

УДК 550.34

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ИРКУТСКЕ И УЛААНБААТАРЕ В 2020–2021 гг.

© 2022 г. В. И. Джурик^а, *, Е. В. Брыжак^а, **, Ts. Batsaikhan^б, С. П. Серебренников^а,
А. Н. Шагун^а, А. Ю. Ескин^а

^аИнститут земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

^бInstitute of Astronomy and Geophysics MAS, P.O.B.-152, Ulaanbaatar – 51, 13343 Mongolia

*e-mail: dzhurik@crust.irk.ru

**e-mail: bryzhak@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 09.08.2021 г.

После доработки 25.10.2021 г.

Принята к публикации 27.06.2022 г.

Дан анализ спектрального состава трех сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона для твердых грунтов территорий городов Иркутска и Улаанбаатара, зарегистрированных из одних и тех же зон вероятных очагов землетрясений (ВОЗ) в 2020 и 2021 гг. Для описания и анализа поведения геологической среды в пунктах регистрации землетрясений использовались акселерограммы, частотные характеристики верхних грунтовых слоев и спектры колебаний. Оценены вариации спектрального состава рассматриваемых сильных землетрясений, и их записи использованы для задания единого исходного сигнала с учетом рассмотренных зон ВОЗ для грунтов первой категории г. Улаанбаатара и г. Иркутска. Результаты проведенного анализа являются основой для реализации в дальнейшем прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона.

Ключевые слова: Байкало-Монгольский регион, сейсмические воздействия, землетрясения, акселерограммы, спектры, частотные характеристики, зоны ВОЗ, Иркутск, Улаанбаатар

DOI: 10.31857/S0203030622050042

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Байкало-Монгольский регион (БМР) является ареной крупнейших в мире внутриконтинентальных землетрясений, которые определяют высокий сейсмический потенциал региона. Здесь постоянно происходят землетрясения интенсивностью в эпицентре VIII–XI баллов по шкале MSK-64. Только в Монголии в XX веке здесь произошло более 60 землетрясений с магнитудой $M > 5.5$. Среди них десятки землетрясений вызвали крупные нарушения земной поверхности, а сейсмические катастрофы с магнитудой $M > 8$ (Болнайское 1905 г., Фуюньское 1931 г. и Гоби-Алтайское 1957 г.) сопровождалась сеймотектоническими деформациями протяженностью до нескольких сотен километров [Джурик и др., 2009]. Поэтому не случайно прогнозу сейсмических воздействий сильных землетрясений, с учетом современной геодинамики зон вероятных очагов землетрясений (ВОЗ), для наиболее вероятных грунтовых условий уделяется особое внимание. В этом отношении появилась возможность анализа полученных данных для вновь про-

изошедших сильных землетрясений в БМР в 2020–2021 гг. (рис. 1).

Основой для представления землетрясений выбрана карта сейсмического районирования территории Северной Евразии [Хромовских и др., 1996]. Она объединяет, независимо от государственных границ, зоны интенсивности сотрясений в баллах, и их показатели практически согласуются с картой сейсмического районирования территории Российской Федерации [ОСР-2016, 2020] и Монголии [Землетрясения ..., 1985]. Использовались записи трех землетрясений, зарегистрированных постоянными сейсмическими станциями, расположенными в Иркутске и Улаанбаатаре.

Для выбранных городов величины исходной сейсмичности согласно карте сейсмического районирования территории Северной Евразии [Хромовских и др., 1996] совпадают с их современной оценкой. Но вероятность землетрясений, соответствующих исходной сейсмичности, очень мала [Землетрясения ..., 1985; Литосфера ..., 1996], поэтому анализ спектрального состава их колеба-

