

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-90-102>
УДК 550.34

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЙОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ ШУЛЬБИНСКОЙ ГЭС

Ә.А. Исағали*, Н.Н. Михайлова, М.В. Шульга

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: a.issagali@kndc.kz

Шульбинская гидроэлектростанция (ГЭС) является объектом повышенной инженерной ответственности, что требует уточненной оценки локальной сейсмической опасности. В работе представлены результаты инструментальных сейсмологических исследований территории Шульбинской ГЭС, выполненных с использованием пяти временных пунктов наблюдений (SB1–SB5). Произведен анализ спектральных характеристик микросейсмического шума, определен отклик грунтов методом HVSR, проведен анализ отношений амплитуд на разных станциях, полученных по записям землетрясений и взрывов для разных типов волн.

Показано, что исследуемая территория сейсмически неоднородна: наиболее выраженное локальное усиление сейсмических колебаний выявлено на насыпной плотине (пункт SB1) – приращение интенсивности по шкале MSK-64 составляет 0,7–0,9 балла, тогда как на остальных пунктах значимого увеличения интенсивности колебаний по отношению к эталонной станции не отмечается. Выявленные отличия связаны с грунтовыми условиями, показателем которых является значение V_{s30} , определенное проведенными сейсморазведочными работами по 10 профилям. На основании согласованных результатов HVSR и анализа волновых форм событий даны рекомендации по необходимости организации постоянного мониторинга состояния плотины сейсмическими методами.

Ключевые слова: Шульбинская ГЭС, сейсмическая опасность, сейсмическая станция, сейсмическое микрорайонирование, HVSR, сейсмические шумы, приращение интенсивности.

ВВЕДЕНИЕ

Шульбинская ГЭС представляет собой ответственный инженерный объект, для которого требуется детальная оценка сейсмических условий как в пределах плотины, так и на прилегающей территории. Особый интерес представляет выявление участков, где вследствие строения и параметров грунтов возможны локальное усиление колебаний и увеличение сейсмической интенсивности. Такие данные необходимы для уточнения сейсмичности площадки, районирования территории по сейсмическим свойствам грунтов и обоснования мероприятий по дальнейшему мониторингу состояния сооружений.

Район исследований административно расположен вблизи поселка Шульбинск Абайской области Республики Казахстан (рисунок 1). Площадка Шульбинской ГЭС находится в долине реки Иртыш, где были размещены временные сейсмические станции на различных участках гидротехнического сооружения и прилегающей территории. Пункты наблюдений охватывали насыпную плотину, правобережный участок, район «Лесник», территорию Михайло-Архангельского храма и западную часть поселка. Пункты наблюдений находятся в пределах территории с координатами 50.3894–50.4053° с. ш. и 81.0463–81.0835° в. д., что отражает локальный охват территории гидроузла и его ближайшего окружения.

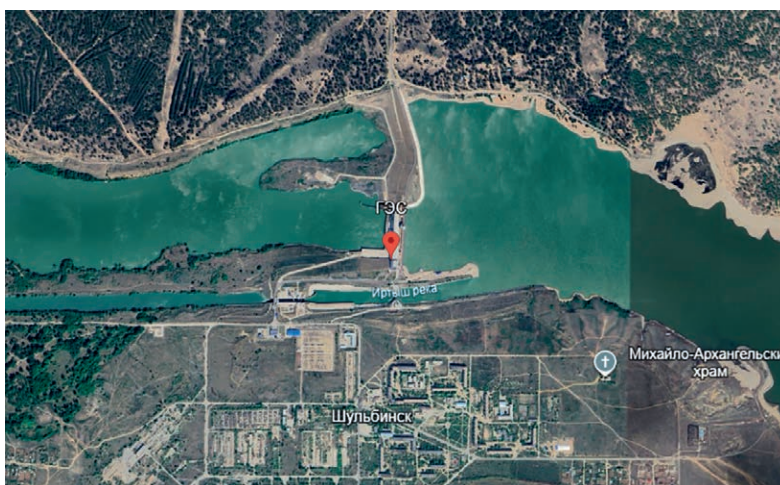


Рисунок 1. Шульбинская ГЭС, правобережная плотина

Целью настоящей работы является оценка сейсмических условий площадки Шульбинской ГЭС по данным инструментальных сейсмических наблюдений в различных точках территории гидроузла. В рамках исследования были поставлены задачи по регистрации сейсмических шумов и событий, анализу спектральных характеристик микросейсмического поля, определению параметров отклика грунтов методом HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) и количественной оценке приращения сейсмической интенсивности на исследуемых пунктах.

Сейсмотектоническая характеристика. Положение площадки Шульбинской ГЭС было изучено по картам общего сейсмического районирования территории Казахстана, утвержденным в качестве действующих на территории РК в 1978, 2006 и 2017 годах [1, 2, 3], на которых показано положение сейсмогенерирующих зон, изолинии сейсмической интенсивности в баллах по шкале MSK-64 и в пиковых ускорениях грунта (на картах 2017 г.).

По карте сейсмического районирования СССР 1978 г. (рисунок 2, а) район расположения площадки Шульбинской ГЭС относился к зоне с интенсивностью $I \leq 6$ баллов. Такая оценка отражала существовавший на то время этап изученности территории. Была недостаточно изучена сейсмичность Восточного Казахстана, отсутствовала сеть сейсмических станций в пределах рассматриваемого региона. Следовательно, по материалам этого периода площадка будущей Шульбинской ГЭС рассматривалась как находящаяся в асейсмичной зоне.

Шульбинская ГЭС была открыта в 1987 году, когда состоялся пуск первого гидроагрегата. Строительство гидроузла началось в 1976 году, а ввод всех шести гидроагрегатов был завершен в 1994 году. Следует отметить, что проектирование и строительство ГЭС осуществлялись в период действия карты сейсмического районирования 1978 года, согласно которой район расположения объекта относился к зоне с интенсивностью $I < 6$ баллов по шкале MSK-64. При проектировании площадка фактически рассматривалась как территория с расчетной сейсмичностью 6 баллов.

На карте общего сейсмического районирования Республики Казахстан 2006 г. (рисунок 2, б) ожидаемая интенсивность в районе площадки уже была оценена иначе. К этому времени в Восточном Казахстане в 1990 г. произошло сильное Зайсанское землетрясение [4] с магнитудой $M=6,9$, вызвавшее разрушение в близких к эпицентру поселках. Это землетрясение заставило пересмотреть карту сейсмического районирования всей территории Восточного Казахстана. После этого землетрясения Институтом сейсмологии АН КазССР были открыты первые сейсмические станции в этом районе. В 2003 году близ границы с Казахстаном произошло сильнейшее Чуйское землетрясение

(Алтайское) [5] с магнитудой $M=7,3$, ощущавшееся на большой территории Восточного Казахстана.

С начала 2000-х годов начали свою работу новые современные сейсмические группы сети Института геофизических исследований НЯЦ РК. По карте общего сейсмического районирования Казахстана 2006 г. изолинии балльности построены с учетом новых данных по регистрации сильных землетрясений. В результате район расположения Шульбинской ГЭС уже попадает в 6-балльную зону. Это свидетельствует о повышении нормативной оценки сейсмической опасности по сравнению с картой 1978 г. и отражает возросшую роль региональных сейсмотектонических представлений при оценке площадки.

