   | 7.3   | 8.8   | 7.4   |
| Чай-Юрьинский средний сегмент (З-5)     | 185       | 8   | 53   | 7.7   | 8.5   | 8.0   |
| Чай-Юрьинский северный сегмент (З-6)    | 250       |   | 107  | 7.9   | 7.7   | 8.7   |
| Дарпир (З-7)                            | 120       | 15  | 80   | 7.4   | 7.4   | 8.5   |
| Кунтук (З-8)                            | 77        | 5   | 104  | 7.1   | 6.6   | 8.7   |
| Тенькинский южный сегмент (З-9)         | 85        | 6   | 106  | 7.2   | 6.7   | 8.7   |
| Тенькинский средний сегмент (З-10)      | 78        |   | 126  | 7.1   | 6.3   | 8.9   |
| Улахан северный сегмент (З-11)          | 314       | 5   | 108  | 8.1   | 8.4   | 8.7   |
| Улахан скрытый разлом фундамента (З-12) | ~110      | 46  | 130  |   |   | 9.0   |

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 сооружений ГЭС, км | Расчётная интенсивность сотрясений в районе ГЭС, балл |
|-------------------|--|--------------------------------------|--|-------------------|---------------------------------|---|---|
| Чай-Юрьинская     | 170×45   | 11                                   | 16.06.1994<br>$K_p=12.0, M=4.5$                      | 8                 |                                 | 137   | 2.3   |
| Тенькинская       | 190×50   | 19                                   | Кулинское<br>13.01.1972<br>$K_p=14.0, M=5.7$         | 24                | правосторонний сдвиг со сбросом | 174   | 4.9   |
| Дебин-Кунтукская  | 55×25  | 6                                    | 29.07.2000<br>$K_p=11.8, M=4.4$                      | 6                 |                                 | 172   | 1.8   |
| Дебинская         | 101×15   | 3                                    | 17.10.1988<br>$K_p=10.8, M=3.9$                      | 5                 |                                 | 117   | 1.6   |
| Дарпирская        | 135×32   | 5                                    | 13.03.1924<br>$K_p=14.0, M=5.5$                      | 15                |                                 | 107   | 4.1   |
| Улаханская        | 132×27   | 14                                   | Эльгенское<br>19.06.1974<br>$K_p=13.0, M=5.1$        | 13                | сдвиг                           | 129   | 3.3   |
| Купкинская        | 145×40   | 13                                   | Купкинское<br>08.11.1981<br>$K_p=13.3, M=5.2$        | 46                | левосторонний сбросо-сдвиг      | 161   | 4.2   |
| Нелько-бинская    | 60×20  | 5                                    | 20.08.1973<br>$K_p=11.0, M=4.0$                      | 5                 |                                 | 154   | 1.3   |

Примечание: расчётная интенсивность сотрясений определена по максимальному землетрясению в каталоге.

### **Выводы по ДСР**

1. Наклон графика повторяемости для района Колымской ГЭС по магнитуде  $M_s$  равен  $b=0.82$ .

2. Значение сейсмической активности  $A_{3,3}$  на площадке Колымской ГЭС составило  $A_{3,3}=0.013$ . Максимальные значения сейсмической активности  $A_{3,3}$  в районе исследований достигают  $A_{3,3}=0.043$ .

3. В окрестностях сооружений Колымской ГЭС выделены восемь зон ВОЗ и десять разломов, генерирующих землетрясения. Определено местоположение потенциальных очагов землетрясений, от которых сейсмический эффект на площадках сооружений Колымской ГЭС может быть максимальным.

4. Очаги ПМЗ 3-1, 3-2 и 3-3 приурочены к асейсмичным разломам Умарскому, Паутовскому и Правооротуканскому соответственно. Вероятность возникновения подобных событий – вне карты ОСР-2015-С (выбранной заказчиком), т.е. их повторяемость реже, чем 1 раз в 5000 лет (<0.5%).

5. Согласно механизмам очагов сильнейших землетрясений, современные типы подвижек по разломам – сдвиги, надвиги, сбросы и взбросы. Вблизи эпицентров землетрясений преобладают субвертикальные смещения (70–90°).