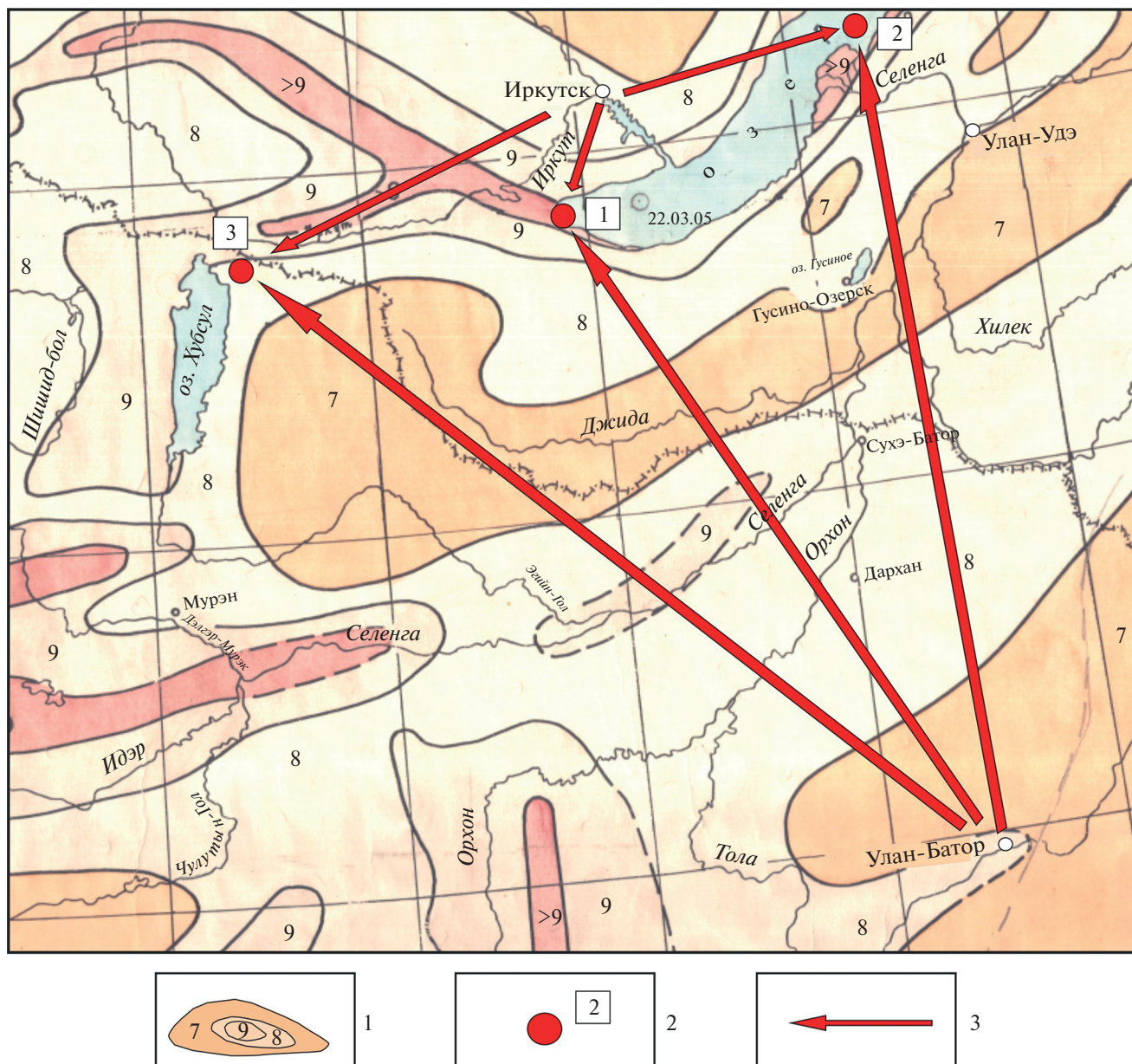


Рис. 1. Обзорная карта расположения трех эпицентров сильных землетрясений 2020–2021 гг. и пунктов их регистрации. 1 – зоны интенсивности сотрясений в баллах сейсмической шкалы MSK-64 по [Хромовских и др., 1996]; 2 – эпицентры очагов зарегистрированных землетрясений и их номера; 3 – направления от пунктов регистрации на эпицентры землетрясений.

ний является своевременным и необходимым для его учета при прогнозе сейсмических воздействий для ограниченных территорий из конкретных зон ВОЗ для северо-востока Монголии и юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

По макросейсмическим данным отмеченные землетрясения проявлялись в г. Улаанбаатаре с интенсивностью до 2 баллов и в г. Иркутске – от 4 до 6 баллов. Выбранные станции расположены на одинаковых по сейсмическим категориям

грунтах, но на различных расстояниях от зон ВОЗ, что позволяет использовать записи произошедших сильных землетрясений для оценки сейсмических воздействий, отвечающих исходной сейсмичности рассматриваемых территорий. Основной целью исследований является оценка вариаций спектрального состава рассматриваемых сильных землетрясений и использование их записей для задания единого исходного сигнала с учетом рассмотренных зон ВОЗ для грунтов первой категории г. Улаанбаатара и г. Иркутска. В

Таблица 1. Основные параметры землетрясений по данным каталога Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН [http://www.seis-bykl.ru]

№ п/п	Дата и время	Район	Координаты	Магнитуда (M), пересчетная из K_p по формуле $M = (K_p - 8)/1.1$	Энергетический класс (K_p)	Интенсивность в эпицентре по шкале MSK-64 (баллы)
1	21.09.2020 18:04:57.4	Слюдянский район (Иркутская область)	N 51.78 E 103.41	6.0	14.6	7.8
2	09.12.2020 21:44:33.6	Кабанский район (Бурятия)	N 52.38 E 106.59	5.5	14.0	7.0
3	11.01.2021 21:32:58	район оз. Хубсугул (Монголия)	N 51.31 E 100.40	7.0	15.7	8.7

дальнейшем для прогноза максимальных сейсмических воздействий Байкало-Монгольского региона необходимо как уточнение способов формирования исходных сигналов, так и включение в рассмотрение сильных землетрясений из других наиболее опасных зон ВОЗ.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДАННЫХ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные показатели анализируемых сильных землетрясений сведены в табл. 1 и их краткая характеристика для каждого землетрясения дана в хронологической последовательности.

На территории г. Иркутска для записи землетрясений в 2020–2021 гг. применялись цифровые инженерно-сейсмометрические станции “Байкал-7HR” с сейсмоприемниками A1638. Характеристики сейсмических каналов используемого комплекта аппаратуры позволяют регистрировать скорость колебаний в диапазоне частот 0.1–125 Гц, в диапазоне амплитуд ускорения от 10 мкм/с² до 5 м/с². Регистрация велась в рамках работ по инженерно-сейсмометрическому и сейсмологическому мониторингу на гидротехнических сооружениях Иркутской ГЭС. На территории г. Улаанбаатара использовалась аппаратура “Kinematics FBA ES-T EpiSensor Accelerometer”, она регистрирует ускорения в м/с² в диапазоне частот меньше 0.01 Гц до 40 Гц без искажений. Данная сейсмостанция входит в международную сеть IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology).

С учетом различия в типах регистрирующей аппаратуры прямое сравнение спектрального состава для выбранных землетрясений было ограничено и проводилось в диапазоне основных инженерно-сейсмологических частот от 0.1–0.5 до 20 Гц. Частота дискретизации (Δf) при записи равнялась 100 Гц. Такое ограничение исключает влияние возможных аппаратурных погрешностей, при выявляемых общих закономерностях, в

области регистрации низкочастотных колебаний. То есть выявляемые изменения спектрального состава колебаний по записям для каждой станции для зарегистрированных землетрясений являются корректными в области указанной полосы частот. На данном этапе такой предварительный анализ необходим и будет полезным при решении поставленных выше задач. В дальнейшем их уточнение связано с набором статистики по слабым и сильным землетрясениям из каждой опасной зоны ВОЗ, как основы мониторинга поведения грунтов для густонаселенных и промышленных территорий региона.

В качестве основных показателей, характеризующих влияние на спектральный состав зарегистрированных землетрясений для различных зон ВОЗ, использовались сейсмограммы и их спектры, частотные характеристики верхних грунтовых слоев (далее по тексту просто частотные характеристики) и их параметры.

Частотные характеристики рассчитывались при использовании двух способов: спектральных отношений амплитудных спектров горизонтальных и вертикальной компонент H/V , опирающегося на использование записей землетрясения на одной сейсмической станции [Nakamura, 1989], и расчетного, при использовании метода тонкослоистых сред, основанного на построении скоростных сейсмических моделей верхней зоны разреза [Расчетные ..., 1988].

