

УДК 550.34

Результаты фундаментальных и прикладных сейсмологических исследований в Магаданской области в 2016–2020 гг.

© 2021 г. Л.И. Карпенко, Е.И. Алёшина, С.В. Курткин, Е.И. Ведерников, В.В. Атрохин

МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия

Поступила в редакцию 19.02.2021 г.

Аннотация. Представлены результаты сейсмологических исследований фундаментального и прикладного характера, выполненных Магаданским филиалом ФИЦ ЕГС РАН в Магаданской области и Чукотском автономном округе за период 2016–2020 гг. В сотрудничестве с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН получены оценки сейсмической опасности Магаданской области для периодов повторяемости 500, 1000 и 5000 лет в масштабе, близком к масштабу детального сейсмического районирования. Продолжением этих исследований стали работы по определению исходного балла региональной сейсмичности и оценке сотрясаемости участков расположения особо важных промышленных объектов Магаданской области. Для каждого из них выполнено сейсмическое микрорайонирование методом регистрации землетрясений и взрывов, а также методом сейсмических жёсткостей. В ходе выполнения данных работ получены оценки интенсивности сейсмического воздействия на участках основных сооружений, характеризующихся различными инженерно-геологическими условиями грунтов верхней части разреза. Результаты исследований нашли отражение на картах-схемах сейсмического микрорайонирования, использованных в проектных основах рассмотренных промышленных объектов.

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

Для цитирования: Карпенко Л.И., Алёшина Е.И., Курткин С.В., Ведерников Е.И., Атрохин В.В. Результаты фундаментальных и прикладных сейсмологических исследований в Магаданской области в 2016–2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 58–76. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.04>

Введение

Магаданский филиал ФИЦ ЕГС РАН проводит сейсмологические исследования в Магаданской и Чукотской областях на протяжении многих лет. В последние годы (2013–2020 гг.) данные исследования проводятся в рамках Программы ФНИ РАН «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий» по нескольким направлениям. Основным из них является проведение непрерывного сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях, включающее также разработку и внедрение новых технологий обработ-

ки и системного анализа больших объёмов сейсмологических и геофизических данных. В ходе мониторинга, сопровождаемого в ряде случаев кратковременными локальными наблюдениями, ведётся разработка новых и актуализация существующих баз данных сейсмологических, геофизических, геодинамических наблюдений.

Магаданская область – территория с высокой степенью сейсмической опасности. По данным карт ОСР-2015, она располагается в 7-, 8- и 9-балльных зонах. В связи с этим создаваемые информационные ресурсы имеют большое практическое значение, так как могут использоваться при исследовании параметров сейсмического режима сейсмоактивных регионов с целью уточнения сейсмического потенциала и особенностей развития очаговых зон. Данная работа является

обобщающей для сейсмологических исследований в регионе, выполненных в период с 2016 по 2020 год.

Первые результаты по определению параметров сейсмического режима территории Северо-Востока России (Магаданская область) были получены в 2015 г. и представлены в отчёте НИР [Габсатарова, Лутиков, 2015], где была применена методика расчёта, отработанная ранее в Северо-Кавказском регионе [Лутиков и др., 2009]. Продолжением этих исследований стало сотрудничество с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в рамках совместной работы по оценке сейсмической опасности Магаданской области в масштабе, близком к масштабу детального сейсмического районирования (ДСР). Результатом работы явились вероятностные карты сейсмической опасности Магаданской области в баллах макросейсмической шкалы, рассчитанные на средний период повторения в 500, 1000 и 5000 лет [Лутиков и др., 2019].

В последнее десятилетие на Северо-Востоке идёт бурное развитие горнопромышленного комплекса, что требует детальной оценки сейсмической опасности площадок, на которых возводятся объекты повышенной ответственности. Важно получать достоверные и своевременные данные о сейсмических событиях в регионе, исследовать их распределение во времени и пространстве, уточнять их связь с тектоническими структурами.

В связи с этим в дополнение к региональным исследованиям в период 2016–2020 гг. проведены работы по уточнению исходного балла и сейсмическое микрорайонирование (СМР) на участках строящихся предприятий горнодобывающего и энергетического комплексов Магаданской области:

- хвостохранилище на руднике «Ветренский» (2016 г.);
- водохранилище № 2 на реке Каменушка в г. Магадане (2017 г.);
- хвостохранилище ГОКа «Лунное» и Омсукчанской ЗИФ (2019 г.);
- район сооружений Колымской ГЭС (2019 г.);
- район Усть-Среднеканской ГЭС (2020 г.);
- горнодобывающее и перерабатывающее предприятие на месторождении «Тэутэджак» (2020 г.).

В качестве исходных материалов для данных исследований послужили схемы тектонического районирования Магаданской области [Кузнецов, 2001], а также данные сейсмологического мониторинга (каталоги землетрясений, научные отчё-

ты и публикации о сейсмичности Северо-Востока России), полученные Магаданским филиалом ФИЦ ЕГС РАН с помощью уникальной научной установки «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

На рис. 1 показано расположение перечисленных выше объектов исследований, положение сейсмических станций МФ ФИЦ ЕГС РАН и эпицентры землетрясений, зарегистрированных в период с 2016 г. по ноябрь 2020 года.

1. Общие сведения о сейсмичности Северо-Востока России

Непрерывный сейсмический мониторинг территории Магаданской области, Чукотского автономного округа (ЧАО) и шельфов прилегающих морей (Охотского, Чукотского, Берингова и Восточно-Сибирского) в 2016–2020 гг. осуществлялся сетью из 14 цифровых сейсмических станций. В Магаданской области действовало 11 станций, в ЧАО – три (рис. 2). Для определения параметров землетрясений, произошедших в приграничных с Республикой Саха (Якутией) районах, использовались данные станций Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

На рис. 2 показана энергетическая представительность землетрясений K_{\min} по наблюдениям действовавшей в рассматриваемый период времени сети. Минимальный уровень энергии представленных землетрясений $K_{\min}=6.0$ достигается в области наибольшей плотности сети станций – в центре Колымы (район № 2). На всей территории районов № 1 и № 2 (Охотское море, Колыма) не могут быть пропущены землетрясения с $K_{\min}=8$. На восточном фланге региона в районах Чукотки (№ 3–6) могут регистрироваться лишь события с $K_{\min}=9–10$.

В течение 2016–2020 гг. региональной сейсмической сетью зарегистрировано 9621 сейсмическое событие, в число которых входят как местные землетрясения, так и промышленные взрывы. В каталог Северо-Востока России и приграничных районов за отчётный период включены сведения о 1333 землетрясениях с $K_p=4.6–13.2$ [Алёшина и др., 2020]. Очаги всех землетрясений расположены в пределах земной коры на глубинах $h \leq 33$ км. Большинство землетрясений произошло вдоль юго-восточной части сейсмического пояса Черского (в районе Колымы), в пределах Северо-Охотского пояса (вдоль берега Охотского моря) и у границ

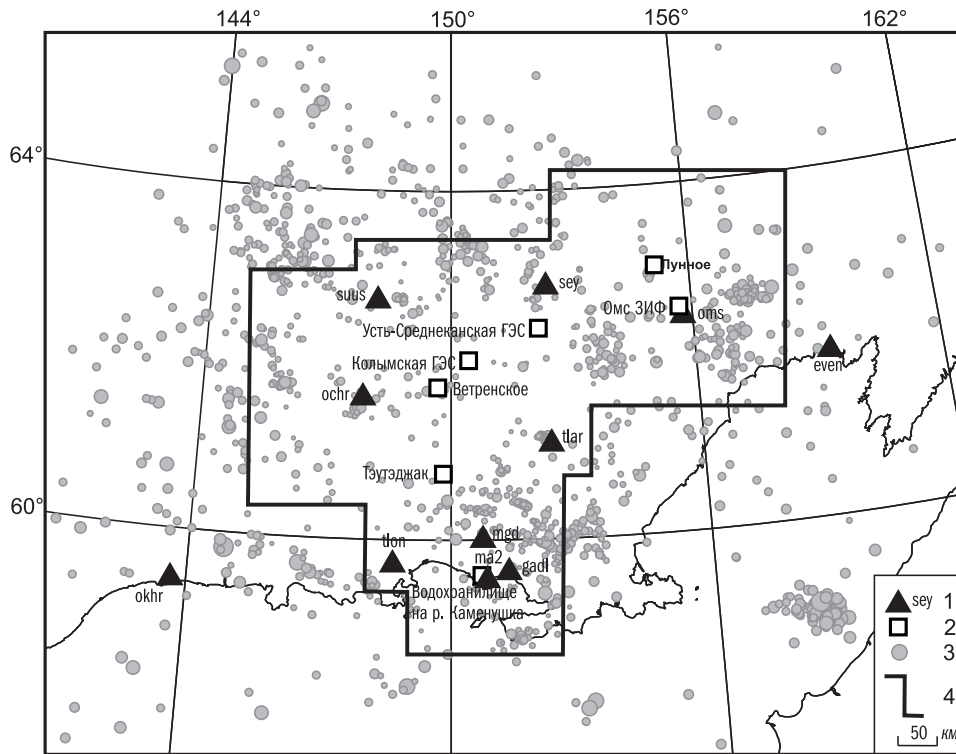


Рис. 1. Схема пространственного расположения объектов исследований (квадраты), сейсмических станций (треугольники) и эпицентров землетрясений (кружки), зарегистрированных в период с 2016 по 2020 г.