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

7. Самое опасное для сооружений Колымской ГЭС – то, что очаг потенциально возможного максимального землетрясения ПМЗ 3-4 приурочен к Дебинскому активному разлому. Это может вызвать сотрясения в районе основных сооружений Колымской ГЭС интенсивностью  $I=8.8$  баллов (табл. 3). Отметим, что по карте макросейсмической балльности Магаданской области при среднем периоде повторения сейсмических воздействий 1 раз в 5000 лет расчётный сейсмический балл в районе сооружений Колымской ГЭС составляет 8.0–8.5 [Лутиков и др., 2019].

8. По результатам ДСР исходную сейсмичность района сооружений Колымской ГЭС следует принять – 8.8 баллов, что согласуется с картой ОСР-2015-С.

### **Сейсмическое микрорайонирование (СМР)**

#### **Геологическая характеристика площадок основных сооружений Колымской ГЭС**

Основой СМР является качество грунтов верхней части разреза, на которых построены

сооружения [Медведев и др., 1965]. В связи с этим рассмотрим основные особенности геологического строения района основных сооружений Колымской ГЭС. Сооружения ГЭС расположены в западной части Большепорожной интрузии. Основные сооружения, включая подземные, построены в среднезернистых, реже крупнозернистых разностях гранитов. Рельеф поверхности в районе основных сооружений ГЭС представляет молодую невыработанную V-образную долину р. Колымы шириной менее 800 м. Долина асимметрична – левый берег крутой (25–30°), правый – более пологий. Отдельные сооружения Колымской ГЭС имеют следующие особенности. Подводящий напорный туннель и стационарный узел находятся в гранитах левого берега ниже зоны выветривания пород в благоприятных инженерно-геологических условиях. Граниты массива, в зависимости от параметров трещиноватости, характеризуются анизотропией геомеханических свойств [Воронков, 2009]. Водосбросный канал, в основном, проходит в слабо- и среднетрещиноватых крупнообломочных гранитах. Каменно-набросная плотина ГЭС расположена на сильно проницаемых грунтах. При строительстве гидротехнических сооружений с поверхности гранитов были удалены рыхлые породы разного генезиса, в том числе сильнотрещиноватые граниты. Комплекс работ осуществлялся в соответствии с нормативными документами [СНиП II-7-81\*; РСН 65-87].

#### **СМР методом регистрации землетрясений**

Для определения сотрясения поверхности при землетрясениях на отдельных площадках Колымской ГЭС были установлены временные сейсмостанции (рис. 6). Созданная локальная сеть сейсмических станций района сооружений Колымской ГЭС позволила регистрировать сейсмические события энергетического класса  $K \geq 8.1$  на эпицентральных расстояниях до ~390 км.

В качестве эталонного выбран участок выхода скальных грунтов (блочных гранитов) в месте установки сейсмостанции М1 (рис. 6). Методом сейсмического профилирования по профилю 71 нами установлена скорость продольных волн  $V_p=2.526$  км/с и поперечных волн  $V_s=1.361$  км/с. Объёмная плотность гранитов Большепорожной интрузии, по данным замеров (276 образцов), является типичной для Колымских гранитов  $\rho=2.63$  г/см<sup>3</sup> [Мишин и др., 1977]. Эти грунты относятся к I категории по сейсмическим свойствам, они приняты в качестве эталонных. Величина исходной сейсмичности здесь уменьшается на 1 балл в соответствии с табл. 1 СНиП II-7-81. Согласно ДСР, исходную сейсмичность района

сооружений Колымской ГЭС следует принять по карте ОСР-2015-С – 8.8 баллов. С учётом данного обоснования, исходная сейсмичность на эталонном участке станция (М1 и сейсмологический профиль 71) составляет 7.8 балла.

Для определения приращения балльности  $\Delta I$  на различных участках использовали записи 13 местных землетрясений с  $K=8.1-13.2$ , зарегистрированных на эпицентральных расстояниях  $\Delta=119-392$  км. Данные станций по слабым землетрясениям (с  $K \leq 8$ ) исключались из расчётов как малодостоверные из-за влияния шумов. Использовались максимальные амплитуды поперечной волны  $S$ , измерялся полный вектор амплитуды по горизонтальным составляющим  $NS$  и  $EW$ . Каталог использованных землетрясений представлен в табл. 5.

Для определения приращения балльности применено соотношение [РСН 65-87]:

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

где  $\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности (в баллах);  $A_i$  – максимальная амплитуда колебаний на исследуемом участке;  $A_3$  – максимальная амплитуда колебаний на эталонном участке.