Для реализации первого способа для выбранных землетрясений рассчитывались спектры методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [Дженкинс, Баттс, 1972; Dzhurik и др., 2018], в итоге были использованы записи ускорений движения грунта при землетрясениях, зарегистрированных каждой сейсмической станцией [Джурик и др., 2015]. Для расчета спектров брались записи акселерограмм, общей длительностью 20 и 80 с — соответственно для сейсмостанций “Иркутск” и “Улаанбаатар”. Это определяется длительностью колебаний, связанной с различием эпицентральной

Таблица 2. Обобщенные параметры расчетных сейсмогрунтовых моделей для грунтов первой категории по сейсмическим свойствам для Иркутска и Улаанбаатара

№ модели, типовой разрез	h , м	V_p , м/с	V_s , м/с	ρ , т/м ³
1	2	3	4	5
Эталонная модель для г. Иркутска				
№ 1	10	1900	960	2.4
Коренные породы (модель эталона)	14	2550	1400	2.5
	16	3000	1730	2.6
	∞	3400	1990	2.7
Эталонная модель для г. Улаанбаатара				
№ 2	10	2100	1110	2.4
Коренные породы (модель эталона)	12	2400	1320	2.5
	18	3100	1810	2.6
	∞	3400	1990	2.7

ных расстояний, которые в первом случае лежат в интервале 79–289 км и во втором 511–613 км (см. рис. 1).

Рассчитывались два вида частотных характеристик, где в качестве спектра акселерограммы горизонтальных компонент использовались спектры NS и EW, и в качестве вертикальной спектр Z компоненты. Это связано с тем, что для решения задач очаговой сейсмологии и при оценке сейсмических воздействий [Оценка ..., 1988] возникает необходимость использовать для расчетов частотные характеристики абсолютных значений векторной суммы $U(x)$ двух горизонтальных компонент NS и EW [Джурик и др., 2020], согласно представленному выражению.

$$U(x) = (H_N^2 + H_E^2)^{1/2} / V_Z, \quad (1)$$

где H_N и H_E – спектры землетрясений по горизонтальным компонентам NS и EW, V_Z – спектр по вертикальной компоненте Z.

Способ основан на предположении, что вертикальная компонента незначительно подвержена влиянию грунтовых условий за исключением случая прохождения поверхностных волн [Nakamura, 1989]. В этом заключаются и недостатки этого метода в отношении получения “истинных” частотных характеристик. В тоже время выбранная частотная характеристика $U(x)$ в какой-то степени позволяет компенсировать спектральные компоненты, вызываемые случайными помехами и получить достаточно надежные оценки преобладающих периодов (частот) колебаний грунтов, которые являются наиболее важными параметрами необходимыми для прогноза максимальных сейсмических воздействий из конкретных зон ВОЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Для выбранных пунктов регистрации приемники установлены на бетонных основаниях ниже глубины залегания слоя сезонного промерзания, которые опираются в свою очередь на крупно-среднезернистые юрские песчаники (Иркутск) и на гранитоиды мезозойского интрузивного комплекса (Улаанбаатар). Обобщенные значения измеренных скоростей продольных волн (V_p и V_s) в указанных разновидностях грунтов в верхней зоне разреза до 10 м близки и находятся в пределах от 1900 до 2200 м/с, а на глубине более 30 м достигают значений от 2800 до 3400 м/с. Скорости поперечных волн (V_s) меняются в интервале от 960 до 1990 м/с.

Конкретное распределение скоростей для каждого пункта, использованное для дальнейших расчетов в виде сейсмогрунтовых моделей (табл. 2), показывает их незначительные различия, которые объясняются состоянием их зон выветривания, расположенных в различных сейсмо-климатических зонах Байкало-Монгольского региона. В то же время это открывает возможность использовать в дальнейшем данные зарегистрированных сильных землетрясений для задания единого исходного сигнала для грунтов первой категории по сейсмическим свойствам, с учетом одинаково опасных для этих территорий зон ВОЗ (см. рис. 1).

Акселерограммы рассматриваемых землетрясений и их расчетные спектры представлены на рис. 2. Основные параметры сведены в табл. 3. Результаты расчетов и краткий сравнительный анализ спектрального состава колебаний для Улаанбаатара и Иркутска представляется для зарегистрированных землетрясений согласно табл. 1. Отмечается, что он проведен для каждого землетрясения с определенной направленностью в отношении выбора рассматриваемых параметров в соответствии с табл. 3. То есть для каждого землетрясения анализировались новые параметры на основе того, что направленность их изменений характерна и для других землетрясений.

Землетрясение № 1. Быстринское землетрясение [Гилёва и др., 2020] произошло в пределах юго-западной части активизированной окраины Сибирской платформы, где основным разрывным нарушением, ответственным за высокий сейсмический потенциал территории, является Главный Саянский разлом. Разлом (взбросо-сдвиг) имеет общую протяженность до 900 км (кайнозой), 220 км которого имеют следы современного обновления. Ширина зоны разлома достигает 10 км. В пределах активной части разлома выявлены палеосейсмогенные структуры с возможной магнитудой сейсмических событий до 8.0. Главный Саянский разлом является основой Восточно-Саянской зоны возникновения очагов