Еще более существенные изменения претерпела оценка сейсмической опасности всего региона при составлении карты общего сейсмического зонирования (ОСЗ) 2017 г. По карте общего сейсмического зонирования 2017 г. (рисунок 2, в) для периода повторяемости 2475 лет район расположения площадки Шульбинской ГЭС относится к зоне с интенсивностью 7 баллов. Это означает возможность достижения здесь интенсивности 7 баллов и выше при 2%-ной вероятности превышения за 50 лет. Для сравнения, по картам 2017 г. для периода повторяемости 475 лет (рисунок 2, г) площадка Шульбинской ГЭС располагается в 6-балльной зоне, что отражает различие между нормативными уровнями сейсмического воздействия для обычных и ответственных сооружений.

Сопоставление карт 1978, 2006 и 2017 гг. показывает последовательное увеличение нормативной сейсмичности района расположения Шульбинской ГЭС: от $I < 6$ баллов по карте 1978 г. до 6 баллов по карте 2006 г. и до 7 баллов по действующим картам ОСЗ-2017 для ответственных объектов. Такая динамика связана с уточнением положения площадки относительно активных сейсмогенерирующих зон и с совершенствованием методов оценки сейсмической опасности в Казахстане. Следовательно, при оценке сейсмических условий Шульбинской ГЭС в качестве исходного нормативного уровня сейсмичности района должна приниматься сейсмичность 7 баллов, соответствующая действующим картам для периода повторяемости 2475 лет.

Вместе с тем, локальные условия в пределах гидроузла неоднородны, что может приводить к изменению параметров сейсмического воздействия на отдельных участках территории. Поэтому данные сейсмического районирования мы рассматривали как исходную основу для последующего уточнения сейсмичности площадки методами инструментальных сейсмологических наблюдений и сейсморазведки.

Методика исследований. Для оценки сейсмичности площадки с учетом локальных характеристик грунтовых условий территории Шульбинской ГЭС был выполнен комплекс инструментальных сейсмо-

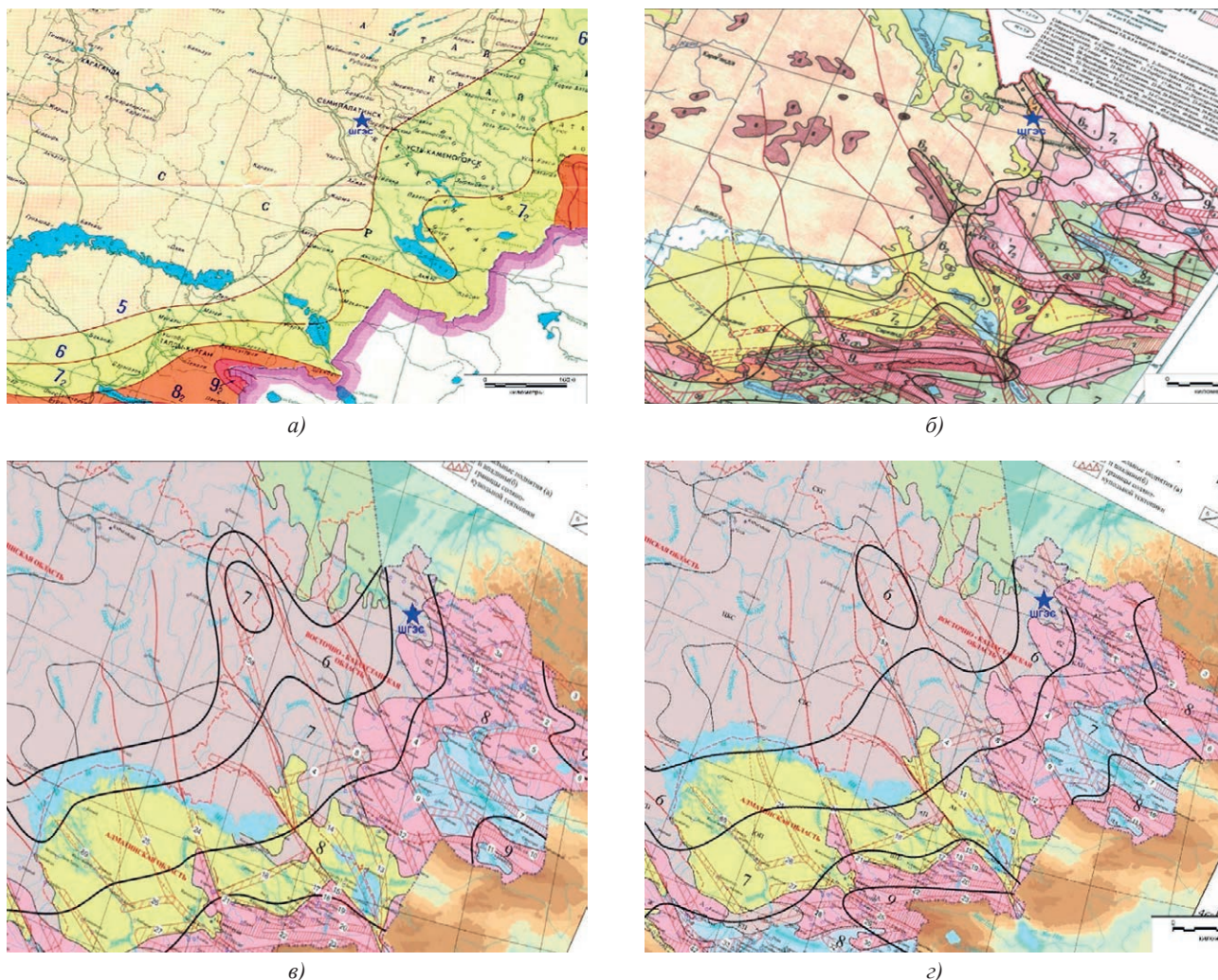


Рисунок 2. Фрагменты карт общего сейсмического районирования в баллах шкалы MSK-64: а) 1978 года, б) 2006 года, в) 2017 года для периода повторяемости 2475 лет и г) 2017 года для периода повторяемости 475 лет (изолинии баллов черного цвета) для района расположения площадки Шульбинской ГЭС

логических исследований, включающий регистрацию микросейсмического шума, колебаний при землетрясениях и взрывах, анализ спектральных характеристик шумового поля, HVSR-анализ.

Кроме сейсмологических исследований на этой же территории проводились и другие работы, в том числе сейсморазведочные. Их также проводила группа специалистов ИГИ НЯЦ РК, результаты также были использованы для оценок.

Сейсморазведочные исследования.

Первым этапом на территории Шульбинской ГЭС были выполнены сейсморазведочные исследования методом первых вступлений. В качестве источника упругих колебаний использовалась кувалда массой 6 килограммов. Продольные волны возбуждались вертикальными ударами, а поперечные SH-волны горизонтальными ударами. Для регистрации сигналов применялись вертикальные и горизонтальные сейсмоприемники, а регистрация выполнялась 48-ка-

нальной сейсмостанцией SGD-SEL. Наблюдения проводились по профилям длиной около 300 метров с шагом приемников 2 метра (рисунок 3). Для повышения качества записей использовалось накопление до 10 воздействий. Основной целью работ было определение скоростей поперечных волн и уточнение сейсмических свойств грунтов на различных участках площадки.