Полученные приращения балльности  $\Delta I$  на площадках Колымской ГЭС и значения интенсивности сейсмического воздействия по карте ОСР-2015-С (период повторяемости – один раз в 5000 лет) приведены в табл. 6.

**Таблица 5.** Параметры землетрясений, использованных для определения приращения балльности

| Дата |    |      | Время в очаге |    |      | Координаты эпицентра |                | Глубина,<br>км | Энергетический<br>класс $K_p$ | Магнитуда<br>$M$ |
|------|----|------|---------------|----|------|----------------------|----------------|----------------|-------------------------------|------------------|
| дд   | мм | гггг | чч            | мм | сс.с | $\varphi$ , °N       | $\lambda$ , °E |                |                               |                  |
| 31   | 7  | 2019 | 8             | 29 | 20.1 | 59.82                | 144.80         | 2              | 13.2                          | 5.1              |
| 31   | 7  | 2019 | 16            | 3  | 15.0 | 59.90                | 144.71         | 1              | 10.1                          | 3.6              |
| 21   | 8  | 2019 | 15            | 52 | 25.6 | 62.64                | 157.17         | 10             | 8.3                           | 2.7              |
| 21   | 8  | 2019 | 20            | 38 | 58.2 | 62.62                | 157.56         | 0              | 10.5                          | 3.8              |
| 22   | 8  | 2019 | 20            | 27 | 33.2 | 63.46                | 146.40         | 30             | 10.6                          | 3.8              |
| 23   | 8  | 2019 | 0             | 38 | 21.4 | 58.91                | 151.55         | 33             | 8.4                           | 2.7              |
| 23   | 8  | 2019 | 5             | 18 | 6.7  | 62.58                | 157.77         | 0              | 9.0                           | 3.0              |
| 26   | 8  | 2019 | 11            | 40 | 53.7 | 58.85                | 151.58         | 0              | 9.5                           | 3.3              |
| 28   | 8  | 2019 | 1             | 40 | 43.4 | 62.94                | 145.53         | 33             | 8.1                           | 2.6              |
| 31   | 8  | 2019 | 1             | 19 | 29.3 | 62.21                | 153.75         | 0              | 9.1                           | 3.1              |
| 21   | 9  | 2019 | 12            | 53 | 41.3 | 63.12                | 150.24         | 3              | 9.2                           | 3.1              |
| 4    | 10 | 2019 | 1             | 10 | 33.2 | 63.26                | 149.86         | 11             | 8.8                           | 2.9              |
| 14   | 10 | 2019 | 12            | 33 | 45.8 | 60.22                | 150.17         | 23             | 8.6                           | 2.8              |

Примечание: глубины 0 и 33 км выбраны и зафиксированы программой обработки землетрясений НУР2DT [Mackey, 1999] для приповерхностных и коровых очагов соответственно.

**Таблица 6.** Приращение балльности и расчётная интенсивность сейсмического воздействия на участках основных сооружений Колымской ГЭС по методу сейсмологической регистрации землетрясений

| Место установки станции                    | Код станции | Приращение<br>балльности $\Delta I$ | Расчётная<br>интенсивность $I$ , балл |
|--|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Метеостанция                               | kgesM-1     | эталон                              | 7.80                                  |
| Левый борт, над водосбросом                | kgesL-3     | 0.31                                | 8.11                                  |
| Берма плотины, правый борт                 | kgesB-2     | 0.49                                | 8.29                                  |
| Здание ПЭУ, левый берег                    | kgesP-4     | 1.50                                | 9.30                                  |
| Примыкание гребня плотины,<br>правый берег | kgesR-3     | -0.004                              | 7.80                                  |

**СМР методом сейсмических жёсткостей**

Определение приращения балльности по методу сейсмических жёсткостей проводилось по данным измерений скоростей продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) сейсмических волн. Для определения их скоростей выполнено сейсмопрофилирование по пяти продольным профилям. Их положение показано на рис. 6. Для регистрации продольных  $P$ - и поперечных  $S$ -волн использовались шестиканальные станции «Байкал». На каждом профиле устанавливались 12 сейсмоприёмников СВ-5. Расстояние между датчиками – 5 м. Частота дискретизации регистратора «Байкал» – 4000 *отс/с*. Сейсмический сигнал возбуждался ударом кувалды весом 8 кг в пункте, удалённом от первого сейсмодатчика на расстояние 0, 5 и 10 м с обеих сторон профиля. Наблюдения проводились по системе встречных годографов. Выполнялось несколько ударов в каждом пункте. Если пункт удара располагался на рыхлых породах, то удар кувалды наносился по металлической подставке. Координаты пунктов ударов определялись приборами GPS. Точки приёма определялись системой GPS, встроенной в «Байкал». После вывода сейсмограмм проводилось выделение времени первых вступлений продольных  $P$ - и поперечных  $S$ -волн ( $t_p$  и  $t_s$ ).