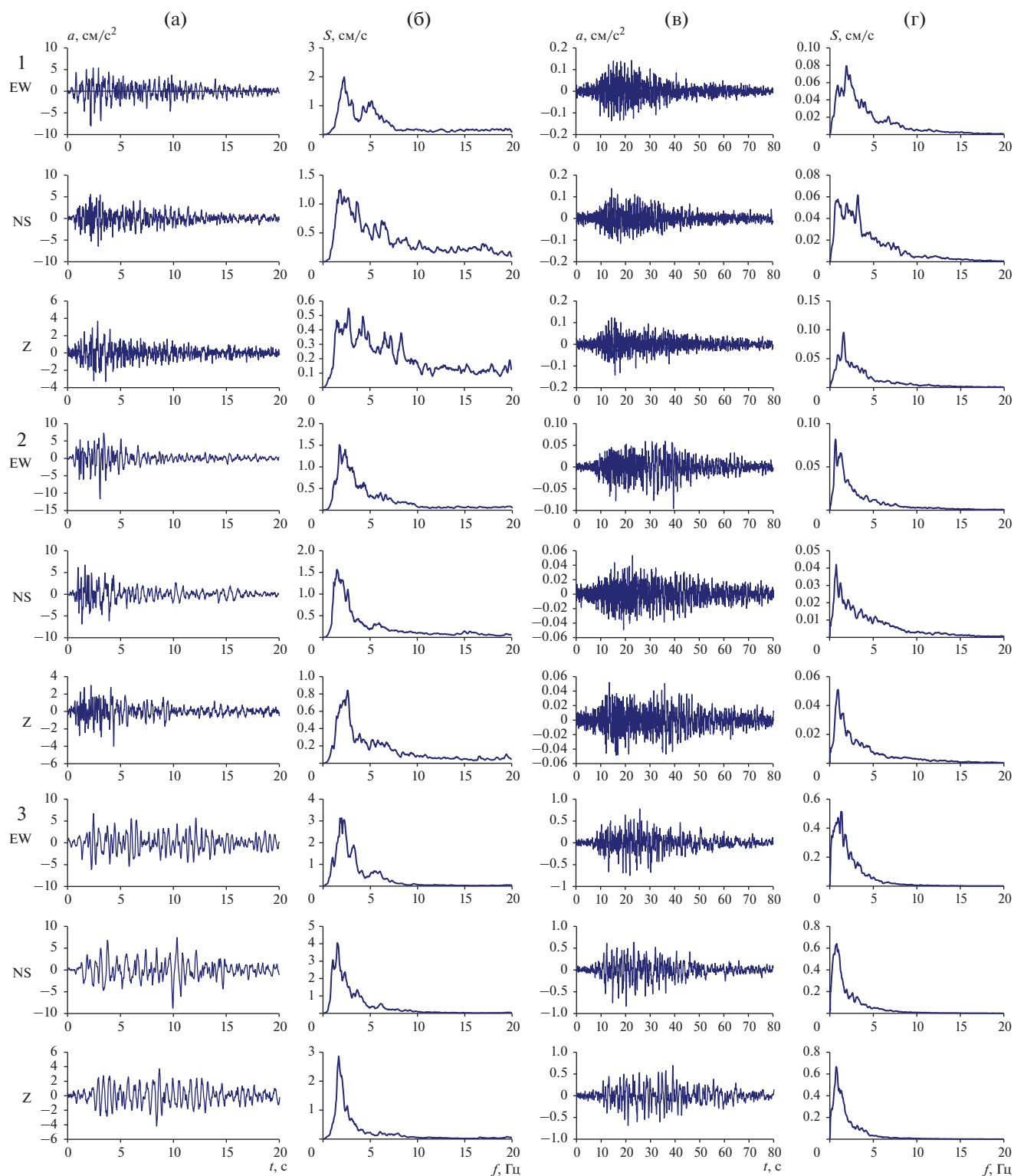


Рис. 2. Акселерограммы (а, в) и их спектры (б, г), зарегистрированные в Иркутске и Улаанбаатаре соответственно. 1–3 – номера землетрясений в соответствии с табл. 1.

землетрясений (ВОЗ) с магнитудой 8.0 [Чипизубов, Смекалин, 1999]. Расстояние от эпицентра до г. Иркутска – 79 км (проявилось в г Иркутске с

интенсивностью 5 баллов), до г. Улаанбаатара – 511 км, глубина гипоцентра, согласно определению Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, со-

Таблица 3. Основные параметры акселерограмм землетрясений и соответствующих им спектров

Компонента	Максимальное ускорение \bar{A}_{\max} , см/с ²	Максимальное значение спектра S_{\max} , см/с	Частота основного максимума спектра, Гц	Интервал частот для $0.7S_{\max}(f)$, Гц	Интервал частот для $0.5S_{\max}(f)$, Гц
1	2	3	4	5	6
Землетрясение № 1, сейсмостанция “Иркутск”					
EW	8.07	1.99	2.25	1.90–2.54	1.66–5.22
NS	6.42	1.25	1.86	1.46–3.76	1.32–6.54
Z	3.67	0.55	2.73	1.37–4.79	1.27–8.50
Землетрясение № 1, сейсмостанция “Улан-Батор”					
EW	0.16	0.08	1.90	0.85–2.55	0.63–3.65
NS	0.15	0.06	3.20	0.55–3.41	0.48–3.56
Z	0.14	0.10	1.59	1.36–1.73	0.82–1.82
Землетрясение № 2, сейсмостанция “Иркутск”					
EW	11.66	1.51	1.76	1.66–2.59	1.56–3.32
NS	6.88	1.57	1.51	1.17–2.64	1.07–2.78
Z	3.99	0.84	2.64	1.76–2.78	1.42–3.08
Землетрясение № 2, сейсмостанция “Улан-Батор”					
EW	0.10	0.08	0.67	0.55–1.45	0.50–1.65
NS	0.05	0.04	0.77	0.57–1.31	0.49–2.19
Z	0.05	0.05	0.98	0.67–1.16	0.57–1.75
Землетрясение № 3, сейсмостанция “Иркутск”					
EW	6.69	3.13	1.95	1.61–2.44	1.42–3.37
NS	8.82	4.05	1.51	1.03–1.71	0.88–2.39
Z	4.18	2.86	1.66	1.51–2.05	1.46–2.20
Землетрясение № 3, сейсмостанция “Улан-Батор”					
EW	0.77	0.51	1.32	0.39–1.48	0.13–2.01
NS	0.83	0.64	0.79	0.32–1.18	0.21–1.38
Z	0.69	0.67	0.73	0.52–0.99	0.40–1.60

ставила $h = 18$ км. Интенсивность землетрясений и их основные спектральные параметры для “Иркутска” имеют следующие показания: максимальное ускорение для трех компонент меняются от 3.67 до 8.07 см/с² (см. рис. 2, табл. 3); интервал частот на уровне 0.7 от максимума спектра находятся в пределах от 1.37 до 4.79 Гц. Отметим, что различия оценок максимального ускорения, представленной в настоящей работе и полученной для сейсмостанции “Иркутск” Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Гилёва и др., 2020] (16.6 см/с² и 8.07 см/с² соответственно), объясняется различием в грунтовых условиях пунктов регистрации. I (в первом случае) и II категория грунтов (во втором случае) по интенсивности сотрясений отличаются на 1 балл, что соответствует изменению ускорений приблизительно в 2 раза. Для Улаанбаатара отмеченные показатели имеют следующие значения: максимальные значения

ускорений 0.14–0.16 см/с² и интервал частот от 0.55 до 3.41 Гц.