После окончания полевых наблюдений проводилась обработка волновых полей, включавшая фильтрацию техногенных помех, построение годографов первых вступлений и расчет скоростей распространения волн. Полученные результаты показали, что скорость поперечных волн существенно возрастает с глубиной: от примерно 200 м/с в верхней части разреза до 1500–1800 м/с на глубинах более 20–30 метров. Значения средней скорости поперечных волн $V_{s,30}$ изменяются в пределах от 294 до 740 метров в секунду при среднем значении около 440 метров в секунду (рисунок 4). Большая часть территории от-



1, 2 – профили сейсморазведочных зондирований первого (1) и второго (2) этапов; 3 – точки расположения сейсмологических станций (SB).

Рисунок 3. Схема отработки сейсморазведки территории, прилегающей к ГЭС, для сейсмического микрорайонирования

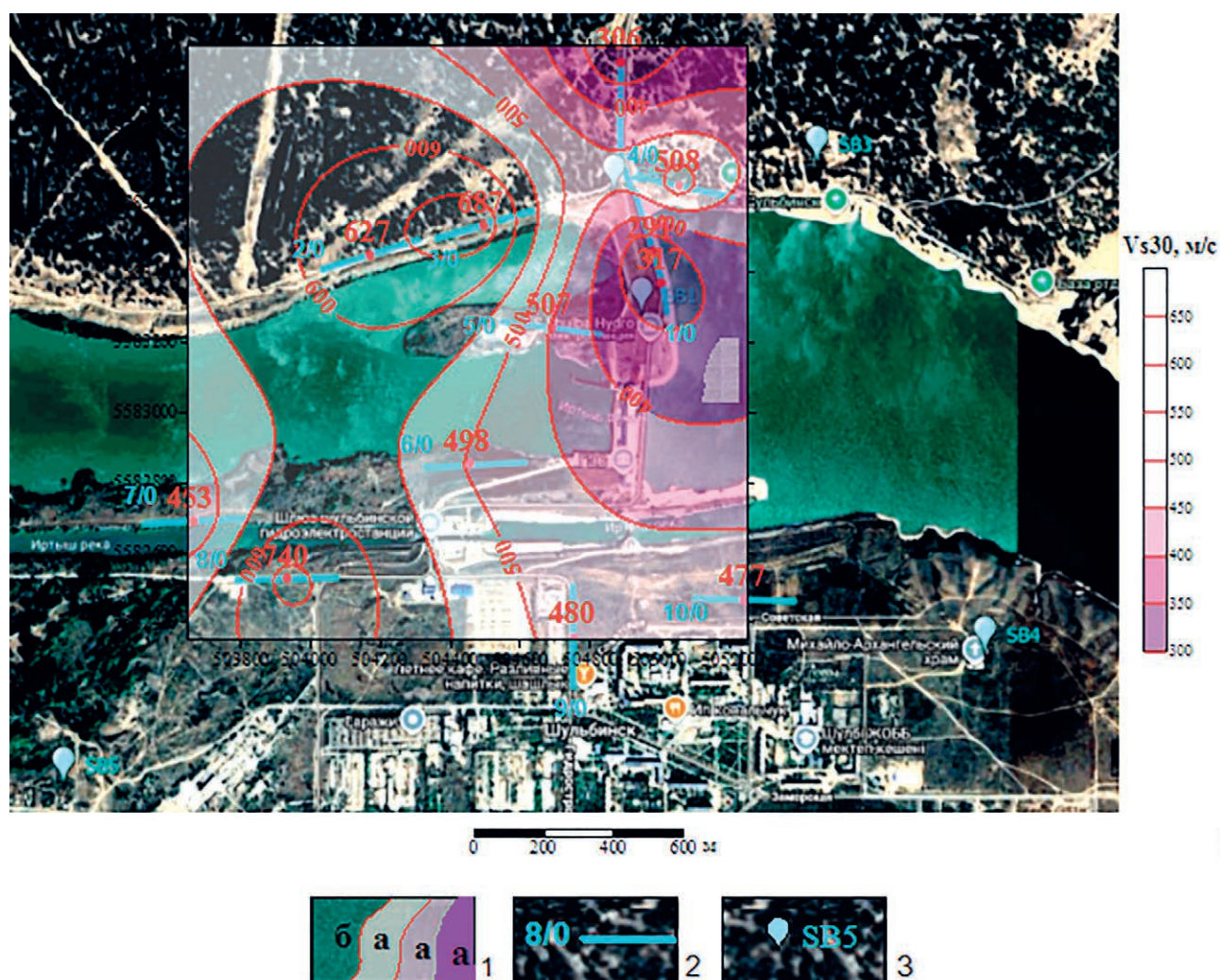
носятся ко II категории грунтов по сейсмическим свойствам. Однако в пределах насыпной плотины выявлены области с пониженными значениями скорости, где возможно локальное усиление сейсмических воздействий.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Инструментальные наблюдения проводились на пяти временных сейсмических станциях SB1–SB5, установленных на разных участках территории Шульбинской ГЭС и прилегающей зоны (рисунок 5, таблица 1). Станция SB1 была размещена непосредственно на насыпной плотине, SB2 - на правом берегу, SB3 - в пункте «Лесник», SB4 - на территории Михайло-Архангельского храма и SB5 - на восточной окраине поселка Новобаженово. Такое размещение обеспечи-

вало сравнение записей на площадках с различными локальными условиями. Окончательный выбор мест установки оборудования осуществлялся с учетом рекомендаций персонала ГЭС касательно обеспечения сохранности оборудования и возможности подъезда автотранспорта к месту установки.

Для проведения работ использовался комплект оборудования, включающий регистратор DAS 6501, сейсмометр CMG-40T, а на станциях SB1, SB2 и SB4 были установлены акселерометры CMG-5TC. Регистрация выполнялась с частотой дискретизации 100 отсчетов в секунду. Параметры - скорость колебаний грунта и ускорение смещения колебаний - регистрировались в формате CSS 3.0. Продолжительность регистрации на станциях составляла приблизительно 10 суток (от 208 ч 56 мин до 256 ч 01 мин) на каждой станции.



- 1 – изолинии средней скорости поперечных волн: а – $270 \leq V_{s,30} < 550$ м/с, б – $550 \leq V_{s,30} < 800$ м/с;
 2 – профили сейсморазведочных зондирований; 3 – точки расположения сейсмических станций (SB).

Рисунок 4. Схема районирования по средней скорости поперечных волн на глубине 30 метров по данным сейсморазведки

Таблица 1. Координаты мест установки станций по GNSS

Код точки	Северная широта (Lat)°	Восточная долгота (Lon)°	Высота над уровнем моря (Alt) м.
SB1	50,40145	81,06963	233
SB2	50,40459	81,06849	241
SB3	50,40534	81,07668	246
SB4	50,39273	81,08346	274
SB5	50,38936	81,04627	223