Сейсмограммы показали высокий уровень микросейсм. Он обусловлен работой агрегатов ГЭС, действием водосброса и высоким уровнем электро- и магнитных полей. В результате полезный сигнал выделялся на расстоянии не более 35 м на профилях № 71, 73 и 74. На профиле № 76 шум превышал сейсмический сигнал на расстоянии 20 м, а на № 75 – 15 м. По этой причине данные профиля № 75 не поддаются обработке. Информация по профилю № 76 принята в расчёт сейсмической жёсткости с примечанием «данные неуверенные».

Для профилей № 71, 73, 74 и 76 построены годографы волн, по которым вычислены скорости  $V_p$ ,  $V_s$ . Годографы усреднялись прямыми линиями на расстояниях от 10 м, по которым определялись средние значения  $V_p$  и  $V_s$  вдоль профиля из пункта удара.

Приращение сейсмической интенсивности за счёт различия грунтовых условий  $\Delta I$  определялось по формуле [РСН 65-87]:

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

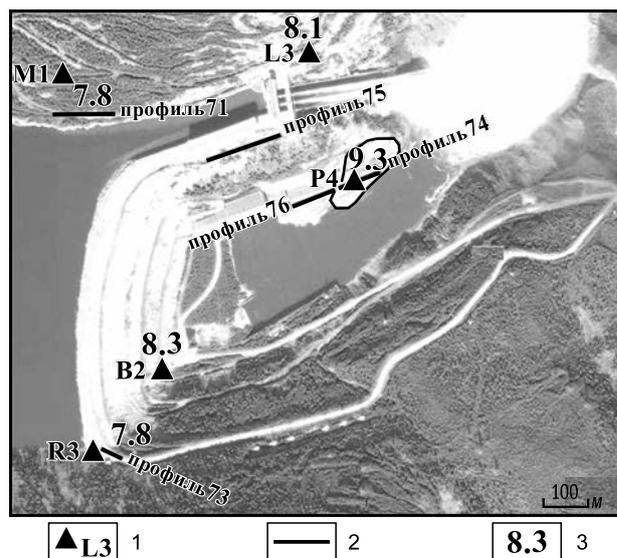
где  $\bar{V}(P, S)_s$  и  $\bar{V}(P, S)_i$  – средневзвешенные значения скоростей распространения продольных или поперечных волн на эталонном и исследуе-

мом участках;  $\rho$  – плотность грунтов.

Значения приращения сейсмической интенсивности  $\Delta I$ , полученные методом сейсмических жёсткостей, приведены в табл. 7. В качестве эталонного выбран участок выхода скальных грунтов в месте установки сеймостанции М1, профиль 71.

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

По данным обоих методов, рассчитанная сейсмичность на исследуемых участках, за исключением здания ПЭУ (станция Р4), составляет 7.8–8.4 баллов, что ниже карты ОСР-2015-С. Существование участка с опасностью 9.3 балла (Р4) обусловлено техногенными грунтами площадки и требует продолжения дальнейших работ по мониторингу сейсмичности района Колымской ГЭС. Построена карта-схема сейсмического микрорайонирования основных сооружений Колымской ГЭС (рис. 6).



**Рис. 6.** Карта-схема сейсмического микрорайонирования основных сооружений Колымской ГЭС для периода повторяемости 5000 лет; положение сейсмических станций временной локальной сети и продольных сейсмопрофилей.