Землетрясение № 2 (Кударинское) произошло в Южно-Байкальском районе, который относится к Байкальской природной территории, входящей в Байкальскую сейсмическую зону. Здесь сейсмические события связаны с современными тектоническими движениями в Байкальской рифтовой зоне. Основными сейсмотектоническими структурами на исследуемой территории являются активные в сейсмическом плане разломы: Морской, Селенгинский и Черско-Дельтовый. К разрывным нарушениям приурочены эпицентры сильных землетрясений, произошедших в инструментальный и исторический периоды. Возможные магнитуды для представленных разломов могут достигать 6.8–7.5 [Литосфера ..., 1996]. Расстояние от эпицентра до г. Иркутска – 169 км, до г. Улаанбаатара – 511 км. Основные спектральные параметры для сейсмостанции

“Иркутск” имеют следующие показатели: максимальное ускорение для трех компонент меняются от 3.99 до 11.66 см/с² (см. рис. 2, табл. 3); интервал частот на уровне 0.5 от максимума спектра находятся в пределах от 1.07 до 3.32 Гц. Для сейсмостанции “Улаанбаатар” отмеченные показатели имеют следующие значения: максимальные значения ускорений 0.05–0.1 см/с² и интервал частот от 0.55 до 1.45 Гц.

Землетрясение № 3. Самое сильное землетрясение из рассматриваемых (Хубсугульское) произошло в пределах района расположения оз. Хубсугул (Монголия). Основные сейсмоструктурные структуры, ответственные за высокий сейсмический уровень, – Дархатский и Хубсугульский разломы. К ним приурочены деформации террас, уступы и палеосейсмоструктуры. На стадии изучения структур им был присвоен высокий уровень сейсмической опасности – $M = 7.0$ [Демьянович и др., 2008], который подтверждается настоящим землетрясением. Расстояние от эпицентра до г. Иркутска – 289 км, до г. Улаанбаатара – 613 км. Интенсивность колебаний и спектральные параметры для сейсмостанции “Иркутск” представляются следующими показателями: максимальное ускорение для трех компонент меняются от 4.18 до 8.82 см/с² (см. рис. 2, табл. 3); частота основного максимума спектра находится в пределах от 1.51 до 1.95 Гц. Для сейсмостанции “Улаанбаатар” они имеют следующие значения: максимальные ускорения 0.69–0.83 см/с² и интервал частот основного максимума спектра от 0.73 до 1.32 Гц.

Рассматриваемые землетрясения проявлялись на территории г. Иркутска, согласно определению Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, практически с одинаковой максимальной интенсивностью, равной 4–5 баллов. В нашем случае они по максимальным ускорениям так же различаются незначительно. Для NS компоненты интервал 6.42–8.82 см/с² для EW – 8.8–11.6 см/с² и по результирующей по трем компонентам это соответствуют значениям близким к 12.5 см/с², что приравнивается к 4 баллам. Для наших станций это грунты первой категории, на которых интенсивность землетрясений на 1 или 2 балла меньше по отношению к рыхлым воздушно-сухим или водонасыщенным грунтам [Оценка ..., 1988].

Отмеченные проявления произошедших землетрясений не совсем соответствуют направленности изменений их эпицентральных расстояний (Δ) и энергетическим характеристикам (магнитуде M и энергетическому классу K). По отношению к землетрясению № 1 ($M = 6.0$, $K = 14.6$ и $\Delta = 79$ км) землетрясение № 2 ($M = 5.5$, $K = 14.0$ и $\Delta = 169$ км), имея незначительно меньшие энергетические параметры и в два раза большее эпицентрального расстояние, проявлялось в г. Иркутске

с той же интенсивностью – V баллов. Количественно по значениям ускорений данные для землетрясения № 2 для трех компонент также несколько превышают их значения для землетрясения № 1 (см. табл. 3).

Для сейсмостанции “Улаанбаатар” для этих же землетрясений с одинаковым эпицентрального расстоянием (511 км) они по направленности соответствуют изменениям величин их магнитуд (6.0 и 5.5). Для первого землетрясения максимальные ускорения для трех компонент находятся в интервале 0.14–0.16 см/с², для второго – от 0.05 до 0.1 см/с².

Непосредственное сравнение спектров от одних и тех же землетрясений для двух станций показывает (см. рис. 2б, 2г), что по форме они мало различаются для всех землетрясений, имеют восходящую низкочастотную область, далее максимальную часть спектра общий диапазон частот которой на уровне 0.7 от максимума меняется от 0.3–0.5 Гц до 4.79 Гц и нисходящую в область средне и относительно высокочастотную ветвь до 5–10 Гц (см. рис. 2б, г, табл. 3). В указанном интервале частот максимумы спектров с увеличением эпицентральных расстояний смещаются в сторону низких частот и по отношению к “Иркутску” для “Улаанбаатара”, для которого эпицентрального расстояние для трех землетрясений в 2–6 раз больше, это смещение по максимальным значениям спектра может достигать 1–3 Гц. Количественную оценку по нашим данным и с учетом отдельного компонента на основе имеющейся статистики невозможно провести с определенной достоверностью тем более с учетом очаговых параметров землетрясений.

Но по представленным данным возможно провести сравнительный анализ относительного изменения интенсивности колебаний по спектрам сейсмостанций “Иркутск” и “Улаанбаатар” ($U = S_{\text{ирк}}/S_{\text{уб}}$) в зависимости от частоты, результаты которого могут являться контрольными значениями при теоретическом задании единых исходных сигналов из одних и тех же зон ВОЗ, опасных для территорий Байкало-Монгольского региона (рис. 3). В этом отношении необходим отмеченный анализ в направлении привлечения данных как по афтершокам произошедших, так и зарегистрированных ранее землетрясений из других зон ВОЗ.

Количественно, для нашего случая, в области низких частот до 0.4–0.8 Гц значения спектров или сравнимы, или данные по “Улаанбаатару” несколько выше. То есть с увеличением эпицентрального расстояния интенсивность колебаний на указанных низких частотах может несколько увеличиться, хотя диапазон сравниваемых величин незначительный и поэтому может быть связан с аппаратными погрешностями в области

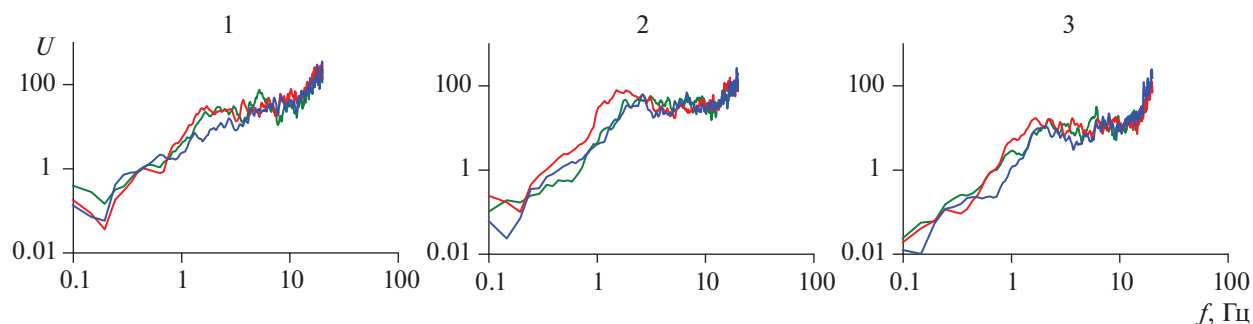


Рис. 3. Отношение спектров зарегистрированных землетрясений в Иркутске и Улаанбаатаре. Зеленая линия – EW, красная линия – NS, синяя линия – Z (цифрами указан номер землетрясения согласно табл. 1).