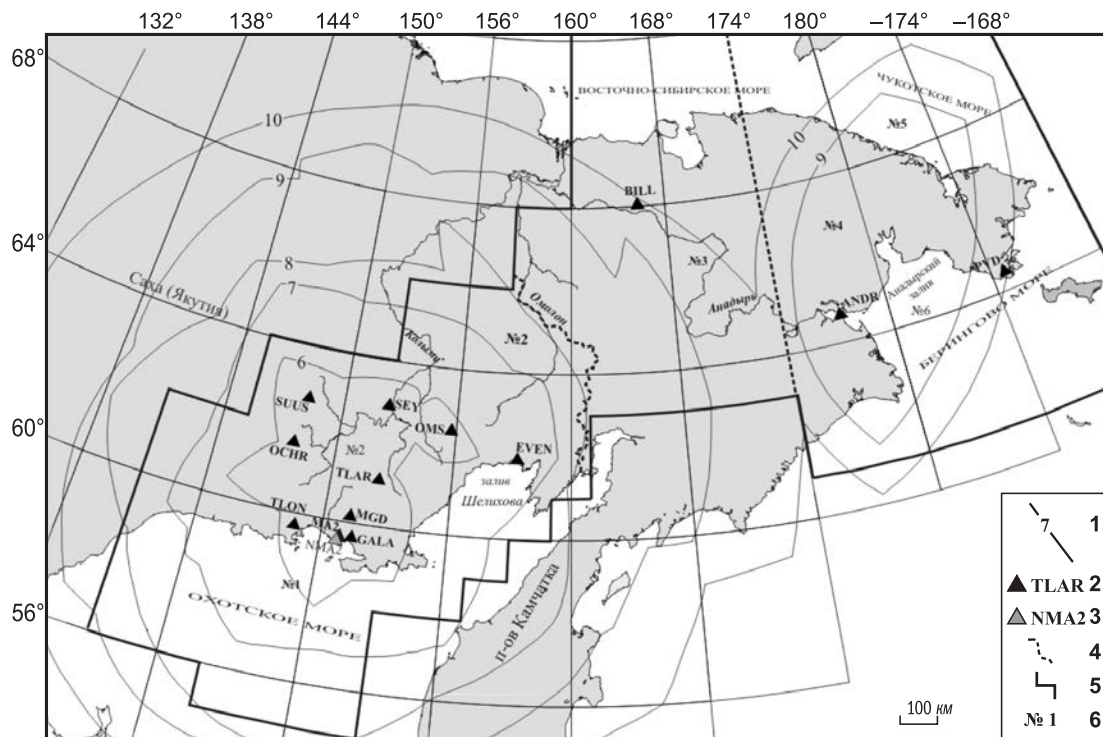


Рис. 2. Расположение сейсмических станций в 2016–2020 гг. и карта энергетической представительности K_{min} землетрясений Северо-Востока России.

1 – изолиния K_{min} ; 2, 3 – сейсмическая станция, постоянная и временная соответственно;
 4, 5 – граница района и региона соответственно; 6 – номер района

Транс-Берингийского сейсмического пояса; единичные события локализованы в Беринговом и Чукотском морях.

Рассмотрим наиболее значимые землетрясения, произошедшие на Северо-Востоке РФ, по районам (с 1 января 2016 г. по 30 ноября 2020 г.).

Охотское море (район № 1)

29 октября 2016 г. в 18^h11^m с $K_p=11.6$. Землетрясение произошло в Охотском море, примерно в 170 км к юго-западу от Магадана, где ощущалось с интенсивностью 3 балла.

1 сентября 2017 г. в 21^h07^m с $K_p=12.1$. Эпицентр землетрясения располагался в 207 км юго-восточнее Магадана. Сведений об осязательности этого события из близлежащих населённых пунктов не поступало.

5 августа 2018 г. в 02^h16^m с $K_p=12.2$. Зарегистрировано в 210 км юго-восточнее Магадана.

1 сентября в 00^h51^m 2020 г. с $K_p=12.9$. Произошло на приграничной с Камчаткой территории.

Кольма (район № 2)

2 января 2016 г. в 04^h06^m с $K_p=11.0$. Эпицентр землетрясения приурочен к северному окончанию Нильгасигского разлома субмеридионального направления [Кузнецов, 2001].

22 февраля 2016 г. в 03^h04^m с $K_p=11.4$. Эпицентр землетрясения расположен между двумя крупнейшими глубинными разломами субширотного простирания – Кава-Ямским и Челомджа-Ямским, – в очаговой зоне они перекрыты отложениями Ольской неотектонической впадины [Кузнецов, 2001]. Зарегистрировано 11 афтершоков с $K_p=6.3–9.5$. Землетрясение ощущалось жителями села Гадля ($\Delta=60$ км) и г. Магадана ($\Delta=90$ км) с интенсивностью (MSK-64) 3 и 2 балла соответственно. В селе Гадля многие люди почувствовали толчок и волнообразные движения. Респонденты, находившиеся на 4 и 5 этажах, наблюдали сотрясения всего здания, некоторые испугались; двигались и падали лёгкие предметы на столах и полках, чего не наблюдалось на нижних этажах (1, 2 этажи). В Магадане люди, находившиеся в зданиях выше 4 этажа, ощутили слабые толчки, затем медленные колебания или слабую вибрацию.

6 мая 2016 г. в 12^h46^m с $K_p=11.7$. Произошло в 25 км от побережья Охотского моря, эпицентр приурочен к западному окончанию Кава-Ямского глубинного разлома субширотного простирания [Кузнецов, 2001]. Землетрясение ощущалось в Магадане ($\Delta=240$ км) с интенсивностью 2–3 балла. Локализован один афтершок с $K_p=7.2$. Землетрясение произошло в 23^h46^m местного времени, когда большинство жителей города спали.

Немногие респонденты, проживающие на верхних этажах зданий (3–9 этажи), отмечали, находясь в состоянии покоя, ощущения волнообразных движений или слабую вибрацию, раскачивание висящих предметов.

11 марта 2017 г. в 08^h22^m с $K_p=11.2$. Эпицентр землетрясения располагался в среднем течении реки Коркодон, в пределах Долоннанской грабен-синклинали, между Ольчанским и Нянкинским глубинными разломами северо-восточного простирания [Кузнецов, 2001].

28 октября 2019 г. в 14^h41^m с $K_p=10.3$. Событие произошло на берегу Охотского моря. Оно ощущалось в сёлах Гадля ($\Delta=3$ км), Ола ($\Delta=11$ км) с интенсивностью 4 балла, в Магадане ($\Delta=34$ км) с интенсивностью 3 балла.

31 июля 2019 г. в 08^h29^m с $K_p=13.2$. Ощущалось в пос. Охотск ($\Delta=100$ км) с интенсивностью 4 балла, в Магадане ($\Delta=357$ км) – 2 балла. Локализовано два афтершока с $K_p=10.1$ и 7.6.

8 ноября 2020 г. в 07^h02^m с $K_p=11.0$. Эпицентр располагался на берегу Охотского моря, вблизи полуострова Кони на глубине ~5 км; в Магадане ($\Delta=80$ км) отмечались 2-балльные сотрясения.

Западная Чукотка (район № 3)

15 ноября 2019 г. в 01^h48^m с $K_p=10.6$. Ощущалось в селе Чуванское ($\Delta=10$ км) с интенсивностью 5 баллов. Жители, находившиеся внутри помещений (деревянные одноэтажные дома), почувствовали сильные толчки, общее сотрясение строений, в испуге выбежали на улицу.

Восточная Чукотка (район № 4)

5 ноября 2017 г. в 17^h32^m с $K_p=12.7$. Произошло в 80 км к северу от пос. Провидения. Сотрясений в близлежащих населённых пунктах не отмечалось.

7 июня 2018 г. в 19^h18^m с $K_p=11.4$. Зарегистрировано в районе пос. Провидения. После него возник рой слабых толчков, из которых локализовано десять событий с $K_p=9.8–11.1$ на расстоянии $\Delta=5–60$ км от пос. Провидения.

24 ноября 2019 г. в 17^h32^m с $K_p=10.4$ событие ощущалось в селе Мейныпильгино ($\Delta=20$ км) с интенсивностью 5 баллов. Землетрясение случилось в 03^h32^m по местному времени, спавшие люди проснулись от сильного толчка и содрогания жилища, в страхе выбежали на улицу, долгое время боялись заходить внутрь помещения.

Берингово море (район № 6)

11 ноября 2016 г. в 08^h22^m с $K_p=10.8$. Зарегистрировано в районе Берингова пролива.

20 мая 2017 г. в 06^h23^m с $K_p=11.8$. Ощущалось с интенсивностью 4 балла в пос. Беринговский,

находящемся на расстоянии $\Delta=24$ км от эпицентра. После первого толчка в 06^h28^m зарегистрировано ещё одно землетрясение с $K_p=10.9$, которое ощущалось в пос. Беринговский ($\Delta=48$ км) с интенсивностью 3 балла. Жители почувствовали два толчка, вибрацию, затем плавные колебания. Вибрация была сопоставима с той, которая вызывается движением тяжёлого грузовика. Колебались подвешенные предметы, посуда и окна звенели, скрипели полы и стены. Некоторые жители в испуге выбегали на улицу. Второй толчок ощущался слабее первого.

16 января 2018 г. в 04^h40^m с $K_p=12.7$. Произошло в районе острова Святого Лаврентия. Сотрясений в близлежащих населённых пунктах не отмечено.

1 ноября 2020 г. в 11^h44^m с $K_p=12.2$. Произошло в Беринговом море у восточной границы региона.

Все зарегистрированные землетрясения приурочены к ранее известным сейсмогенным зонам – сейсмическому поясу Черского, Северо-Охотскому и Транс-Берингийскому сейсмическим поясам. Уровень сейсмичности Северо-Востока России в период 2016–2020 гг., согласно шкале «СОУС'09» [Салтыков, 2011], оценён как «фоновый средний» [Алёшина и др., 2018].

Взрывы. За период 2016–2020 гг. сетью сейсмических станций зарегистрировано более 3000 промышленных взрывов. Количество взрывов ежегодно увеличивается. Если в 2014–2015 гг. регистрировалось около 200 взрывов, то в 2016 г. зарегистрировано более 300, с 2017 г. фиксируется более 700 взрывов в год. Большинство взрывов произведено предприятиями Сусуманского, Тенькинского и Омсукчанского городских округов Магаданской области.

Для удобства использования получаемой информации Магаданский филиал ФИЦ ЕГС РАН систематически производит пополнение баз данных результатами обработки материалов сейсмологических, геофизических и других наблюдений, пополнение сводного каталога землетрясений и цифрового архива волновых форм землетрясений. В табл. 1 перечислены базы данных, входящие в состав информационных ресурсов Магаданского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Все перечисленные выше события стали их неотъемлемой частью и были использованы в дальнейшем анализе.