- 1 – сейсмическая станция и её название;
- 2 – линия сейсмопрофиля; 3 – балльность

**Заключение**

С учётом новых геолого-геофизических и сейсмологических материалов для района Колымской ГЭС проведены ДСР и СМР. По результатам ДСР исходная сейсмичность района

**Таблица 7.** Приращение балльности, и расчётная интенсивность сейсмического воздействия на участках основных сооружений Колымской ГЭС по методу сейсмических жёсткостей

| № профиля | $V_p$ , км/с | Сейсмическая жёсткость $\rho$ по $P$ | $V_s$ , км/с | $\Delta I_p$ | Сейсмическая жёсткость $\rho$ по $S$ | $\Delta I_s$ | Интенсивность $I$ , балл |
|-----------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------|
| 71        | 2.53         | 6.64                                 | 1.36         | эталон       | 3.60                                 | эталон       | 7.8                      |
| 73        | 2.15         | 5.66                                 | 0.86         | 0.12         | 2.27                                 | 0.33         | 8.1                      |
| 74        | 1.67         | 4.39                                 | 0.82         | 0.30         | 2.16                                 | 0.37         | 8.2                      |
| 76*       | 1.16         | 3.06                                 | 0.60         | 0.56         | 1.58                                 | 0.60         | 8.4                      |

Примечание: \* – данные по профилю № 76 – неуверенные.

**Таблица 8.** Результаты определения приращения балльности на участках основных сооружений Колымской ГЭС

| Станция  | Метод регистрации землетрясений  |                          | № профиля | Метод сейсмических жёсткостей    |                          |
|----------|----------------------------------|--------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------|
|          | приращение балльности $\Delta I$ | интенсивность $I$ , балл |           | приращение балльности $\Delta I$ | интенсивность $I$ , балл |
| kges M-1 | эталон                           | 7.8                      | 71        | эталон                           | 7.8                      |
| kges L-3 | 0.31                             | 8.1                      | –         | –                                | –                        |
| kges B-2 | 0.49                             | 8.3                      | –         | –                                | –                        |
| kges R-3 | –0.004                           | 7.8                      | 73        | 0.33                             | 8.1                      |
| kges P-4 | 1.5                              | 9.3                      | –         | –                                | –                        |
| –        | –                                | –                        | 74        | 0.37                             | 8.2                      |
| –        | –                                | –                        | 76        | 0.6                              | 8.4                      |

Колымской ГЭС по карте ОСР-2015-С составила 8.8 баллов при периоде повторяемости ~5000 лет. Магнитуа наиболее опасного для сооружений Колымской ГЭС землетрясения составит  $M=7.4$  при эпицентральной дистанции 29 км. При проведении СМР в качестве эталонного участка была выбрана площадка выхода скальных грунтов, где уточнённая исходная сейсмичность с учётом ДСР составила 7.8 балла. Расчётным путём получено приращение балльности и определена расчётная интенсивность сейсмического воздействия на участках основных сооружений Колымской ГЭС. По данным двух методов (регистрации землетрясений и сейсмических жёсткостей), расчётная сейсмичность на всех участках, за исключением точки участка у здания ПЭУ в месте установки станции Р4, составляет около 8 баллов, что на 1 балл ниже, чем по карте ОСР-2015-С. Это вполне объяснимо тем, что граниты основания по сейсмическому воздействию относятся к грунтам I категории. Построена карта-схема сейсмического микрорайонирования основных сооружений Колымской ГЭС. На основании обследований обнажений гранитов на левом и правом берегах не выявлено современных трещин и разрушений, понижающих их прочностные свойства.

**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

- Алёшина Е.И., Годзиковская А.А., Гунбина Л.В., Коломиец М.В., Седов Б.М. Сводный каталог землетрясений Северо-Востока России с древнейших времён по 1974. – Обнинск, Магадан: ГС РАН, 2015. – 152 с.
- Владимирова Л.В., Воробьева Л.А., Ефремова Л.В. и др. Купкинское землетрясение 8 ноября 1981 г. // Сейсмические процессы на Северо-Востоке СССР. – Магадан: СКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. – С. 39–53.
- Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мёрзлых и талых массивов). – СПб., 2009. – 402 с.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмо-тектоника Якутии. – М.: ГЕОС, 2000. – 227 с. – EDN: ТЮСРЛ