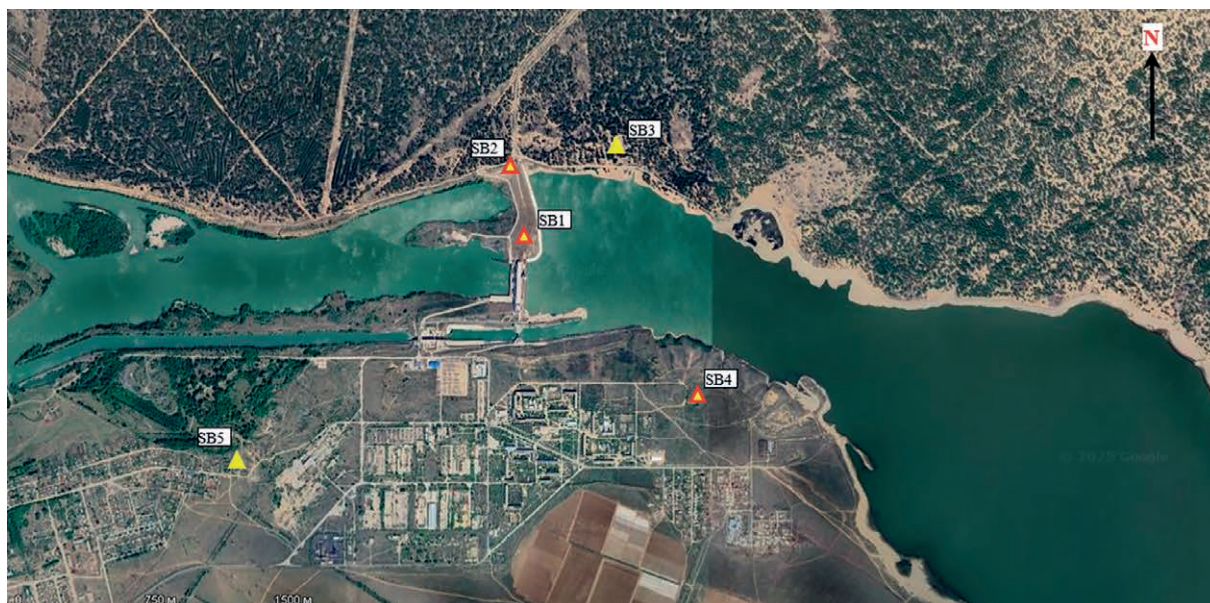
В ходе инструментальных наблюдений регистрировались сейсмические сигналы от землетрясений и взрывов, а также непрерывный сейсмический шум. Это позволило использовать полученные записи для оценки сейсмических условий на различных участках площадки [6, 7].

Анализ спектральных характеристик сейсмических шумов на площадках установки полевых станций

Для оценки условий регистрации на различных участках был проведен анализ спектральных характеристик сейсмических шумов, зафиксированных полевыми станциями. Это позволило выявить различия в уровне шумового фона и определить особенности сейсмической обстановки на отдельных площадках.

Обработка данных сейсмических шумов осуществлялась с использованием программы DBNoise, входящей в состав программного пакета Antelope.

Для каждой станции рассчитывались значения медианы уровней спектральной плотности мощности сейсмического шума для дневного и ночного времени суток. Расчеты проводились по отрезкам записей про-



▲ – сейсмометр; ▲ – сейсмометр + акселерометр.

Рисунок 5. Обзорная карта района работ и мест установки оборудования

должительностью 10 минут. На основе этих данных были построены спектральные зависимости параметров сейсмического шума по станциям с использованием программного пакета Origin. На рисунке 6 представлены медианные спектры плотности мощности сейсмического шума для станций SB1–SB5 (показаны разным цветом), рассчитанные отдельно для дневного и ночного времени по HHZ компоненте. Для сравнения на графиках также нанесены мировые кривые моделей низкого и высокого уровня шумов (NLNM и NHNM) по (Peterson (1993)) [8].

Анализ спектральных характеристик сейсмических шумов по компонентам HNE, HHN и HHZ показал, что обстановка по уровню шумов на площадке Шульбинской ГЭС является пространственно-неоднородной и зависит как от местоположения станции, так и от компоненты регистрации. Во всех случаях спектры на станциях SB1-SB4 имеют похожую структуру:

высокий уровень шума в области коротких периодов менее 0,3 с, связанный преимущественно с локальными техногенными источниками; далее близкие уровни шума по всем станциям при периодах более 3 с; четкий экстремум в области 5 с, отражающий влияние штормовых океанических микросейсм. На разных станциях отмечается локальный пик на периоде около 0,83 с, связываемый с работой турбин электростанции.

Особое положение занимает станция SB5, для которой характерна выраженная аномалия сейсмического шума. Аномальный характер шума на станции SB5 замечен даже визуально на исходных записях. Оказалось, что место установки этой станции было выбрано очень неудачно, что объяснялось отсутствием других доступных для установки станции мест. Вся территория близ этого места закрыта для доступа или находится в частных руках. В нескольких сотнях метров от места установки станции находился эксплуатируе-

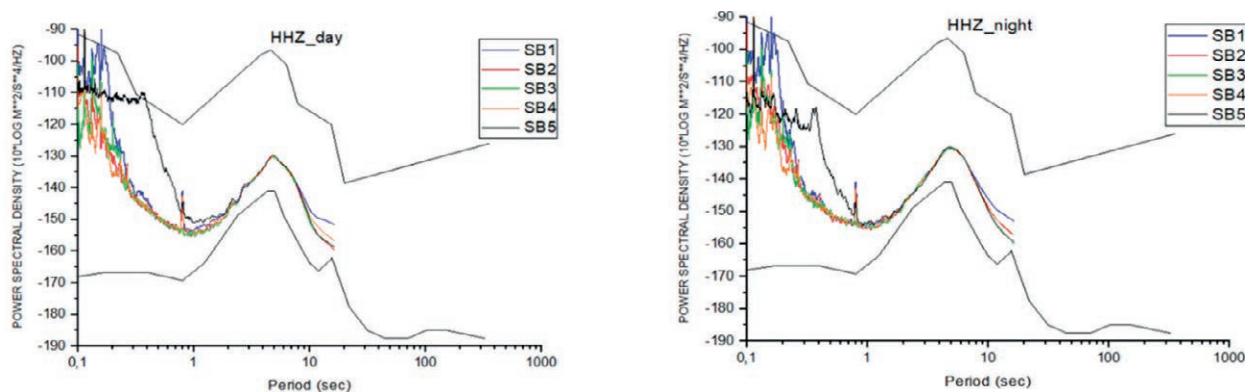


Рисунок 6. Спектральная плотность мощности сейсмического шума на станциях SB1–SB5 для дневного и ночного времени суток по HHZ компоненте

мый закрытый подземный резервуар очистных сооружений, в другом направлении – водонапорная башня. Деятельность этих объектов, причем и днем, и ночью, создает постоянные помехи в широком диапазоне частот. Поэтому данные этой станции не использовались для оценки приращения балльности за счет локальных сейсмических условий.

В целом анализ спектральной плотности сейсмического шума по компонентам HNE, HNN и HHZ показывает, что наиболее неблагоприятная шумовая обстановка из четырех станций наблюдается на станции SB1, расположенной на плотине, а наиболее стабильный фон в большинстве случаев характерен для станций SB3 и SB4.

РЕЗУЛЬТАТЫ HVSR-ИЗМЕРЕНИЙ

Анализ выполнен с использованием метода спектральных отношений горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмического шума — метода H/V, или метода Накамуры [9]. Метод основан на обработке записей трехкомпонентного сейсмометра, одновременно регистрирующего одну вертикальную и две взаимно ортогональные горизонтальные компоненты микросейсмических колебаний. Отношение амплитудных спектров горизонтальных компонент к амплитудному спектру вертикальной компоненты позволяет определить преобладающую (резонансную) частоту площадки и оценить относительное усиление колебаний [10]. Обработка данных выполнена в программном комплексе Geopsy [11]. Выбор временных окон, расчет и интерпретация кривых H/V осуществлялись в соответствии с рекомендациями проекта SESAME [12, 13].

Измерения проведены в 5 пунктах наблюдений (SB1–SB5). В результате обработки микросейсмических записей определены резонансные частоты грунтовой толщи (f_0) и соответствующие уровни отношения H/V.