Отметим, что значительный объём данных сейсмических станций сети Магаданского филиала ФИЦ ЕГС РАН, положенных в основу каталогов и бюллетеней землетрясений, был получен в доцифровую эпоху. Все материалы наблюдений

в настоящее время хранятся в зданиях сейсмостанций «Магадан», «Стекольный» и «Сеймчан» в виде аналоговых сейсмограмм на фотобумаге (с 1952 по 1999 г.) и бюллетеней на бумажных носителях (с 1968 г.). Ввиду того, что широкий доступ к таким данным ограничен, с сентября 2020 г. проводятся формирование цифрового хранилища сканированных копий аналоговых записей, а также оцифровка волновых форм отдельных событий, представляющих наибольший интерес.

Таблица 1. Информационные ресурсы Магаданского филиала ФИЦ ЕГС РАН

№	Название
1	Каталог землетрясений Северо-Востока России с 1735 г.
2	Бюллетени землетрясений Северо-Востока России с 1968 г.
3	База данных «Сейсмические станции»
4	База данных волновых форм мировых сейсмических событий с 1999 г.
5	База данных волновых форм местных сейсмических событий с 2001 г.
6	База данных ощутимых землетрясений Северо-Востока России с 2001 г.
7	Интерактивный электронный каталог с 1735 г.

Данные современных цифровых станций становятся частью рассмотренных информационных ресурсов непосредственно, однако работа с ними имеет свои особенности и требует организации ряда мероприятий, позволяющих контролировать и обеспечивать высокое качество наблюдений. Так, к примеру, база данных «Сейсмические станции» ведётся с 2016 г. и, помимо информации о самих станциях, содержит журнал проведённых регламентных работ, что позволяет вести контроль изменений в параметрах сбора данных, учёт возможных систематических ошибок, планировать работы по восстановлению и улучшению сейсмической сети.

С целью быстрого устранения неполадок для станций «Магадан», «Билибино» и «Сеймчан» с 2017 г. используется система активного мониторинга, позволяющая наблюдать статус и время простоя оборудования. Для станций «Анадырь», «Провидения», «Омсукчан», «Эвенск», «Талая», «Талон» и «Стекольный» используются программы удалённого доступа (RMS, AnyDesk) и средства, позволяющие дистанционно проводить первичную диагностику оборудования на станциях (AIDA, SpeedFan и др.). Ведётся постоянный

контроль качества записи, все неисправности оперативно устраняются. Налажена потоковая передача данных, что позволяет обрабатывать сейсмические события в срочном режиме.

В результате выполнения такого комплекса работ для районов Чукотки с 2017 г. удалось увеличить количество локализованных событий и снизить класс представительных землетрясений ($K_{\min} \geq 8$). Ранее в каталог Чукотки включались параметры землетрясений, определённые, главным образом, международными агентствами (ISC).

2. Результаты сейсмических исследований

Исследования по определению исходного балла региональной сейсмичности и оценке сотрясаемости проведены для участков расположения особо важных объектов Магаданской области. С учётом имеющихся в распоряжении геолого-геофизических [Кузнецов, 2001] и сейсмологических материалов, для исследуемых объектов сделано ДСР и СМР.

Комплекс проведённых работ выполнен в соответствии с действующими нормативными документами на строительство в сейсмически опасных районах [СП 14.13330.2018; СП 283.1325800.2016; СП 286.1325800.2016; РСН 65-87], 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), оценивалась сотрясаемость на площадках строящихся объектов. 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. При расчётах использовался метод сейсмических жёсткостей и метод регистрации землетрясений и взрывов. Для объектов с повышенным уровнем ответственности дополнительно определялись сейсмоакустические параметры ВЧР по данным сейсмопрофилирования и сейсмокаротажа в скважинах глубиной до 70 м. В результате реализации данного комплекса методов строились карты-схемы

сейсмической опасности площадок исследуемых объектов для естественного и техногенно изменённого состояний (в том числе с учётом изменения мерзлотного режима) [Джурик и др., 1987; Седов, 1988]. Результаты СМР являлись основой для расчётов акселерограмм максимального расчётного (МРЗ) и проектного (ПЗ) землетрясений с эпицентрами в локальных зонах ВОЗ.

2.1. Сейсмичность и оценка сейсмической опасности Северо-Востока РФ (Магаданская область) в масштабе, близком к масштабу ДСР

Площадь исследований ограничена координатами $\varphi=58.5-66.0^\circ\text{N}$ и $\lambda=143.3-157.7^\circ\text{E}$. Исследование выполнено с использованием специально собранных данных исторических каталогов и каталогов инструментальных наблюдений, унифицированных по M_S (магнитуде по поверхностной волне). На основе крупнейших активных разломов выделены десять зон ВОЗ: Улаханская, Дапирская, Сигланская, Чай-Юрьинская зоны с прогнозным сейсмическим потенциалом $M_{\max}=7.5$; Янская, Арга-Тасская, Ланкомо-Омолонская с прогнозным сейсмическим потенциалом $M_{\max}=7.0$; Омчакская, Инская, Иня-Ямская с $M_{\max}=6.5$. Для всей остальной территории была принята фоновая $M_{\max}=5.0$. Схема зон ВОЗ была преобразована в матрицу M_{\max} , которая, в свою очередь, использовалась для расчёта сейсмической сотрясаемости по методу Ю.В. Ризниченко [Ризниченко, 1979]. Построены вероятностные карты сейсмической опасности Магаданской области в баллах макросейсмической шкалы, рассчитанные на средний период повторения в 500, 1000 и 5000 лет. Полученные карты сейсмической опасности в генерализованном виде повторяют карты M_{\max} и сейсмической активности $A_{3.3}$ (рис. 3а).

Наибольшие значения сейсмической интенсивности наблюдаются в областях зон с высокой M_{\max} ($M_{\max} \sim 7.0-7.5$). Максимальная интенсивность изменяется от $I=7.5$ балла при $T_{\text{av}}=500$ лет до $I=8.8$ балла при $T_{\text{av}}=5000$ лет (рис. 3б, в, г). В целом расчётная интенсивность оказалась немного ниже, чем по ОСР-2015. При этом полученные карты балльности оказались более дифференцированными, чем в ОСР-2015 [Лутиков и др., 2019].

2.2. Уточнение исходного балла и СМР на объекте «Хвостохранилище на руднике «Ветренский»»

Хвостохранилище на руднике «Ветренский» — объект с нормальным уровнем ответственности. Для оценки сейсмичности площадки строительства выбрана нормативная карта ОСР-2015-А (повторяемость сотрясений — один раз в 500 лет),

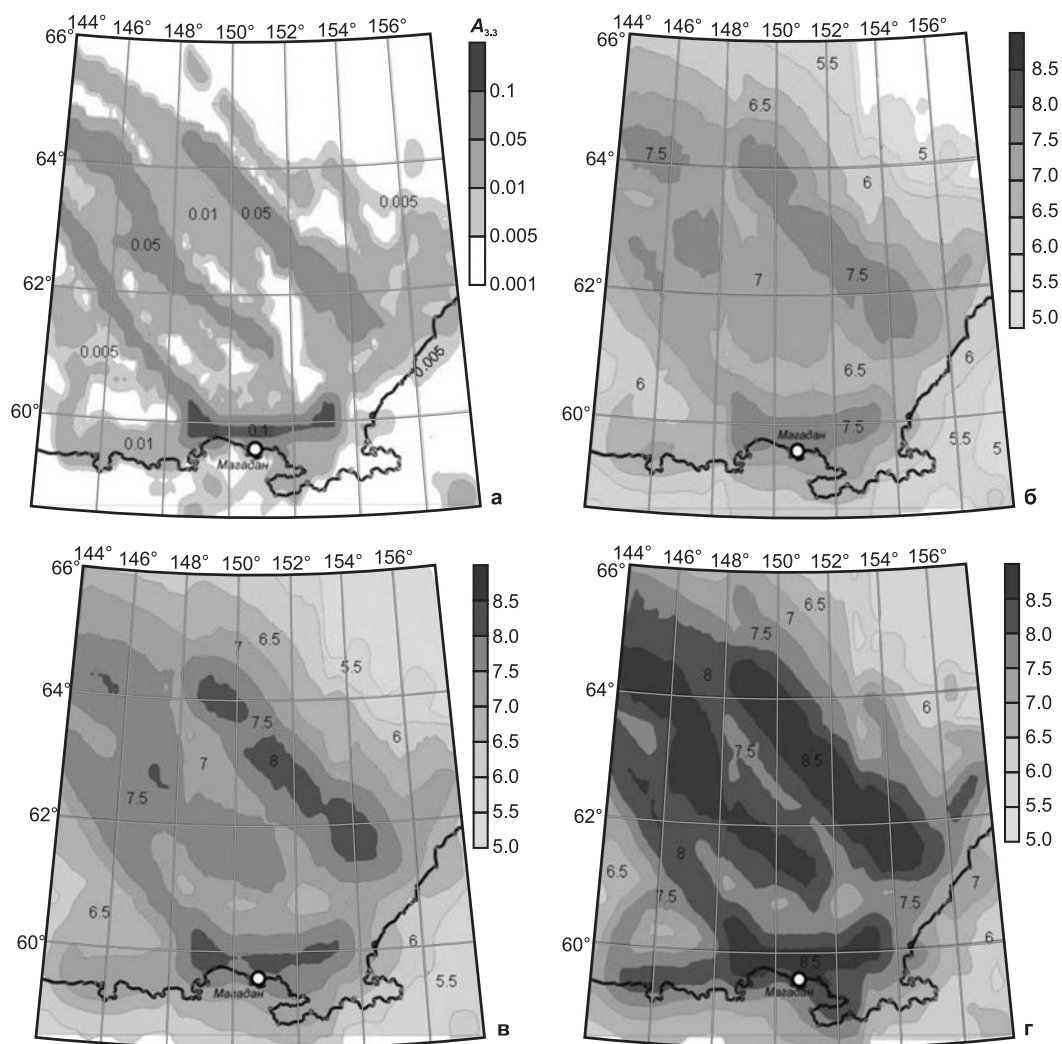


Рис. 3. Карты сейсмической активности $A_{3.3}$ (а) и сейсмической опасности Магаданской области при среднем периоде повторяемости сейсмических воздействий 500 (б), 1000 (в) и 5000 (г) лет.