регистрации длиннопериодных колебаний. С увеличением частоты до 2–3 Гц отношение достигает 40–80, затем вплоть до 10 Гц оно имеет практически неизменный уровень и далее до 20 Гц резко увеличивается до 100 и более.

Таким образом, общая ожидаемая закономерность, связанная с относительно большим затуханием высокочастотных колебаний с расстоянием, для конкретно рассматриваемых землетрясений, сохраняется. Но явно не проявляется при их непосредственном сравнении и это связано с отмеченными выше особенностями проявления сейсмичности по землетрясению № 2, направление от пунктов регистрации (Иркутск) на эпицентр землетрясения которого пересекает о. Байкал.

Проведенный выше анализ позволяет в направлении реализации поставленных задач дать прогноз спектров с последующим восстановлением акселерограмм для первых двух землетрясений, так же для твердых грунтов Иркутска и Улаанбаатара, представленных сейсмогрунтовыми моделями (см. табл. 2). Сама методика приведения спектра к нужной магнитуде M определяется скоростью изменения его уровня с магнитудой, согласно выражениям, установленных нами для

БСЗ и конкретизированных для юго-западной части [Джурик и др., 2015; Дреннов и др., 2015]:

$$B_M(f) = \Delta \lg S(f) / \Delta M,$$

где $B_M(f) = 0.94$ для $f \leq 1$ Гц и $B_M(f) = -0.37 \lg(f) + 0.94 \pm 0.03$ ($R = 0.97$) для $f = (1-20)$ Гц при $M < 6.5$ и $B_M(f) = 0.55$ для $f = (0.5-20)$ Гц при $M \geq 6.5$; $S(f)$ – значение спектра на i -частоте; R – коэффициент корреляции.

В итоге расчетные акселерограммы и их спектры для г. Иркутска представлены на рис. 4, а их основные параметры сведены в табл. 4. Для землетрясения № 1 при его пересчете с $M = 6.0$ на $M = 8$ (максимальная для Восточно-Саянской зоны ВОЗ) ускорение для трех компонент лежит в интервале 68–144 см/с². Для землетрясения № 2 при его пересчете с $M = 5.5$ на $M = 7.5$ (возможная максимальная магнитуда зон Морского, Селенгинского и Черско-Дельтового разломов) ускорение для трех компонент меняется от 76 до 240 см/с².

Интервалы изменения длительности колебаний и максимальных значений спектра для трех компонент для рассматриваемых землетрясений практически перекрываются. Но отмечается, что ширина спектра для EW компоненты на уровне 0.5 от максимума для первого землетрясения (Ир-

Таблица 4. Основные параметры сформированных акселерограмм и соответствующих им спектров

Компонента	Максимальное ускорение \bar{A}_{\max} , см/с ²	Максимальное значение спектра S_{\max} , см/с	Частота основного максимума спектра, Гц	Интервал частот для $0.7S_{\max}(f)$, Гц	Интервал частот для $0.5S_{\max}(f)$, Гц
1	2	5	6	7	8
Иркутск					
NS	99	36.3	1.51	1.07–2.73	0.93–3.08
Z	60	22	1.51	1.07–2.73	0.93–3.08
Улаанбаатар					
NS	50	18.6	1.51	1.07–2.73	0.93–3.08
Z	31	11.3	1.51	1.07–2.73	0.93–3.08