По результатам метода HVSR подтверждается вывод о резком отличии характеристик колебаний на станции SB5 от других станций. На станциях SB1-SB4 резонансные частоты довольно близки и характеризуются диапазоном 3,5 – 5,3 Гц (рисунок 7 таблица 2). На SB5 резонансная частота равна 1,2 Гц (рисунок 2). Это низкая резонансная частота, которая почти точно совпадает с частотой работы турбины и не отражает особенностей сейсмических свойств грунтов в этом месте.

На рисунке 7 приведены полученные результаты по всем пяти станциям. Во всех пунктах наблюдаются выраженные максимумы H/V, что свидетельствует о наличии контраста сейсмических свойств между верхней толщей грунтов и подстилающими более жесткими породами. Полученные резонансные частоты грунтовой толщи (f_0) и соответствующие амплитуды H/V по каждой станции и их средние значения приведены в таблице 2, наиболее выраженный пик зарегистрирован в пункте SB1, что указывает на значительное сейсмическое усиление колебаний на частотах 3,35 Гц.

Расчет приращения балльности по каждому сейсмологическому пункту произведен по следующей формуле:

$$\Delta I = 2 \log \frac{A_i}{A_e},$$

где A_i – амплитуда H/V, соответствующая грунтам на исследуемой станции, A_e – амплитуда H/V по эталонной станции.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 2. Резонансные частоты (f_0) и соответствующие уровни отношения H/V по станциям SB1-SB4.

№	SB1		SB2		SB3		SB4	
	f_0	H/V	f_0	H/V	f_0	H/V	f_0	H/V
1	3.4	12	4.3	6.4	5.4	4.1	5.2	6.3
2	3.4	16.6	4.2	6.7	5.2	4.1	5.2	6.4
3	3.5	15	4.2	6.2	5.4	4.2	5.5	6.6
4	3.4	16.2	4.2	8	4	4.1	5.2	6.5
5	3.5	16.9	4.2	8.8	4	4.2	5	5.6
6	3.5	15.6	4.2	7.6	4	4.2	5.4	4.8
7	3.5	14.4	4.3	6.5	4	4.2	5.2	7.4
8	3.5	14.2	4.2	7.3	4	4.1	5.1	6.2
9	3.5	14.3	4.2	7.4	5.2	4.2	5.2	6.5
10	3.5	14.6	4.2	7.8	5.2	4.3	5.2	6.7
11	3.5	15.2	4.2	8.3	4	4.1	5.4	6.6
12	3.4	14.3	4.3	8	4	4.1	5.2	6.7
13	3.5	14.2	4.2	7.3	5.2	4.3	5.4	6.6
Σ	3.5	14.9	4.5	7.4	4.6	4.2	5.3	6.4

Для оценки приращения интенсивности за счет грунтовых условий в качестве эталонной была выбрана сейсмическая станция SB4. Этот выбор базировался на результатах предварительных сейсморазведочных работ.

Для определения категории грунтов по сейсмическим свойствам в месте расположения сейсмостанции SB4 вблизи нее выполнены сейсмические зондирования на поперечных волнах с последующей интерпретацией наблюденных годографов по точкам их излома [14] с расчетом интервальных скоростей и мощностей по преломляющим горизонтам. Эти данные составили основу для последующих расчетов средней скорости поперечных волн, в том числе на глубине 30 метров, и представлены на рисунке 8-А.

Как видно из этого рисунка, изученный разрез в поле поперечных волн характеризуется явно выраженными преломляющими свойствами, где интервальная скорость в диапазоне глубин 0...45 метров возрастает с 270 до 1200 м/с.

Для инженерно-геологической интерпретации полученных данных использованы сведения о строении разреза [15], согласно которым в районе сейсмостанции он представлен песчано-галечниковыми отложениями, перекрытыми просадочными супесями и суглинками неоген-четвертичного возраста, несогласно залегающими на алевролитах верхнего карбона. Для стратиграфической привязки скоростных границ использованы обобщенные данные [14].

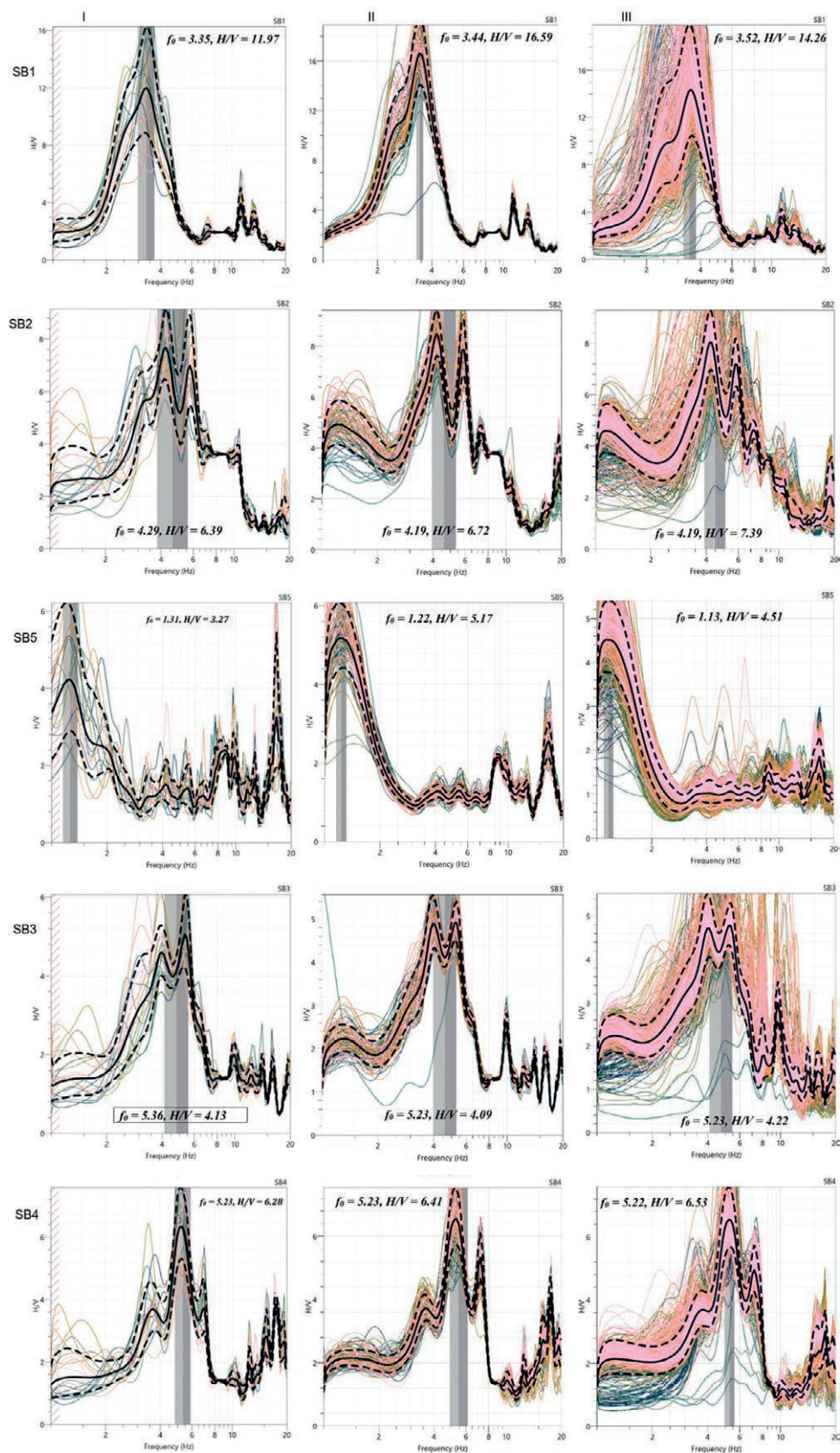
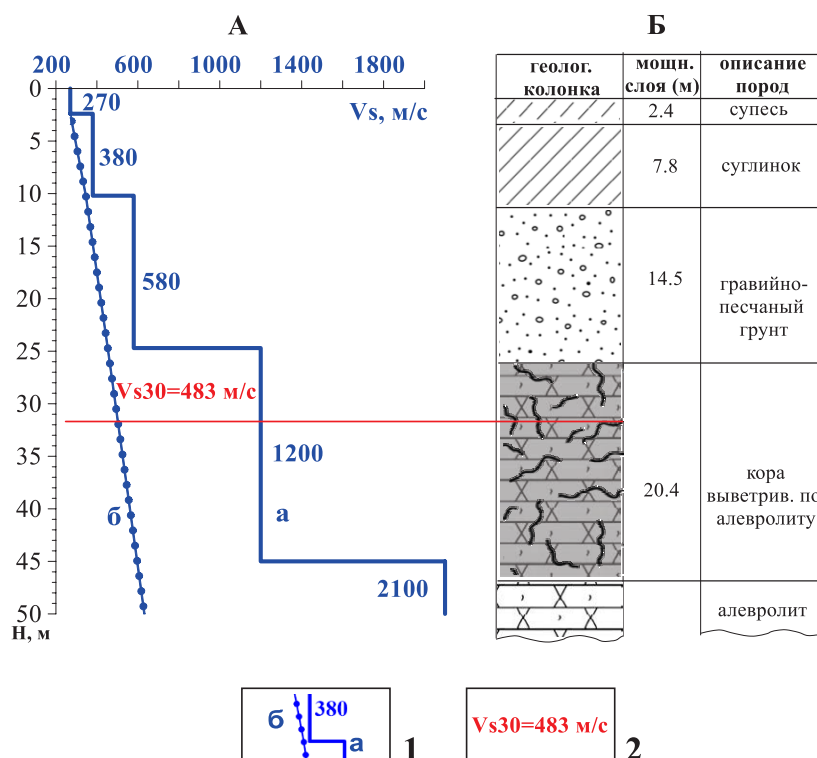