Цифрами подписаны изолинии сейсмической интенсивности

согласно которой участок строительства объекта расположен в 7-балльной зоне сейсмической опасности. Площадь исследований ограничена координатами 60.5–63.0°N и 146.5–152.5°E. Здесь выделены три зоны ВОЗ северо-западного простирания, связанные с крупнейшими одноименными сейсмогенерирующими разломами, – Тенькинская, Чай-Юрьинская и Дарпирская. Согласно данным о механизмах очагов сильнейших землетрясений, современные типы подвижек по разломам – сдвиги, близ эпицентров землетрясений преобладают субвертикальные смещения. Согласно изосейстам сильных землетрясений, в районе месторождения «Ветренский» интенсивность сотрясений не превышала 4 баллов, что существенно ниже, чем указано на картах ОСР-2015 [Алёшина и др., 2017].

Для выполнения работ по оценке сейсмических воздействий на рассматриваемом объек-

те проводилось сеймопрофилирование по трём продольным профилям (рис. 4а) с регистрацией продольных и поперечных волн. Получены скорости сейсмических волн в верхней части разреза [Курткин, Ведерников и др., 2017; Курткин, Алёшина и др., 2017]. Определены величины приращения балльности методом сейсмических жёсткостей [СП 283.1325800.2016; РСН 65-87]. Результаты СМР использованы для построения синтетических акселерограмм проектных землетрясений (ПЗ) на горизонтальных и вертикальных составляющих движения.

Для расчёта акселерограмм использовалась программа Д. Бура, модифицированная О.В. Павленко [Boore, Joyner, 1997; Boore, 2003; Павленко, 2005], учитывающая протяжённости сейсмических очагов и местные грунтовые условия. В качестве сценарных землетрясений с периодом повторяемости сейсмических воздействий



Рис. 4а. Схема расположения профилей и пунктов наблюдения на дамбе

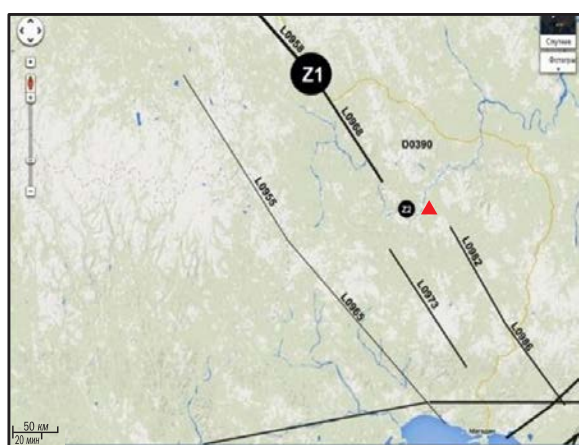


Рис. 4б. Сейсмогенерирующие структуры в окрестности хвостохранилища на руднике «Ветренский» Магаданской области: линементы (толстые чёрные линии), домен (площадная структура), очаги сценарных проектных землетрясений Z1 и Z2.

Положение объекта отмечено красным треугольником

~500 лет в соответствии с картой ОСР-2015-А выбраны два события – землетрясение Z1 с магнитудой 7.5 и эпицентральной расстоянием ~190 км и землетрясение Z2 с магнитудой 5.5 и эпицентральной расстоянием ~26 км (рис. 4б). Согласно полученным оценкам (расчёты выполнены О.В. Павленко), при сценарном землетрясении Z1 максимальные ускорения составят на поверхности скалы 105–115 см/с², а на поверхности грунта – 107–122 см/с². Максимальные скорости смещения – 6.4–7.7 см/с, что по шкале MSK-64 соответствует сейсмической интенсивности 7.1–7.2 балла. При сценарном землетрясении Z2 максимальные ускорения составят на поверхности скалы 56–66 см/с², а на поверхности грунта – 58–70 см/с². Максимальные скорости смещения – 2.3–3.0 см/с, что по шкале

MSK-64 соответствует сейсмической интенсивности 6.2–6.5 балла. Преобладающие периоды колебаний поверхности для обоих землетрясений составляют 0.33–0.68 с для ускорений и 1.46–3.41 с – для скоростей смещения. Максимальная сейсмическая интенсивность для хвостохранилища рудника «Ветренский» (объект с нормальным уровнем ответственности) составит 7.1–7.2 балла.

2.3. Сейсмологические наблюдения за гидротехническими сооружениями водохранилища № 2 на реке Каменушка в Магадане

Площадь исследований ограничена координатами 58.6–60.5°N и 149.0–152.5°E. В окрестностях гидротехнических сооружений водохранилища № 2 выделено семь зон ВОЗ и описано семь разломов, генерирующих землетрясения. Определено местоположение потенциальных очагов землетрясений, от которых сейсмический эффект в районе сооружений водохранилища может оказаться максимальным.

Максимальная расчётная интенсивность сотрясений на площадке сооружений водохранилища $I_{\max} = 8.8$ балла, она достигается при потенциально возможном максимальном землетрясении Z с магнитудой $M_{\max} = 7.5$ и эпицентральной расстоянием ~35 км в зоне западного сегмента Кава-Ямского разлома субширотного направления [Кузнецов, 2001]. Это соответствует значению интенсивности в этом районе по карте ОСР-97-С* (актуализированная редакция ОСР-97 [Уломов и др., 2012; Уломов, Шумилина, 1999]), рассчитанной для периода повторяемости ~ 2500 лет.

Согласно карте ОСР-97-А*, для сотрясений с периодом повторяемости 500 лет сейсмическая интенсивность на площадке сооружений водохранилища на средних грунтах составляет 7.7 баллов. При этом магнитуда наиболее опасного для сооружений землетрясения Z, согласно расчётам, составит $M = 6.8$ при эпицентральной расстоянии ~35 км.

По карте ОСР-97-В* для сотрясений с периодом повторяемости 1000 лет сейсмическая интенсивность на площадке сооружений водохранилища на средних грунтах составляет 8.2 балла. При этом магнитуда наиболее опасного для сооружений землетрясения Z, согласно расчётам, составит $M = 7.1$ при эпицентральной расстоянии ~35 км.

Согласно механизму очага Ланкучанского землетрясения, современные типы подвижек по разломам – взбросы с компонентами сдвига. Близ эпицентров землетрясений преобладают

субвертикальные смещения ($50\text{--}60^\circ$) [Алёшина и др., 2015].

Сейсмическая интенсивность, наблюдаемая в окрестностях сооружений водохранилища № 2 на реке Каменушка в городе Магадане, до настоящего времени не превышала 6 баллов. Период повторяемости 6-балльных землетрясений в пределах рассматриваемой территории ~ 100 лет.

Проведены тестовые испытания по определению динамических характеристик сооружений (динамическое тестирование) с составлением динамических паспортов. При обследовании плотины использовались методы спектрального анализа зарегистрированных сейсмоприёмниками колебаний и метод стоячих волн [Еманов и др., 2002], основанный на выделении резонансных частот обследуемого объекта и позволяющий определять основные динамические параметры колебаний здания или сооружения (собственные частоты, логарифмические декременты затухания). Реализация плотной схемы наблюдений позволила построить детальное распределение собственных колебаний вдоль объекта, построить эпюры усиления, определить аномалии собственных форм колебаний, тем самым выделить возможные ослабленные зоны.

Установлено, что выходы гранитов Магаданского батолита по сейсмическим характеристикам являются благоприятными грунтами. Благодаря им, после проведения СМР расчётную интенсивность на территории гидротехнических сооружений водохранилища № 2 возможно понизить [СП 14.13330.2018].

2.4. Уточнение исходного балла и СМР на хвостохранилище ГОКа «Лунное» и хвостохранилище Омсукчанской ЗИФ

Проведено ДСР участков сооружений хвостохранилища ГОКа «Лунное» и хвостохранилища Омсукчанской ЗИФ. Площадь исследований ограничена координатами $61.6\text{--}64.0^\circ\text{N}$ и $152.5\text{--}158.0^\circ\text{E}$. Выявлены и оценены характеристики сейсмогенерирующих разломов и зон ВОЗ (рис. 5). Выделено семь зон ВОЗ: Маратская, Кырчанская, Омсукчанская, Купкинская, Буксундинская, Безымянная-3, Наяханская [Алёшина и др., 2018]. Максимальная магнитуда ПМЗ вблизи сооружений хвостохранилищ, рассчитанная по глубинному разлому Улахан, $M=8.2$. Максимальная расчётная интенсивность сотрясений на площадке сооружений хвостохранилища Омсукчанской ЗИФ $I=8.5$ балла, она достигается при ПМЗ с магнитудой $M=7.1$ и эпицентральной дистанцией ~ 29 км в зоне Безымянного-3 разлома субмеридионального направления. Этот разлом за весь период наблю-

дений был асейсмичным, однако ПМЗ может произойти и в зоне затишья. Максимальная расчётная интенсивность сотрясений на площадке сооружений хвостохранилища ГОКа «Лунное» $I=8.9$ баллов, она достигается при ПМЗ с магнитудой $M=7.4$ и эпицентральной дистанцией ~ 28 км в зоне Кырчанского глубинного разлома субширотной ориентации. Согласно данным о механизмах очагов сильнейших землетрясений, современные типы подвижек по разломам – сдвиги, надвиги, сбросы и взбросы. Близ эпицентров землетрясений преобладают субвертикальные смещения ($60\text{--}80^\circ$). Сейсмическая интенсивность, наблюдаемая в окрестностях сооружений хвостохранилища ГОКа «Лунное» и хвостохранилища Омсукчанской ЗИФ, не превышает расчётной. Сотрясения на изучаемой территории до настоящего времени не превышали 5 баллов, что существенно ниже, чем указано на картах ОСР-97 и ОСР-2015. Результаты уточнения исходной сейсмичности в целом согласуются с данными ОСР.