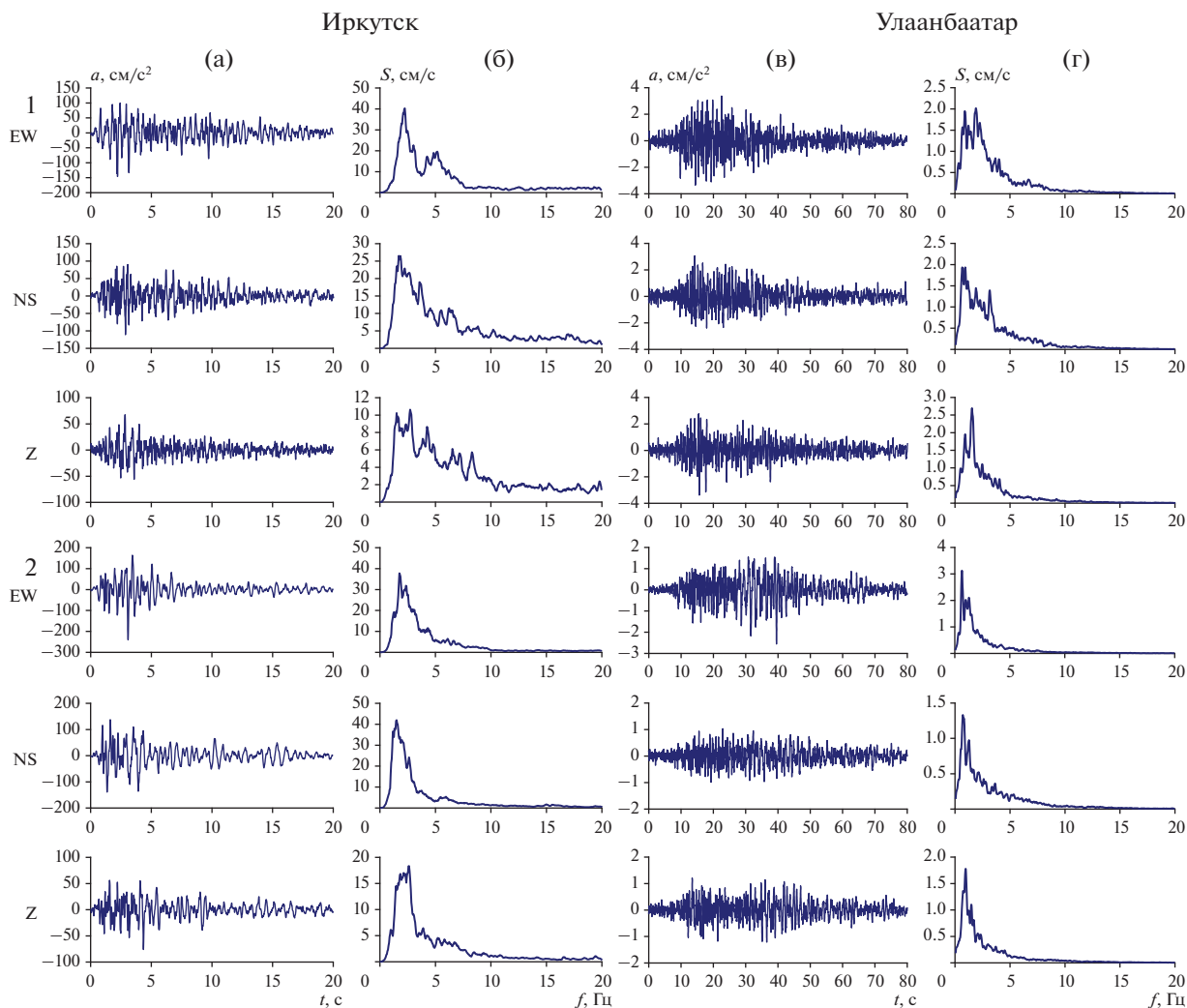


Рис. 4. Расчетные акселерограммы (а, в) и соответствующие им спектры (б, г), спрогнозированные для землетрясения № 1 (реальная акселерограмма $M = 5.9$, расчетная $M = 8$) и для землетрясения № 2 (реальная акселерограмма $M = 5.5$, расчетная $M = 7.5$), для твердых (I категория) грунтов на территориях гг. Иркутска и Улаанбаатара.

кутск) равна 8.93 с, а для второго 2.86 с. При этом максимальные значения ускорений равны 144 и 240 $\text{см}/\text{с}^2$. Обратная зависимость отмеченных параметров (длительности и максимальных ускорений) хорошо согласуется с перераспределением энергии землетрясения в интервалах отмеченной длительности колебаний. Это положение подтверждается проведенными расчетами интенсивности колебаний в баллах согласно экспериментальной зависимости [СП ..., 2019]:

$$I = 2.5 \lg PGA + 1.25 \lg \tau + 1.05,$$

где PGA – максимальные ускорения, τ – длительность колебаний на уровне 0.5 от максимума.

Расчеты показывают, что интенсивность для г. Иркутска для первого землетрясения меняется для трех компонент от 6.18 до 7.63 баллов и для второго от 6.89 до 7.57 баллов. В итоге прогнозные

значения проявления сейсмичности для землетрясений из двух зон ВОЗ на прогнозируемые сейсмические воздействия для г. Иркутска сравнимы, что отвечает параметрам произошедших землетрясений. Корректность такого сравнения обосновывается величиной пересчета магнитуд для двух землетрясений на величину близкую к 2 (см. рис. 4).

Для г. Улаанбаатара проведенные прогнозные расчеты имеют вполне ожидаемые результаты, это объясняется одинаковым эпицентральным расстоянием (близким к 500 км). Различия в магнитудах прогнозируемых землетрясений (7.5 и 8.0) явно проявляется только на величинах максимальных ускорений, но и они по основным максимумам увеличиваются незначительно от 2.56 до 3.36 $\text{см}/\text{с}^2$. Интервалы длительностей и частотного состава

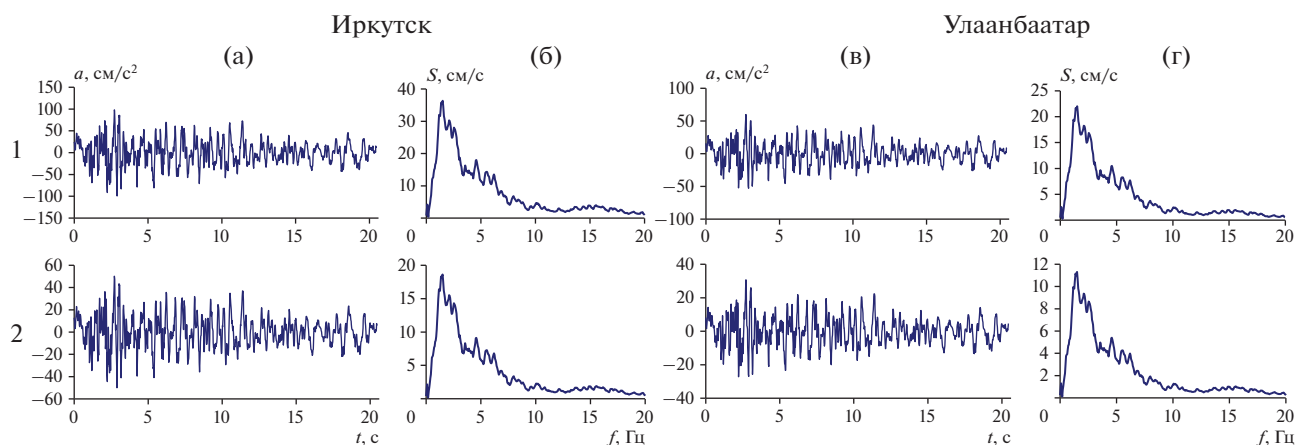


Рис. 5. Акселерограммы и амплитудные спектры для Иркутска (а, б) и Улаанбаатара (в, г). 1 – горизонтальная компонента, 2 – вертикальная компонента.

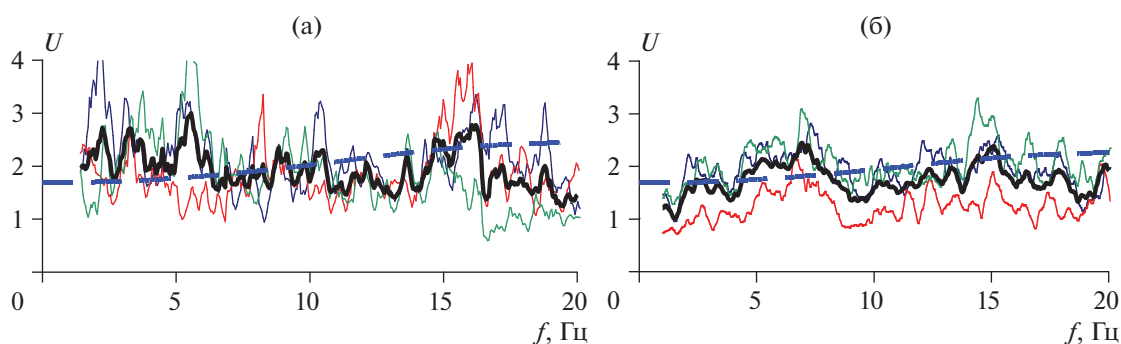


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики сейсмогрунтовых моделей для грунтов первой категории (а – “Иркутск”, б – “Улаанбаатар”). Синяя линия – землетрясение № 1, красная – землетрясение № 2, зеленая – землетрясение № 3; черная линия сплошная, рассчитанная по методу спектральных отношений, синяя пунктирная, рассчитанная по методу тонкослоистых сред.