Рисунок 7. HVSr – спектр по пяти станциям SB1-SB5. Для каждой станции показаны результаты трех вариантов расчетов – длина записи 25 минут, 20-секундные интервалы; длина записи 40 минут, 20-секундные интервалы; длина записи одни сутки, 60- секундные интервалы



1 – графики интервальной (а) и средней (б) скоростей поперечных SH волн; 2 – графики значений средней скорости поперечных волн на глубине 30 метров.

Рисунок 8. Район Шульбинской ГЭС, сейсмостанция SB4. Скоростная колонка (А) в параметрах интервальной и средней скорости поперечных волн и ее инженерно-геологическая интерпретация (Б)

Самая верхняя часть разреза мощностью 2,4 метра (рисунок 1-Б), характеризующаяся минимальными значениями скорости поперечных волн (279 м/с), определена как сложенная рыхлым супесным грунтом. Незначительное повышение интервальной скорости (до 380 м/с) вниз по разрезу вероятно связано с горизонтом суглинков мощностью 7,8 метра, ниже которых залегает более высокоскоростной (580 м/с) пласт гравийно-песчаного грунта мощностью 14,5 метров.

Более контрастными представляются преломляющие границы на глубине 25 и 45 метров, где скорость поперечных волн резко возрастает до 1200 и 2100 м/с соответственно. Такие значения типичны для осадочных горных пород, в данном случае - алевролитов. При этом интервал глубин 25...45 метров определен как сложенный продуктами корообразования по алевролитам, ниже которых залегает слабо измененная эта горная порода.

В целом разрез в районе сейсмостанции SB4 на глубину до 30 метров характеризуется средней скоростью поперечных волн 483 м/с. Принимая во внимание то, что полученное значение этого параметра находится в интервале $270 \leq V_{s,30} < 550$ м/с, грунтовые условия по сейсмическим свойствам, согласно требованиям [3], отнесены к категории II. К этой же категории они относятся и по описательным признакам грунтов в этом диапазоне глубин.

Таблица 3. Отношение амплитуд H/V на каждой станции к амплитуде H/V на эталонной станции и рассчитанное приращение интенсивности (в баллах шкалы MSK-64).

Site	Ai/Ae	ΔI , балл	f_0 , Гц
SB-1	2,3	0,7	3,5
SB-2	1,2	0,1	4,5
SB-3	0,7	-0,4	4,6
SB-4	1,0	0,0	5,3

Результаты оценки приращения интенсивности ΔI показывают (таблица 3), что только на станции SB1 отмечено существенное приращение балльности +0,7 балла. На других станциях значения ΔI малы или даже отрицательны.

Анализ зарегистрированных полевыми станциями сейсмических событий (землетрясений и взрывов)

Просмотр всех полученных сейсмическими станциями данных позволил выявить два вида зарегистрированных сейсмических событий. Первый вид – это записи телесейсмических и региональных землетрясений, второй вид - это близкие взрывы на карьерах Каражыра и Бақырчик (рисунок 9).

В результате обработки сейсмических данных проведено более 160 замеров максимальных амплитуд А

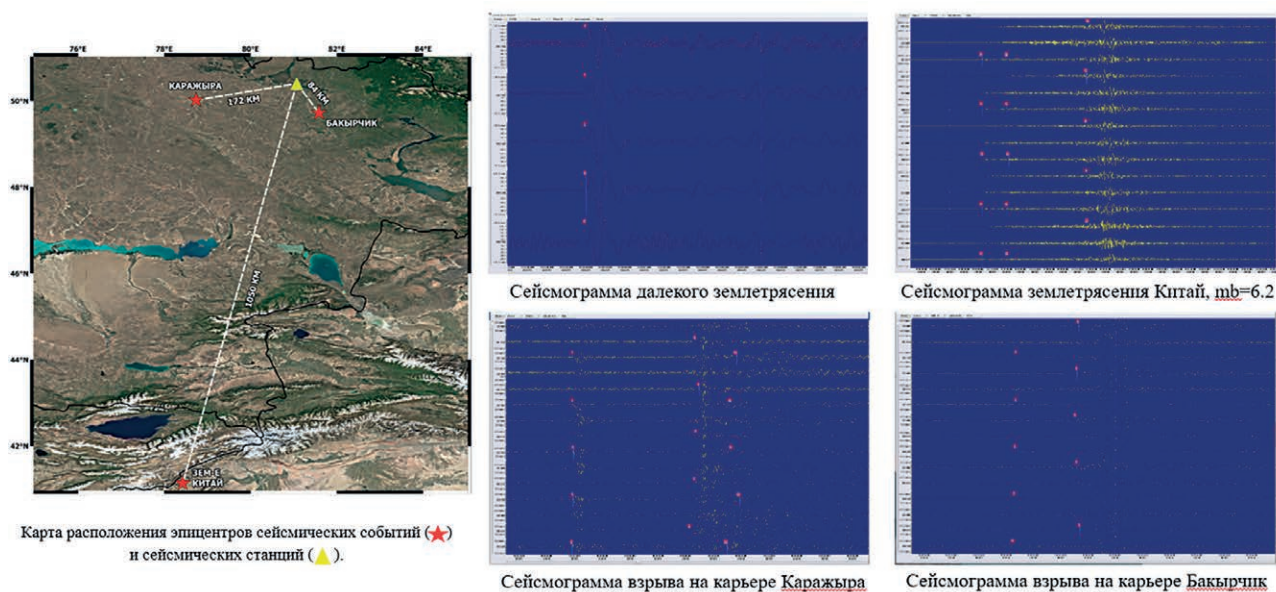


Рисунок 9. Записи зарегистрированных сейсмических событий

и соответствующих им периодов Т по далеким и региональным событиям, карьерным взрывам. На рисунке 10 приведен фрагмент созданной базы данных по параметрам обработанных записей.