2.5. Уточнение исходного балла и СМР участка основных сооружений Колымской ГЭС

С учётом геолого-геофизических [Кузнецов, 2001] и сейсмологических материалов для района Колымской ГЭС проведено ДСР и СМР. Площадь детальных сейсмологических исследований ограничена координатами $\varphi=60.7\text{--}63.5^\circ\text{N}$ и $\lambda=147\text{--}153.5^\circ\text{E}$. По результатам ДСР, исходная сейсмичность района Колымской ГЭС по карте ОСР-2015-С (период повторяемости ~ 5000 лет) составила 8.8 баллов. Магнитуда наиболее опасного для сооружений Колымской ГЭС землетрясения составит $M=6.5$ при эпицентральной дистанции 10 км. При проведении СМР в качестве эталонного участка была выбрана площадка выхода скальных грунтов, где исходная сейсмичность с учётом ДСР составила 7.8 балла. Расчётным путём получены приращения балльности и определена расчётная интенсивность сейсмического воздействия на участках основных сооружений Колымской ГЭС [СП 283.1325800.2016; РСН 65-87]. По данным двух методов (регистрации землетрясений и сейсмических жёсткостей), интенсивность сотрясений 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 (табл. 2). Это вполне объяснимо тем, что граниты основания по сейсмическому воздействию относятся к грунтам I категории [СП 14.13330.2018]. Построена карта-схема интенсивности сотрясений для основных сооружений Колымской ГЭС (рис. 6).

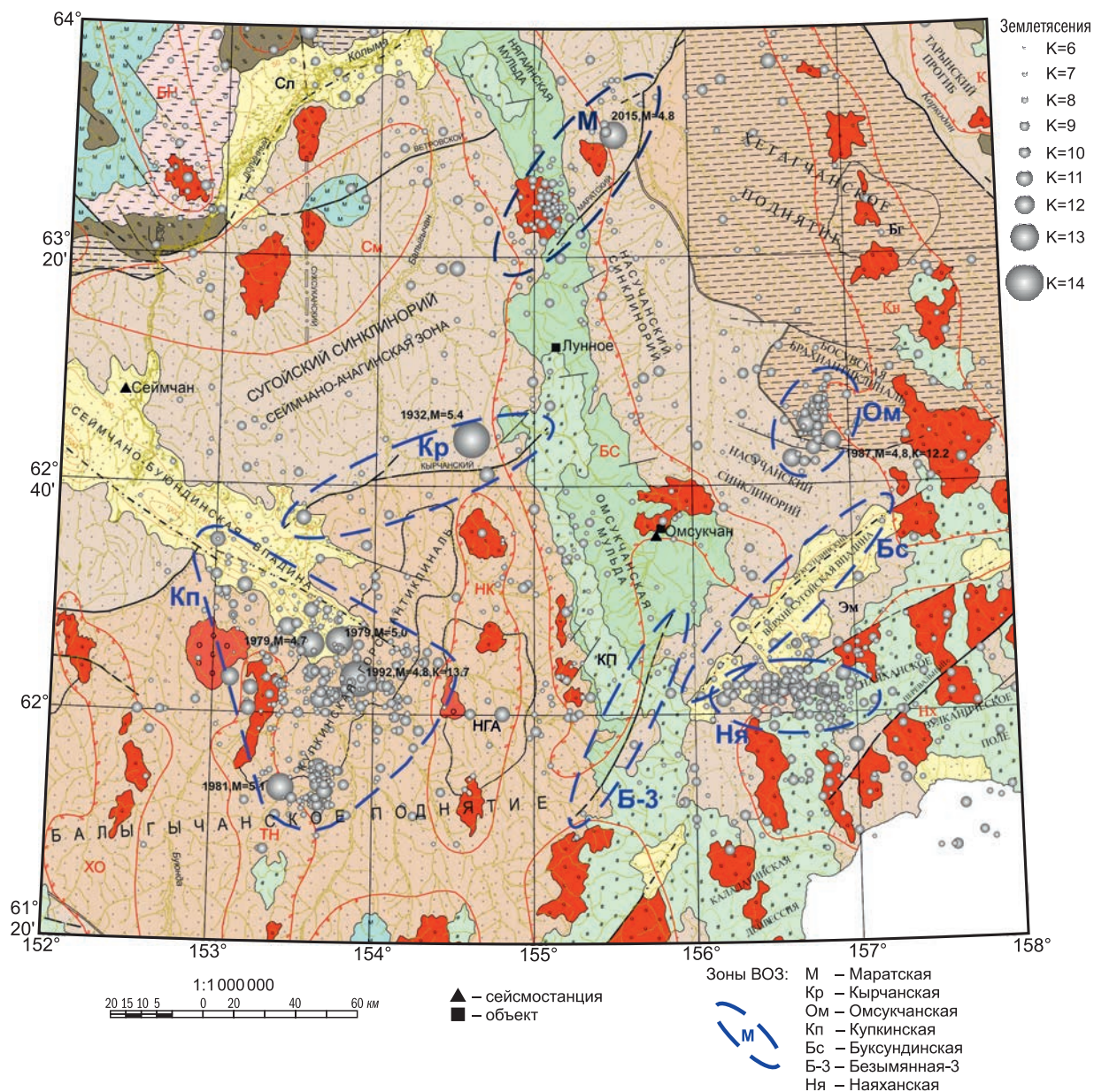


Рис. 5. Тектоническая схема района сооружений хвостохранилища ГОКа «Лунное» и хвостохранилища Омсукчанской ЗИФ [Кузнецов, 2001] с эпицентрами землетрясений и зонами ВОЗ. Период наблюдений – с 1932 г. по сентябрь 2017 г.

Таблица 2. Результаты определения приращения балльности ΔI на участках основных сооружений Колымской ГЭС

Станция	Характеристика грунта	Метод регистрации землетрясений		№ профиля	Метод сейсмических жёсткостей	
		ΔI , баллы	I , баллы		ΔI , баллы	I , баллы
kges M-1	Скальные грунты	эталон	7.8	71	эталон	7.8
kges L-3	Скальные граниты	0.31	8.1	–	–	–
kges B-2	Скальные граниты	0.49	8.3	–	–	–
kges R-3	Несцементированный талый грунт	-0.004	7.8	73	0.33	8.1
kges P-4	Скальные граниты	1.5	9.3	–	–	–
		–	–	74	0.38	8.2
		–	–	76	0.6	8.4

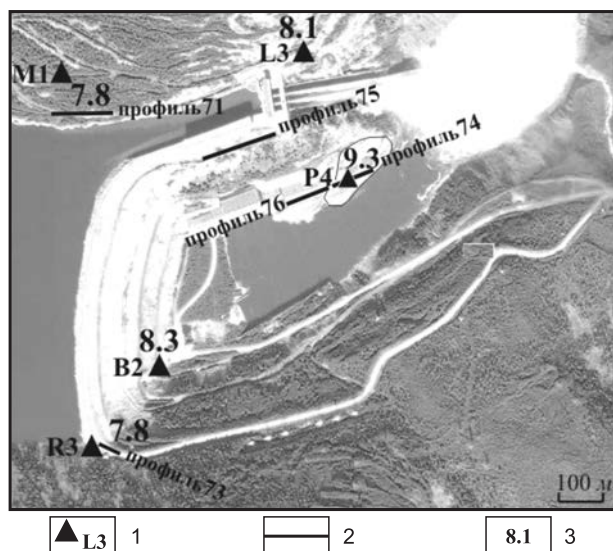


Рис. 6. Карта-схема интенсивности сотрясений для основных сооружений Колымской ГЭС для периода повторяемости 5000 лет; положение сейсмических станций временной локальной сети и продольных сейсмопрофилей.

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

2.6. Уточнение исходного балла и СМР в районе основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС

Площадь детальных сейсмологических исследований ограничена координатами 61.5–63.4°N и 150.5–154.3°E. В окрестностях сооружений Усть-Среднеканской ГЭС выделено пять зон ВОЗ и описано пять разломов, генерирующих землетрясения. Определено местоположение потенциальных очагов землетрясений, от которых сейсмический эффект на площадках сооружений Усть-Среднеканской ГЭС может оказаться максимальным. Согласно данным о механизмах очагов сильнейших землетрясений, современные типы подвижек по разломам – сдвиги, надвиги, сбросы и взбросы. Близ эпицентров землетрясений преобладают субвертикальные смещения. Сотрясения на изучаемой территории до настоящего времени не превышали 5 баллов, что существенно ниже, чем указано на картах ОСР-2016. Большинство зарегистрированных землетрясений, в том числе и самые сильные, приурочены к крупнейшим глубинным разломам: Улахан и скрытому разлому фундамента. Наиболее опасные для сооружений Усть-Среднеканской ГЭС очаги ПВМЗ – землетрясения с условными названиями 3-1 и 3-3, которые могут быть приурочены к асейсмичному Правооротуканскому разлому и северо-западному сегменту разлома Улахан соответственно. Максимальная магни-

туда ПВМЗ 3-1, рассчитанная по длине Правооротуканского разлома, $M=7.6$, при его реализации максимальная расчётная интенсивность на площадке сооружений Усть-Среднеканской ГЭС составит 10 баллов при эпицентральной расстоянии 17 км. Вероятность возникновения такого события ниже, чем для карты ОСР-2016-С, т.е. его повторяемость реже, чем один раз в 5000 лет. Правооротуканский разлом субширотного простирания за весь период наблюдений был асейсмичным. Максимальная магнитуда ПВМЗ 3-3, рассчитанная по длине северо-западного сегмента разлома Улахан, $M=7.9$. При его реализации максимальная расчётная интенсивность на площадке сооружений Усть-Среднеканской ГЭС составит 9.4 балла на эпицентральной расстоянии 35 км. Это вполне согласуется с данными карты ОСР-2016-С, согласно которой вблизи сооружений Усть-Среднеканской ГЭС расположена зона с интенсивностью сотрясений >9 баллов. По результатам ДСР, исходную сейсмичность района сооружений Усть-Среднеканской ГЭС следует принять по карте ОСР-2016-А 8 баллов, по карте ОСР-2016-В – 9 баллов, по карте ОСР-2016-С – 9.4 балла. При вероятностном анализе сейсмической опасности рассматривались самые неблагоприятные условия.

Результаты СМР, выполненного методом сейсмических жёсткостей и методом регистрации землетрясений и взрывов, кратко представлены в табл. 3.