- Козьмин Б.М.* Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их 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. — 2019. — Т. 46, № 3. — С. 16–31. DOI:10.21455/VIS2019.3-2. — EDN: BWZCFP
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. — М.: МГК АН СССР, 1965. — 11 с.
- Мишин С.В., Андреев Т.А., Смирнов В.Н.* Оценка сейсмической опасности района строящейся Колымской ГЭС. — Магадан, 1977. — 242 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.
- 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.
- Ризниченко Ю.В.* Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. — М.: Наука, 1979. — 190 с.
- РСН 65-87.* Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. — М.: Госстрой РСФСР, 1988. — 8 с.
- Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики* / Отв. ред. Л.П. Имаева, И.И. Колодезников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. — 134 с.
- СНиП II-7-81\* «Строительство в сейсмических районах».* — М.: Госстрой РСФСР, 1982. — 46 с.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2015. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населённых пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. — М.: ОИФЗ РАН, 2015. — 57 с.
- International Seismological Centre (ISC).* On-line Bulletin [Site]. — URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. — United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2020. DOI: 10.31905/D808B830
- Global CMT Catalog Search* // Global CMT Web Page [Site]. — URL: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>. — Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA, 2020.
- Mackey K.G.* Seismological Studies in Northeast Russia. Dissertation for the degree of Ph.D. — Michigan State University: Department of Geological Sciences, 1999. — 346 p.
- 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](mailto:Evgeniya@memsd.ru)

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

**Курткин Сергей Валерьевич**, директор МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия. E-mail: [kurs@memsd.ru](mailto:kurs@memsd.ru)

**Ведерников Евгений Игоревич**, инженер-конструктор 1 кат. Акционерного общества «Государственное машиностроительное конструкторское бюро “Радуга” имени А.Я. Березняка» (АО «ГосМКБ “Радуга” им. А.Я. Березняка»), г. Дубна, Россия. E-mail: [e.vedernikov@gmail.com](mailto:e.vedernikov@gmail.com)

## Determination of initial seismicity score and seismic microzoning of infrastructure area of Kolyma Hydro Power Plant

© 2022 E.A. Alyeshina<sup>1</sup>, I.I. Karpenko<sup>1</sup>, S.V. Kurtkin<sup>1</sup>, **B.M. Sedov<sup>1</sup>**, E.I. Vedernikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MB GS RAS, Magadan, Russia; <sup>2</sup>JSC "MCB Raduga", Dubna, Russia

Received May 28, 2020

**Abstract** Earthquakes' nature was studied and detailed seismic zoning (DSZ) and seismic micro-zoning (SMZ) were carried out for the Kolyma hydro power plant (KHPP) region, considering new geological, geophysical and seismological data. DSZ was based on tectonic zoning maps of Magadan region and seismological monitoring data in the vicinity KHPP facilities, carried out by Magadan Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences. Eight source zones and 10 faults generating earthquakes were identified. Hypocenters of potential maximum earthquakes were determined. They are associated with the largest deep faults: Debinsky, Chay-Yuryinsky and Ulakhan and can cause ground shake in the area of main structures with intensities  $I=8.8, 8.5$  and  $8.4$  scores, which is consistent with OSR-2015-C map, selected as the main one for objects with increased level of responsibility. According to the DSR results, the initial seismicity of KHPP area on OSR-2015-C map was  $8.8$  scores. With repeatability of  $\sim 5000$  years, the magnitude of the most dangerous earthquake for KHPP facilities will be  $M=6.5$ , with epicentral distance of  $10$  km. The obtained results of the DSZ were the initial estimates of seismic impacts for SMZ. The basis of SMZ is the nature of soils of the upper part of the section of the structures zone. The rock outcropping area was chosen as a reference, where the initial seismicity, taking into account DSZ, was  $7.8$  scores. The calculated increment of the score and the calculated intensity of the seismic impact on the areas of the main structures of KHPP were calculated. Moreover, in 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. According to both methods, the maximum shaking of the area of the main KHPP facilities amounted to  $8$  points, which is  $1$  point lower than the OSR-2015-C map.

**Keywords** Kolyma hydro power plant, Kolyma hydroelectric station, seismicity, seismic tectonics, TMA zones, potential maximum earthquakes, source zones, surveys, seismic profiling.