Полученные в результате замеров значения А и Т использованы для расчета превышения интенсивности ΔI. В первую очередь, были рассчитаны отношения амплитуд сейсмических фаз по четырем стан-

циям по каждому событию и по каждому типу волн относительно опорной станции (эталонной). Далее по всей выборке рассчитано медианное значение отношения амплитуд. По этим значениям проведен расчет ΔI – превышения интенсивности в баллах по соотношению:

$$\Delta I = 3.3 \log \frac{A_i}{A_e}$$

all.arrival										
File Edit View Options Graphics Help										
0	sta	time	arid	chan	iphas	deltim	amp	per	fm	auth
	SB5	11/29/2025 (333) 12:34:47.988	1	HHZ	P	0.160	40.8	0.76	c.	dbp:spen:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 12:34:48.001	2	HHZ	P	0.200	28.0	0.66	d.	dbp:spen:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 12:34:47.995	3	HHZ	P	0.236	30.3	0.70	c.	dbp:spen:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 12:34:47.995	4	HHZ	P	0.180	33.9	0.78	d.	dbp:spen:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 12:34:48.015	5	HHZ	P	0.187	27.3	0.58	d.	dbp:spen:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 19:32:43.989	24	HHZ	P	0.027	4.6	0.30	d.	dbp:spen:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 19:32:44.370	25	HHZ	P	0.037	0.4	0.14	c.	dbp:spen:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 19:32:43.959	26	HHZ	P	0.065	1.9	0.34	d.	dbp:spen:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 19:32:44.306	27	HHZ	P	0.039	0.4	0.16	c.	dbp:spen:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 20:09:55.545	30	HHZ	P	0.023	7.2	0.62	c.	dbp:spen:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 20:09:55.698	31	HHZ	P	0.027	7.2	0.60	c.	dbp:spen:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 20:09:55.779	32	HHZ	P	0.022	4.2	0.40	d.	dbp:spen:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 20:09:55.881	33	HHZ	P	0.020	1.8	0.16	c.	dbp:spen:125234
	SB5	11/29/2025 (333) 20:09:55.327	34	HHZ	P	0.141	7.7	0.30	c.	dbp:spen:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 20:49:18.158	35	HHZ	P	0.107	6.9	0.34	c.	dbp:spen:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 20:49:18.533	36	HHZ	P	0.047	0.5	0.14	d.	dbp:spen:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 20:49:18.465	37	HHZ	P	0.052	0.7	0.16	d.	dbp:spen:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 20:49:18.387	38	HHZ	P	0.042	1.7	0.36	c.	dbp:spen:125234
	SB5	11/30/2025 (334) 23:27:36.100	1	HHZ	P	0.084	44.2	0.96	c.	dbp:spen:125234
	SB4	11/30/2025 (334) 23:27:36.073	2	HHZ	P	0.048	24.7	0.68	d.	dbp:spen:125234
	SB3	11/30/2025 (334) 23:27:36.082	3	HHZ	P	0.055	21.4	0.58	c.	dbp:spen:125234
	SB2	11/30/2025 (334) 23:27:36.037	4	HHZ	P	0.082	23.0	0.58	c.	dbp:spen:125234
	SB1	11/30/2025 (334) 23:27:36.155	5	HHZ	P	0.068	14.0	0.40	d.	dbp:spen:125234
	SB5	12/01/2025 (335) 9:28:21.681	1	HHZ	P	0.107	7.2	0.38	d.	dbp:spen:125234
	SB3	12/01/2025 (335) 9:28:21.757	2	HHZ	P	0.072	2.7	0.36	d.	dbp:spen:125234

Рисунок 10. Фрагмент базы данных сейсмических фаз в формате CSS3.0 [15]

В результате расчетов получены значения ΔI в диапазоне от $-0,2$ до $+0,9$, при этом наибольшее значение $\Delta I = 0,9$ балла получено для станции SB-1, самые низкие $\Delta I = -0,2$ получены для станции SB-2. В таблице 4 приведены результаты расчета ΔI по каждой станции.

Таблица 4. Приращение интенсивности на основании анализа записей сейсмических событий

STA	T, с	Ai/Ae	ΔI , балл
SB-1	0,3	1,9	0,9
SB-2	0,3	0,9	-0,2
SB-3	0,3	1,0	0
SB-4	0,3	1,0	0

Для наглядности сравнения результатов превышения интенсивности ΔI , полученных по методу HVSR (по сейсмическим шумам) и Ai/Ae (по землетрясениям и взрывам), результаты объединены в таблицу 5.

Таблица 5. Расчетные значения превышения интенсивности ΔI по методу HVSR (метод Накамуры) и Ai/Ae

Site	ΔI , балл		ΔI , балл
	HVSR	Ai/Ae	Среднее
SB-1	0,7	0,9	0,8
SB-2	0,1	-0,2	-0,1
SB-3	-0,4	0,1	-0,2
SB-4	0	0	0

Так, на станции SB-1 по двум методам наблюдается наибольшее превышение интенсивности, равное $\Delta I = 0,7 \dots 0,9$ балла. Для станций SB-2 и SB-3 превышения интенсивности ΔI практически отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные инструментальные сейсмологические наблюдения на территории Шульбинской ГЭС позволили оценить особенности сейсмических условий площадки и выявить различия в отклике грунтов на сейсмические воздействия на отдельных участках гидроузла. Анализ записей землетрясений, карьерных взрывов и микросейсмического шума показал, что площадка характеризуется неоднородными условиями регистрации и различной степенью локального усиления колебаний.

Исследование спектральных характеристик сейсмических шумов по компонентам HNE, HNN и HHZ выявило пространственную неоднородность шумового поля на территории ГЭС. Наиболее неблагоприятные условия наблюдаются на станции SB1, расположенной на насыпной плотине, тогда как станции SB3 и SB4 характеризуются наиболее стабильным фоновым уровнем. Станция SB5 оказалась существенно подверженной техногенным помехам, связанным с работой сооружений ГЭС, что ограничивает возможность ее использования для надежной интерпретации локальных сейсмических условий.

Результаты HVSR-анализа показали, что наиболее выраженное локальное усиление наблюдается на станции SB1. По данным метода Накамуры, приращение интенсивности на этом пункте составляет около 0,7 балла по шкале MSK-64. Анализ записей землетрясений и техногенных взрывов подтвердил этот вывод: по амплитудным отношениям сейсмических волн на станции SB1 величина приращения интенсивности достигает $0,7 \dots 0,9$ балла. Для станций SB2, SB3 и SB4 значимого увеличения интенсивности не выявлено.