Согласно результатам СМР, наиболее опасна в сейсмическом отношении площадка Левобережной части грунтовой плотины (центр), где при периоде повторяемости 5000 лет (по карте ОСР-2016-С) интенсивность сотрясений может составлять 9 баллов. На других объектах исследований по результатам СМР расчётная интенсивность составит 7–7.5 балла для периода повторяемости 500 лет, 8–8.5 балла для периода повторяемости 1000 лет и 8.4–8.9 балла для периода повторяемости 5000 лет.

Результаты исследований для основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС отображены на картах-схемах интенсивности сотрясений для периодов повторяемости 500, 1000 и 5000 лет (рис. 7).

2.7. Уточнение исходного балла и СМР района строительства горнодобывающего и перерабатывающего предприятия на месторождении «Тэу-тэджак»

Площадь детальных сейсмологических исследований ограничена координатами 59.3–62.0°N

Таблица 3. Сводная таблица результатов определения приращения балльности ΔI на участках основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС

Название объекта	Метод регистрации землетрясений		Метод сейсмических жёсткостей		Расчётная интенсивность I по картам ОСР-2016, баллы		
	станция	ΔI , баллы	№ профиля	ΔI , баллы	$T=500$ лет	$T=1000$ лет	$T=5000$ лет
Пункт ЛСС «Створ»	UGES1	0.40	№ 1	0.47	7.5	8.5	8.9
Левобережная часть грунтовой плотины (центр)	UGES4	0.13	№ 2	0.50	7.5	8.5	9.0
Технологическая площадка	UGES2	0.14	№ 3	0.40	7.4	8.4	8.8
Здания хозблоков и проходной, водоотводящий канал	—	—	№ 4	0.17	7.2	8.2	8.6
Приплотинное здание ГЭС и станционная бетонная плотина	UGES3	эталон	—	—	7.0	8.0	8.4
Левобережная часть грунтовой плотины (восток)	—	—	№ 5	эталон	7.0	8.0	8.4
Порталы ЛЭП, здание эксплуатационных служб	—	—	№ 6	0.29	7.3	8.3	8.7

и 147–152°Е. В окрестностях строительства горнодобывающего и перерабатывающего предприятия на месторождении «Тэутэджак» выделены десять зон ВОЗ и восемь разломов, генерирующих землетрясения. Определено местоположение ПВМЗ, сейсмический эффект от которых на площадке строительства может быть максимальным. Большинство землетрясений приурочено к крупнейшим глубинным разломам и скрытым разломам фундамента. Наиболее опасны для площадок строительства очаги землетрясений, которые приурочены к Хуренскому и Челомджа-Ямскому активным разломам. Сотрясения на изучаемой территории до настоящего времени не превышали 4 баллов, что существенно ниже, чем указано на картах ОСР-2015. Согласно данным о механизмах очагов землетрясений, современные типы подвижек по разломам — сдвиги со сбросами и взбросами. Близ эпицентров преобладают субвертикальные смещения (63–68°).

По результатам ДСР исходную сейсмичность района строительства горнодобывающего и перерабатывающего предприятия для объектов повышенного уровня ответственности следует принять по карте ОСР-2015-С (период

повторяемости ~5000 лет) — 9 баллов, магнитуда наиболее опасного землетрясения, согласно расчётам, составит $M=7.5$ при эпицентральной расстоянии 5 км. Для объектов с нормальным уровнем ответственности исходная сейсмичность принята по карте ОСР-2015-В (период повторяемости ~1000 лет) — 8 баллов, магнитуда наиболее опасного землетрясения, согласно расчётам, составит $M=6.8$ при эпицентральной расстоянии 5 км.

Согласно результатам СМР, грунты в основании площадок строительства относятся к I категории по сейсмическим свойствам. Величина исходной сейсмичности на них уменьшается на 1 балл [СП 14.13330.2018]: по карте ОСР-2015-В — 7 баллов, по карте ОСР-2015-С — 8 баллов.

Итоговые значения расчётной интенсивности сотрясений на месторождении «Тэутэджак» на участках с различными грунтовыми условиями приведены в табл. 4. Карты-схемы интенсивности сотрясений для предпроектного периода (для мёрзлых грунтов) и карта-схема прогнозной интенсивности сотрясений на конец 10-летнего периода эксплуатации месторождения (для талых грунтов) показаны на рис. 8а, б.

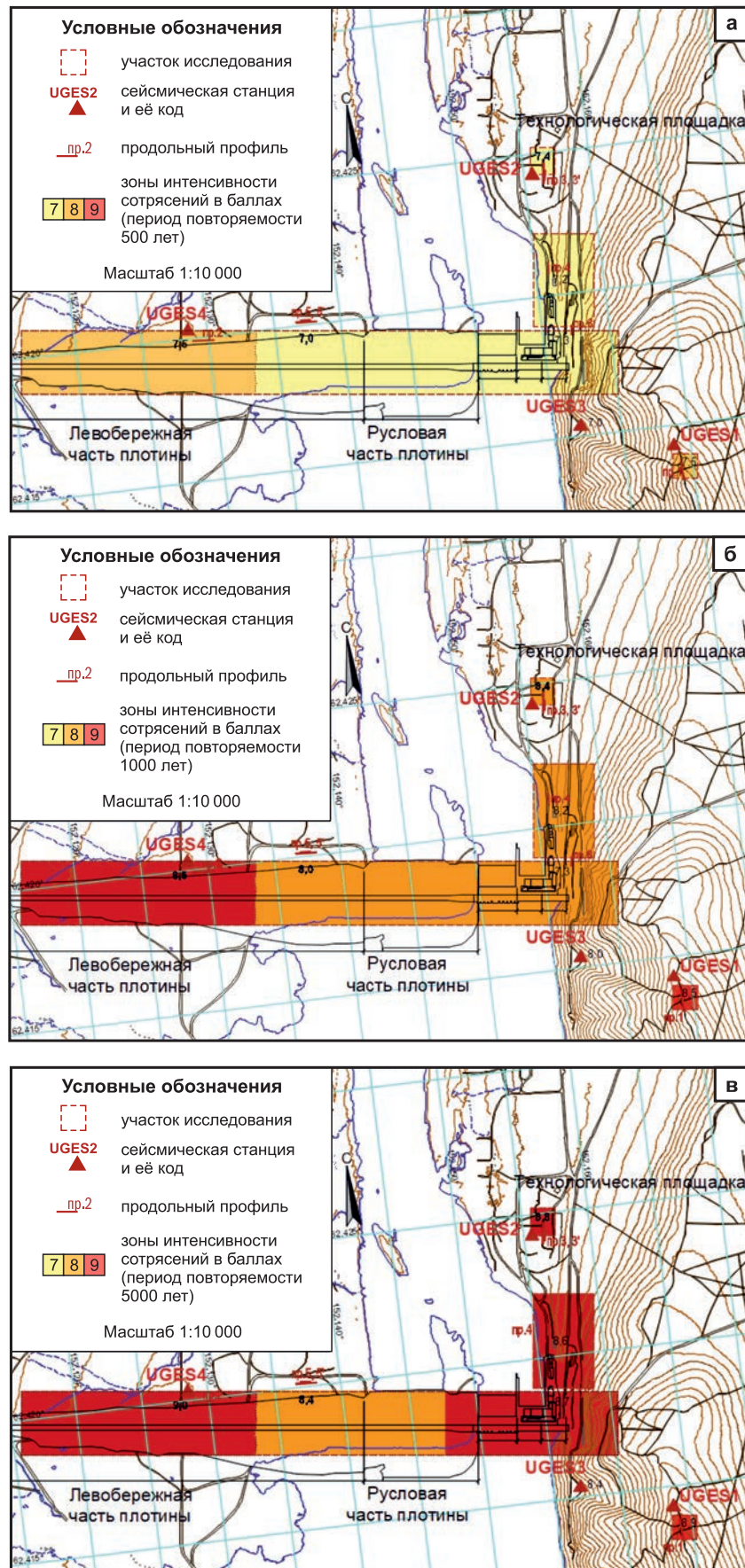


Рис. 7. Карта-схема интенсивности сотрясений на площадках основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС для разных периодов повторяемости: а – 500 лет; б – 1000 лет; в – 5000 лет

Таблица 4. Сводная таблица результатов определения приращения балльности ΔI на объектах месторождения «Тэутэджак»

Объект	Станция	Профиль	Метод регистрации землетрясений		Метод сейсмических жёсткостей		$I_{исх}$, баллы	$I_{расч}$, баллы	
			ΔI , баллы	I , баллы	ΔI , баллы	I , баллы		мёрзлый грунт	талый грунт
Карьер	ТТJK1	№ 5	0.18	8.2	0.10	8.1	8	8.2	8.2
Склад ВМ	ТТJK2	№ 3	0.19	8.2	0.36	8.4	8	8.4	8.5
ЗИФ	ТТJK4	№ 1	эталон	8.0	эталон	8.0	8	8.0	8.0
ДЭЗ		№ 6			0.60	7.6	7	7.6	7.8
ДЭЗ 2		№ 9			0.91	8.9	8	8.9	8.9
Дамба	ТТJK3	№ 4	1.1	9.1	0.45	8.5	8	9.1	9.1
Хвостохр.	ТТJK3	№ 4	1.1	8.1	0.50	7.5	7	8.1	8.3
Склад АХОВ		№ 7			0.30	7.3	7	7.3	7.5
Водозабор		№ 8			0.30	7.3	7	7.3	7.5
Склад ПП		№ 10			0.20	8.2	8	8.2	8.3
Посёлок		№ 2			0.30	7.3	7	7.3	7.4