**For citation** Alyeshina, E.A., Karpenko, I.I., Kurtkin, S.V., Sedov, B.M., & Vedernikov, E.I. (2022). [Determination of initial seismicity score and seismic microzoning of infrastructure area of Kolyma Hydro Power Plant]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(4), 97-111. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.07. EDN: BKVSVM

### 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 North-East of Russia from Ancient Times to 1974]. Obninsk, Magadan, Russia: GS RAS Publ., 152 p. (In Russ).
- Global CMT Web Page (2020). Global CMT Catalog Search. Retrieved from <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- Imayev, V.S., Imayeva, L.P., & Kozmin, B.M. (2000). *Seismotektonika Iakutii* [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 North-Eastern sector of Russian Arctic]. Novosibirsk, Russia: Russian Academy of Sciences Publ., 134 p. (In Russ).
- International Seismological Centre. (2020). On-line Bulletin. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. DOI: 10.31905/D808B830
- Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1977). *Novyj katalog sil'nyh zemletryasenij na territorii SSSR s drevnejshih vremen 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 mekhanizmy ochagov ih 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-Kolymского водораздела. Masshtab 1:1 000 000* [Scheme of tectonic zoning of Okhotsk-Kolymsky watershed. Scale 1:1,000,000]. Magadan, Russia: Magadan Federal State Unitary Enterprise «Magadangeologiya» Publ., 8 sheets.
- Lutikov, A.I., Andreeva, N.V., Gabsatarova, I.P., Dontsova, G.Yu., & Karpenko, L.I. (2019). [Seismicity and seismic hazard assessment of Magadan region on a scale close to detailed seismic zoning]. *Voprosy inzhenernoj seismologii* [Questions of engineering seismology], 46(3), 16-31. (In Russ.). DOI: 10.21455/VIS2019.3-2. EDN: BWZCFP
- Mackey, K.G. Seismological Studies in Northeast Russia. Dissertation for the degree of Ph.D. / Michigan State University. Department of Geological Sciences, 1999. — 346 p.
- Medvedev, S.V., Sponheuer, W., & Karnik, V. (1965). *Shkala seismicheskoi intensivnosti MSK-64* [Seismic Intensity Scale MSK-64]. Moscow, Russia: Interdepartmental Geophysical Commission of the USSR Acad. Sci. Publ., 11 p. (In Russ.).
- Mishin, S.V., Andreev, T.A., & Smirnov, V.N. (1977). *Ocenka seismicheskoy opasnosti rajona stroyashcheyasya Kolymской GES* [Seismic hazard assessment of the area under construction of Kolyma HPP]. Magadan, Russia: NESC FEB RAS Publ., 242 p. (In Russ.).
- Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Eksperimental'naya 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.).
- Riznichenko, Yu.V. (1979). *Seismicheskaya sotryasayemost' territorii SSSR* [Seismic shaking of the territory of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 190 p. (In Russ.).
- RSN 65-87. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Seismicheskoe 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.).
- SNiP II-7-81\* *Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonah.* (1982). [SNiP II-7-81\*. Construction in seismic areas]. Moscow, Russia: Gosstroj RSFSR Publ., 46 p. (In Russ.).
- Ulomov, V.I., & Schumilina, L.C. (2015). *Komplekt kart obshchego seismicheskogo rajonirovaniya territorii Rossijskoy federacii OSR-2015. Masshtab 1:8000000. Ob'yasnitelnaya zapiska i spisok gorodov i naseleennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh rajonah* [Set of maps of general seismic zoning of the territory of Russian Federation OSR-2015. Scale 1:8000000. Explanatory note and list of cities and settlements located in seismic hazardous areas]. Moscow, Russia: UIPE RAS Publ., 57 p. (In Russ.).
- Vladimirova, L.V., Vorobyova, L., Efremova, L.V., et al. (1984). [Kupkinskoye earthquake on November 8, 1981]. In *Seismicheskije processy na Severo-Vostoke SSSR* [Seismic processes in the Northeast of USSR] (pp. 39-53). Magadan, Russia: NESC FEB RAS Publ., (In Russ.).
- Voronkov, O.K. (2009). *Inzhenernaya seismika v kriolitozone (izuchenie stroeniya i svoystv merzlykh i talykh massivov)* [Engineering seismics in permafrost zone (study of the structure and properties of frozen and melted masses)]. St.-Peterburg, Russia, 402 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

**Vedernikov Evgeniy Igorevich**, Design Engineer of the 1st cat. of the Joint-Stock Company "State Machine-Building Construction Bureau "Raduga" named after A.Ya. Berezhnyak" (JSC "MKB Raduga"), Dubna, Russia. E-mail: E.Vedernikov@gmail.com