Сопоставление результатов, полученных разными сейсмологическими методами, показало их хорошую согласованность и позволило сделать вывод о том, что наиболее чувствительным к усилению сейсмических воздействий участком является тело насыпной плотины. Это имеет важное практическое значение, поскольку при нормативной сейсмичности района 7 баллов по действующим картам общего сейсмического зонирования локальные условия в пределах плотины могут приводить к увеличению сейсмического воздействия приблизительно на один балл.

Таким образом, выполненные исследования подтвердили необходимость учета локальных условий площадки при оценке сейсмических условий района расположения Шульбинской ГЭС. Для дальнейшего уточнения сейсмических параметров и контроля состояния гидротехнического сооружения целесообразно создание постоянно действующей системы сейсмического мониторинга, включающей как сейсмические станции, так и акселерометры сильных движений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Карта сейсмического районирования СССР. Масштаб 1:5 000 000 / гл. ред. М. А. Садовский; Межведомственный совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – 1978.
2. Карта общего сейсмического районирования Республики Казахстан и прилегающих районов Кыргызстана, Узбекистана, Туркменистана и Китая. Масштаб 1:2 500 000 / сост. А. К. Курскеев, А. В. Тимуш, А. Сыдыков, В. И. Шапилов; при участии А. Б. Садыковой, П. Н. Горбунова; Министерство образования и науки Республики Казахстан, Институт сейсмологии. – 2003.
3. СП РК 2.03-30-2017. Строительство в сейсмических зонах: с изменениями и дополнениями по состоянию на 21.10.2021.
4. Нурмагамбетов А., Садыков А., Тимуш А. В., Хайдаров М. С., Власова А. А., Михайлова Н. Н., Сабитов М. М., Умирзакова А., Гапич В. А. Зайсанское землетрясение 14 июня 1990 г. // Землетрясения в СССР в 1990 году. – М.: ГС РАН, 1996. – С. 54–60.
5. Арефьев С. С., Быкова В. В. Алтайское землетрясение 2003 г.: очаг и афтершоки // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: тезисы докладов Всероссийской конференции. – М., 2008. – Т. 2. – С. 211–213.
6. Дягилев Р. А., Маловичко Д. А. Микросейсмическое районирование: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Пермский государственный университет, 2007. – 90 с.
7. Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний / под ред. С. В. Медведева // Вопросы инженерной сейсмологии. – М.: Наука, 1973. – Вып. 15. – 206 с.
8. Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise. Open-File Report 93-322, Albuquerque, New Mexico, 1993- 42 pp..
9. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – Vol. 30, No. 1. – P. 25–33.
10. Molnar S., Cassidy J. F., Castellaro S., Cornou C., Crow H., Hunter J. A., Matsushima S., Sanchez-Sesma F. J., Yong A. Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art // Surveys in Geophysics. – 2018. – Vol. 39. – P. 613–631.
11. Wathelet M. Geopsy Project [Electronic resource]. – URL: <http://www.geopsy.org/> (accessed: 31.08.2026).
12. SESAME. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation. – SESAME European Research Project WP12, 2004. – 62 p.
13. Quinlan D. M., Harvey D. Datascope: A Relational Database System for Scientists // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 1994. – Vol. 75. – P. 431–432.
14. Горяинов Н. Н., Ляховицкий Ф. М. Сейсмические методы в инженерной геологии. – М.: Недра, 1979. – 143 с.
15. Anderson J., Farrell W. E., Garcia K., Given J., Swanger H. Center for Seismic Studies Version 3 Database: Schema Reference Manual. – Arlington: Center for Seismic Studies, 1990. – Technical Report C90-01. – 64 p.

ШҮЛБІ ГЭСІ ОРНАЛАСУ АУМАҒЫНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН БАҒАЛАУ

Ә.А. Исағали*, Н. Н. Михайлова, М. В. Шульга

ҚР ҰЯО «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Алматы, Қазақстан

* Байланыс үшін e-mail: a.issagali@kndc.kz

Шүлбі су электр станциясы (ГЭС) жоғары инженерлік жауапкершілікке ие нысан. Сондықтан оның аумағындағы жергілікті сейсмикалық қауіптілікті нақты бағалап, бақылау қажет. Бұл жұмыста SB1–SB5 бес уақытша бес сейсмикалық станциялардың деректері негізінде жүргізілген Шүлбі ГЭС-і аумағындағы аспаптық сейсмологиялық зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Микросейсмикалық шудың спектрлік сипаттамалары талданып, HVSR әдісі арқылы грунттың динамикалық әсері анықталды. Сонымен қатар алынған нәтижелер жер сілкіністері мен жарылыстар жазбалары бойынша есептелген амплитудалық қатынастармен салыстырылды.

Зерттеу нәтижелері зерттеу аумағының сейсмикалық тұрғыдан біртекті емес екенін көрсетті. Сейсмикалық тербелістердің жергілікті күшеюі ең айқын түрде SB1 сейсмикалық станцияда байқалды, мұнда MSK-64 шкаласы бойынша қарқындылықтың өсімі шамамен 0,7–0,9 балды құрайды. Ал қалған бақылау пункттерінде тербеліс қарқындылығының артуы анықталған жоқ. Анықталған айырмашылықтар грунттардың жергілікті қасиеттерімен және плотина айналасындағы Vs30 параметрінің төмен мәндерімен байланысты. HVSR әдісі мен сейсмикалық құбылыстардың толқындарын талдау нәтижелерінің өзара сәйкестігі негізінде бөгеттің техникалық күйін сейсмикалық әдістер арқылы тұрақты мониторингтеуді ұйымдастыру қажеттілігі жөнінде ұсыныстар берілді.

Түйін сөздер: Шүлбі ГЭС-і, сейсмикалық қауіптілік, сейсмикалық станция, сейсмикалық микроаудандастыру, HVSR, сейсмикалық шу, қарқындылық өсімі.

ASSESSMENT OF SEISMIC CONDITIONS IN THE SHULBINSK HPP AREA

A.A. Issagali*, N.N. Mikhailova, M.V. Shulga

RSE NNC RK Branch “Institute of Geophysical Research”, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: a.issagali@kndc.kz*

The Shulbinsk Hydroelectric Power Plant (HPP) is a critical infrastructure facility with a high level of engineering responsibility, necessitating a detailed assessment of local seismic hazard. This study presents the results of instrumental seismological investigations conducted within the Shulbinsk HPP area using data acquired from five temporary observation sites (SB1–SB5). Spectral characteristics of ambient seismic noise were analyzed, site response was evaluated using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) method, and the obtained results were compared with amplitude ratios derived from recordings of earthquakes and quarry blasts.

The results indicate significant seismic heterogeneity across the study area. The most pronounced local amplification of seismic ground motion was identified at the embankment dam site (station SB1), where the increment in seismic intensity reaches approximately 0.7–0.9 points on the MSK-64 scale. In contrast, no significant increase in seismic intensity was observed at the remaining observation sites. The identified differences are associated with local soil conditions and low Vs30 values within the embankment body. Based on the consistency between the HVSr results and waveform analyses of recorded seismic events, recommendations are provided regarding the implementation of continuous seismic monitoring of the dam condition.

Keywords: *Shulbinsk Hydroelectric Power Plant (HPP), seismic hazard, seismic station, seismic microzonation, HVSr, ambient seismic noise, seismic intensity increment.*