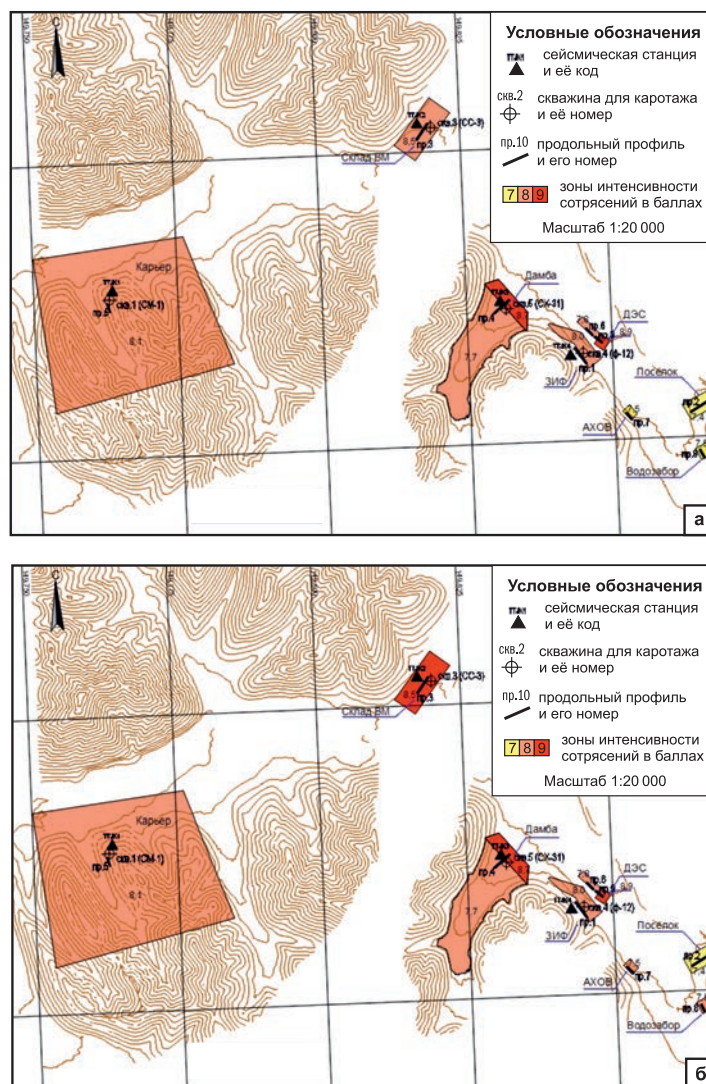


Рис. 8. Карта-схема интенсивности сотрясений: а – для предпостроечного периода (мёрзлое состояние грунтов); б – на конец 10-летнего периода эксплуатации месторождения (талое состояние грунтов)

На площадках строительства сооружений с повышенным уровнем ответственности, кроме определений сейсмоакустических свойств по поверхностным профилям, получены сейсмоакустические характеристики методами сеймокаротажа скважин глубиной 70 м. Полученные результаты исследований использованы для построения синтетических акселерограмм МРЗ на горизонтальных и вертикальных составляющих движения.

Выделено два очага сценарных землетрясений с магнитудами $M=7.0$ и 6.5 . Рассчитаны модельные акселерограммы колебаний для МРЗ и ПЗ на поверхности на десяти площадках строительства (рис. 9). Для расчёта акселерограмм использовалась программа Д. Бура, модифицированная О.В. Павленко [Boore, Joyner, 1997; Boore, 2003; Павленко, 2005].

Согласно полученным оценкам, при сценарном землетрясении Z1 на поверхности грунта максимальные ускорения составят $37\text{--}102\text{ см/с}^2$, а максимальные скорости смещения – $2.6\text{--}4.3\text{ см/с}$, что по шкале MSK-64 соответствует сейсмической интенсивности $5.6\text{--}7.0$ балла. Преобладающие периоды колебаний составляют $0.3\text{--}0.5\text{ с}$ для ускорений и $2.6\text{--}3.4\text{ с}$ – для скоростей смещения на поверхности.

В расчётах по карте ОСП-2015-В при сценарном землетрясении Z2 максимальные ускорения на поверхности грунта составят $138\text{--}280\text{ см/с}^2$, а максимальные скорости смещения – $10.5\text{--}16.5\text{ см/с}$, что по шкале MSK-64 соответствует сейсмической интенсивности $7.46\text{--}8.49$ балла. В расчётах по карте ОСП-2015-С максимальные ускорения от землетрясения Z2 составят $247\text{--}562\text{ см/с}^2$, а максимальные скорости смещения – $20.0\text{--}31.5\text{ см/с}$, что по шкале MSK-64 соответствует сейсмической интенсивности $8.30\text{--}9.49$ балла. Преобладающие периоды колебаний на поверхности составят $\sim 0.11\text{--}1.28\text{ с}$ для ускорений и 3.41 с – для скоростей смещения. Высокие оценки ускорений модельных акселерограмм, дающие интенсивность выше 9 баллов при расчётах по карте ОСП-2015-С, связаны с близостью Хуренского глубинного разлома (линеамента L0973), расположенного на расстоянии около 5 км от площадок строительства. Согласно проведённому ДСР, Хуренский разлом не проявлял существенной активности в новейшее время. Вероятность возникновения 9-балльного события не поддаётся расчёту и, очевидно, ниже вероятности сотрясений, принятых для карты ОСП-2015-С ($<0.5\%$ за период 50 лет). По результатам ДСР принята максимальная расчётная интенсивность $I_0=9$ баллов с расчётной маг-

нитудой максимального землетрясения $M=7.5$, периодом повторяемости 5000 лет, как указано в карте ОСП-2015-С. В связи с близостью Хуренского глубинного разлома к площадкам строительства в районе месторождения «Тэутэджак», требуется организации постоянного инструментального сейсмологического мониторинга.



Рис. 9. Сейсмогенерирующие структуры в окрестности рудника «Тэутэджак»: линеаменты (толстые чёрные линии), домен D0390, очаги сценарных землетрясений Z1, Z2, Z3, выбранных в соответствии с картами ОСП-2015-В (а) и ОСП-2015-С (б).

Положение рудника отмечено красным треугольником

Обсуждение результатов и выводы

Полученные результаты сейсмологических исследований говорят о том, что сейсмичность Северо-Востока России в период 2016–2020 гг. в целом соответствует фоновому уровню. Это подтверждается тем, что все зарегистрированные землетрясения приурочены к ранее известным сейсмогенным зонам, таким как сейсмический пояс Черского и Северо-Охотский пояс, а гипоцентры очагов расположены в земной коре на глубинах до 33 км. Событий, которые могли бы существенно повлиять на параметры сейсмического режима в регионе, не произошло, причём, несмотря на значительный рост числа регистрируемых промышленных взрывов в исследуемый период, сейсмическая опасность от природных землетрясений по-прежнему превалирует.

Современная организация сбора и обработки новых данных позволяет фиксировать сравнительно большее количество событий, при этом энергетический порог представительной регистрации снижается, а оперативность информирования о сильных событиях и актуализации информационных ресурсов растёт, как и их доступность. Всё это, безусловно, способствует повышению детальности в исследованиях, связанных с сейсмичностью в регионе.

Детальные карты сейсмической опасности, построенные для Северо-Востока РФ (Магаданская область), в сравнении с картами ОСР в целом дают такую же или несколько меньшую сейсмическую опасность, что связано с более точным учётом множества составляющих сейсмичности: расположения очагов ПМВЗ в пределах зон ВОЗ и сейсмогенерирующих глубинных разломов, механизмов очагов, модели затухания и др. Эти же факторы позволили оконтурить зоны с различной балльностью с большим пространственным разрешением, что оказалось весьма полезным и своевременным при получении уточнённых оценок сейсмичности в пределах множества конкретных площадок строительства объектов горнодобывающего и энергетического комплексов Магаданской области. Учитывая, что для большинства рассмотренных площадок характерно преимущественное распространение грунтов I категории по сейсмическим свойствам, возможны заметное снижение оценок расчётной сейсмичности и последующая безопасная эксплуатация строящихся объектов.

В то же время практически основную опасность для площадок представляет близость глубинных разломов. Некоторые из них за весь

период инструментальных наблюдений ни разу не проявили себя. Однако данный факт не означает, что они полностью асейсмичны. Напротив, в условиях, когда многие другие аналогичные разломы имеют значительный сейсмический потенциал, имеет смысл, как минимум, продолжать непрерывные сейсмологические наблюдения, а в отдельных районах даже детализировать их посредством установки новых сейсмических станций.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфраструктурный комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

Алёшина Е.И., Габдрахманова Ю.В., Чернецова А.Г. Каталог (оригинал) землетрясений Северо-Востока России и Чукотки за 2016–2020 гг. – Магадан: Фонды МФ ФИЦ ЕГС РАН, 2020.

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. 343–351.

Алёшина Е.И., Курткин С.В., Карпенко Л.И., Ведерников Е.И. Исследование региональной сейсмичности в районе хвостохранилища на руднике «Ветренский» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 20–23.

Алёшина Е.И., Курткин С.В., Седов Б.М. Сейсмичность Омсукчанского района, и оценка сейсмической безопасности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 8–11.

Габсатарова И.П., Лутиков А.И. Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование параметров сейсмического режима основных сейсмоактивных регионов Северной Евразии с целью уточнения сейсмического потенциала и особенностей развития очаговых зон» (заключительный). – Обнинск: Фонды ФИЦ ЕГС РАН, 2015. – 128 с.

Джурик В.И., Дренов А.Ф., Иванов Ф.И., Потапов В.А. и др. Сейсмические свойства скальных грунтов. – Новосибирск: Наука, 1987. – 161 с.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальных инженерно-

- сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. — 2002. — № 2. — С. 192–207.
- Кузнецов В.М. Схема тектонического районирования Охотско-Колымского водораздела. Масштаб 1:1000000. — Магадан: ФГУП «Магадангеология», 2001. — 8 листов.
- Курткин С.В., Алёшина Е.И., Карпенко Л.И., Ведерников Е.И. оценка сейсмической опасности на объекте «Хвостохранилище на руднике “Ветренский”» Магаданской области // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Шестая научно-техническая конференция. 30 сентября 2017 г., г. Петропавловск-Камчатский. Тезисы докладов. — Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2017. — С. 42.
- Курткин С.В., Ведерников Е.И., Алёшина Е.И., Карпенко Л.И. Исследование сейсмоакустических параметров верхней части разреза в районе хвостохранилища на руднике «Ветренский» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. — С. 207–209.
- 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.
- Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Донцова Г.Ю. Уточнение исходной сейсмичности территорий в условиях их слабой сейсмической изученности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Четвёртой Международной сейсмологической школы. — Обнинск: ГС РАН, 2009. — С. 99–106.
- Павленко О.В. Исследование поведения грунтов при сильных землетрясениях по записям вертикальных сейсмических групп // Физика Земли. — 2005. — № 2. — С. 30–40.
- 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.
- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 2011. — № 2. — С. 53–59.
- Седов Б.М. Сейсмические исследования в районах многолетней мерзлоты. — М.: Наука, 1988. — 188 с.
- СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. — М.: Стандартинформ, 2018. — 116 с.
- СП 283.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования. — М.: Минстрой, 2016. — 21 с.
- СП 286.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования. — М.: Минстрой, 2016. — 33 с.
- Уломов В.И., Никонов А.А., Медведева Н.С. и др. Комплект актуализированных карт ОСР-97*. — М.: ОИФЗ РАН, 2012.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населённых пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. — М.: ОИФЗ РАН, 1999. — 57 с.
- Boore D.M. Simulation of ground motion using the stochastic method // Pure and Applied Geophysics. — 2003. — V. 160. — P. 635–676.
- Boore D.M., Joyner W.B. Site amplifications for Generic Rock Sites // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1997. — V. 87. — P. 327–341.

Сведения об авторах

Карпенко Лариса Ивановна, канд. геол.-мин. наук, уч. секретарь 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: Larisa@memsd.ru

Алёшина Евгения Ильинична, нач. отдела МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия. E-mail: Evgeniya@memsd.ru

Ведерников Евгений Игоревич, нач. отдела МФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Россия. E-mail: e.vedernikov@gmail.com

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

Results of fundamental and applied seismological research in the Magadan region in 2016–2020

© 2021 L.I. Karpenko, E.I. Aleshina, S.V. Kurtkin, E.I. Vedernikov, V.V. Atrokhin

MB GS RAS, Magadan, Russia

Received February 19, 2021

Abstract The results of fundamental and applied research, carried out by Magadan Branch of GS RAS during 2016–2020 in Magadan and Chukotka regions are presenting. Estimation of Seismic hazard of Russia's Northeast (Magadan region) and seismic hazard maps for recurrence periods of 500, 1000 and 5000 years in scale close to that of detailed seismic zoning (DSZ) were made in cooperation with Institute of the Earth's Physics RAS. In course of this work the estimation of initial seismic intensity and parameters of possible ground shaking in areas of critical facilities of Magadan region were made. For all of them a seismic micro zonation was carried out with methods of direct earthquake registration and comparing acoustic impedance. As result, a seismic amplification and intensity of seismic impact on the soils under main critical facilities were obtaining. The research results are shown on detailed seismic zoning maps that are basic for building projects of objects above.

Keywords seismic hazard, seismic activity, source zones, seismic shake parameters, detailed seismic zoning, seismic microzoning, seismic profiling.

For citation Karpenko, L.I., Aleshina, E.I., Kurtkin, S.V., Vedernikov, E.I., & Atrokhin, V.V. (2021). [Results of fundamental and applied seismological research in the Magadan region in 2016–2020]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(4), 58–76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.04>

References

- Aleshina, E.I., Gabdrakhmanova, J.V., & Chernetsova, A.G. (2020). *Katalog (original) zemletryasenij Severo-Vostoka Rossii i CHAO za 2016–2020 gg.* [Catalog (original) of earthquakes in the North-East of Russia and Chukotka for 2016–2020.]. Magadan, Russia: Funds MB GS RAS. (In Russ.).
- Aleshina, E.I., Gunbina, L.V., Ivanova, E.I., Karpenko, L.I., & Sedov, B.M. (2015). [Lankuchanskoe earthquake on December 26, 2009 with $K_R=13.0$, $MPSP=4.5$, $I_0=6-7$ (North-East)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2009 god* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2009] (pp. 343–351). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Aleshina, E.I., Kurtkin, S.V., Karpenko, L.I., & Vedernikov, E.I. (2017). [Research of regional seismicity in the tailing dam area at the Vetrensky mine]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretacii seismologicheskikh dannykh. Materialy XII Mezhdunarodnoj seismologicheskoi shkoly (Otv. red. A.A. Malovichko)* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XII International Seismological Workshop (Ed. A.A. Malovichko)] (pp. 20–23). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Aleshina, E.I., Kurtkin, S.V., & Sedov, B.M. (2018). [The seismicity of the Omsukchan region and estimation of its seismic potential]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretacii seismologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoj seismologicheskoi shkoly (Otv. red. A.A. Malovichko)* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XIII International Seismological Workshop (Ed. A.A. Malovichko)] (pp. 8–11). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Boore, D.M. (2003). Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 635–676.
- Boore, D.M., & Joyner, W.B. (1997). Site amplifications for Generic Rock Sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, 327–341.
- Dzhurik, V.I., Drenov, A.F., Ivanov, F.I., Potapov, V.A., et al. (1987). *Seismicheskie svoystva skal'nykh gruntov* [Seismic properties of rock soils]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 161 p. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Seleznev, V.S., Bakh, A.A., Gritsenko, S.A., Danilov, I.A., Kuzmenko, A.P., Saburov, V.S., & Tat'kov, G.I. (2002). [Inversion of standing waves in detailed engineering seismological investigations]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2, 192–207. (In Russ.).
- Gabsatarova, I.P., & Lutikov, A.I. (2015). *Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote "Issledovanie parametrov seismicheskogo rezhima osnovnykh seismoaktivnykh regionov Severnoi Evrazii s tsel'iu utocneniia seismicheskogo potentsiala i osobennostei razvitiia ochagovykh zon" (zakliuchitel'nyi)*. [Report on the research work "Study of

the parameters of the seismic regime of the main seismically active regions of Northern Eurasia in order to clarify the seismic potential and features of the development of focal zones" (final). Obninsk, Russia: Funds GS RAS, 128 p. (In Russ.).

Kurtkin, S.V., Aleshina, E.I., Karpenko, L.I., & Vedernikov, E.I. (2017). [Seismic hazard Assessment on the "Tailings at the mine Vetrinsky" region]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Shestaia nauchno-tekhnicheskaja konferentsiia. 30 sentiabria 2017 g., g. Petropavlovsk-Kamchatskii. Tezisy dokladov* [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East. Sixth Scientific and Technical Conference. September 30, 2017, Petropavlovsk-Kamchatsky. Abstracts of reports] (p. 42). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: KB GS RAS Publ. (In Russ.).

Kurtkin, S.V., Vedernikov, E.I., Aleshina, E.I., & Karpenko, L.I. (2018). [Research of subsurface seismoacoustic parameters in the tailing dam area at the Vetrinsky mine]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoj seismologicheskoi shkoly (Otv. red. A.A. Malovichko)* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XIII International Seismological Workshop (Ed. A.A. Malovichko)] (pp. 207-209). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Kuznetsov, V.M. (2001). *Skhema tektonicheskogo raionirovaniia Okhotsko-Kolymnskogo vodorazdela. Masshtab 1:1000000* [Scheme of tectonic zoning of Okhotsk-Kolymsky watershed. Scale 1:1,000,000]. Magadan, Russia: Magadan Federal State Unitary Enterprise «Magadan-geologiya» 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 North-East of the Russian Federation (Magadan region) on a scale close to the scale of the DSR]. *Voprosy inzhenernoj seismologii* [Questions of engineering seismology], 46(3), 16-31. (In Russ.).

Lutikov, A.I., Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., & Dontsova, G.Yu. (2009). [Territories seismic hazard assessment in case of their weak seismological study]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy Chetvertoi Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the Fourth International Seismological Workshop] (pp. 99-106). Obninsk, Russia: GS RAS. (In Russ.).

Pavlenko, O.V. (2005). Soil behavior during strong earthquakes from records of vertical seismic arrays. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 41(2), 121-131.

Riznichenko, Yu.V. (1979). *Seismicheskaya sotryasaemost' territorii SSSR* [Seismic shaking of the USSR territory]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 190 p. (In Russ.).

RSN 65-87 (1988). *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Seismicheskoe mikrorajonirovanie. Tekhnicheskie trebovaniya k proizvodstvu rabot* [Engineering surveys for construction. Seismic microdistricting. Technical requirements for the production of works]. Moscow, Russia: Gosstroy RSFSR Publ., 8 p. (In Russ.).

Saltykov, V.A. (2011). A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*, 5(2), 123-128.

Sedov, B.M. (1988). *Seismicheskie issledovaniya v rajonakh mnogoletnej merzloty* [Seismic studies in permafrost areas]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 188 p. (In Russ.).

SP 14.13330.2018 (2018). *Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonakh* [Construction in seismic areas]. Moscow, Russia: Standartinform Publ., 116 p. (In Russ.).

SP 283.1325800.2016 (2016). *Objecty stroitelniye povyshennoj otvetstvennosti. Pravila seismicheskogo mikrorajonirovaniya*. [Buildings of higher significance degree. Rules of seismic microzonation]. Moscow, Russia: Minstroj Publ., 21 p. (In Russ.).

SP 286.1325800.2016. (2016). *Objecty stroitelniye povyshennoj otvetstvennosti. Pravila detal'nogo seismicheskogo rajonirovaniya*. [Buildings of higher significance degree. Rules of detailed seismic zonation]. Moscow, Russia: Minstroj Publ., 33 p. (In Russ.).

Ulomov, V.I., & Shumilina, L.S. (1999). *Komplekt kart obshhego seismicheskogo rajonirovaniya territorii Rossijskoj federatsii – OSR-97. Masshtab 1:8000000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naseleennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh rajonakh* [Set of maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation-OSR-97. Scale 1: 8000000. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas]. Moscow, Russia: UIPE RAS Publ., 57 p. (In Russ.).

Ulomov, V.I., Nikonov, A.A., Medvedeva, N.S., et al. (2012). *Komplekt aktualizirovannykh kart OSR-97** [Set of updated OSR-97* maps]. Moscow, Russia: UIPE RAS Publ. (In Russ.).

Information about authors

Karpenko Larisa Ivanovna, PhD, Scientific Secretary of the Magadan Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (MB GS RAS), Magadan, Russia. E-mail: Larisa@memsd.ru

Aleshina Evgenia Ilyinichna, Head of Department of the MB GS RAS, Magadan, Russia. E-mail: Evgeniya@memsd.ru

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

Vedernikov Evgeniy Igorevich, Head of Department of the MB GS RAS, Magadan, Russia. E-mail: E.Vedernikov@gmail.com

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