колебаний перекрываются или незначительно отличаются по частотному составу.

Непосредственное сравнение прогнозируемых параметров для сейсмостанций “Иркутск” и “Улаанбаатар” показывает ожидаемые различия по максимальным ускорениям и соответственно по максимальным значениям спектров в пределах одного-двух порядков, которые находятся в соответствии с данными, представленными на рис. 3. Но важно отметить, что частоты основных максимумов спектра для “Улаанбаатара” снижаются в среднем на 1–1.5 Гц.

Таким образом, отмеченные вариации спектрального состава колебаний могут быть связаны с путем распространения сейсмического луча, углом подхода и характеристиками самих очагов землетрясений. Для более детального выяснения отмеченных особенностей проявления сейсмичности необходимо накопление данных по относитель-

но сильным землетрясениям, прежде всего из каждой очаговой зоны, с последующим их учетом для конкретных территорий из опасных зон ВОЗ.

Анализ спектрального состава и выявленные относительные параметры приводят к возможности в первом приближении сформировать единый исходный сигнал с учетом рассмотренных зон ВОЗ, для грунтов первой категории “Улаанбаатара” и “Иркутска” (рис. 5) и получить амплитудно-частотные характеристики для построенных сейсмогрунтовых моделей (рис. 6). Предложен следующий подход к реализации поставленных задач. Из выбранных землетрясений (см. табл. 1) находились средние спектры ускорений, которые, в свою очередь, принимались как характеристика для всей эпицентральной зоны целиком. Отдельно анализировались компоненты NS, EW, Z и для каждого отобранного землетрясения рассчитывались ам-

плитудные и фазовые спектры с помощью прямого преобразования Фурье.

Далее нормированные сигналы для каждой компоненты использовались как исходные сигналы для модели эталона (см. табл. 2) также для каждой компоненты. Сами результаты расчетов по методу тонкослоистых сред [Расчетные ..., 1988] представлены на рисунке 5. Вначале для модели эталона (коренные породы, см. табл. 2) их окончательные результаты (максимальные ускорения) масштабировались на уровень принятой исходной сейсмичности равной 6 баллам для грунтов I категории по сейсмическим свойствам для “Улаанбаатара” и 7 баллов для “Иркутска”. Это допускается нормативными документами при отсутствии достаточного статистического набора записей сильных землетрясений из рассматриваемых зон ВОЗ.

В результате реализации отмеченного подхода основные параметры сформированных акселерограмм (см. рис. 5, табл. 4) следующие: продолжительность колебаний 20 с; интервал частот спектра на уровне 0.5 от максимума для горизонтальной и вертикальной компоненты (NS и Z) меняется от 0.93 до 3.08 Гц; на уровне 0.7 от максимума – от 1.07 до 2.73. Максимальные значения основных максимумов спектра приходятся на частоту 1.51 Гц, а их значения достигают 22–35.3 – “Иркутск” и 11.3–16.6 см/с – “Улаанбаатар”. Максимальное значение ускорений находится в интервале 60–96 см/см² – “Иркутск” и 31–55 см/см² – “Улаанбаатар”.

Еще раз отмечается, что по частотному составу сформирован единый исходный сигнал, который по этому параметру может уточняться при использовании вновь произошедших сильных землетрясений, как из рассматриваемых, так и из других опасных зон ВОЗ. По амплитудному составу он может масштабироваться в зависимости от прогнозируемой исходной сейсмичности для конкретных территорий.

Амплитудно-частотные характеристики, полученные по методу тонкослоистых сред при использовании сформированных исходных сигналов и по данным представленных расчетов (см. рис. 5, табл. 4) показывают, что верхние слои для моделей (см. табл. 2) практически мало искажают исходный сигнал в интервале частот до 20 Гц (см. рис. 6, синяя линия).

В общем, это подтверждается и результатами расчетов по методу спектральных отношений (см. рис. 6, черная линия), осредненная по трем землетрясениям. Но в деталях для “Иркутска” в области низких и относительно высоких частот наблюдаются некоторые отклонения, которые мо-

гут быть связаны, прежде всего, с выбранными методами расчетов, особенностями распространения сейсмических волн и точностью построения сейсмических моделей. Сами частотные характеристики могут использоваться в дальнейшем для относительной оценки сейсмических воздействий на случай прогнозируемых сильных землетрясений для всего многообразия грунтовых условий исследуемых территорий региона.

Анализ спектрального состава произошедших сильных землетрясений и рассмотрение выбранных станций, как пунктов, расположенных на одинаковых по сейсмическим категориям грунтов, позволяет использовать их записи для оценки сейсмических воздействий, отвечающих исходной сейсмичности рассматриваемых территорий. Это дает возможность их своевременного использования при планировании строительства и дальнейшего уточнения способов формирования исходных сигналов, при включении в рассмотрение сильных землетрясений из других наиболее опасных зон ВОЗ, для прогноза максимальных сейсмических воздействий Байкало-Монгольского региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дан сравнительный спектральный анализ трех сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона, зарегистрированных на однотипных по сейсмическим свойствам грунтовым условиям на территориях городов Иркутска и Улаанбаатара. Несмотря на предварительный характер анализа, полученные результаты дали возможность показать реальное влияние рассматриваемых зон ВОЗ на конкретные параметры сейсмических воздействий.

Непосредственное сравнение прогнозируемых параметров для “Иркутска” и “Улаанбаатара” показывает ожидаемые различия по максимальным ускорениям и соответственно по максимальным значениям спектров в пределах одного двух порядков, которые находятся в соответствии с данными анализа отношений сравниваемых спектров для одних и тех зарегистрированных землетрясений, которые значительно различаются по эпицентральному расстоянию. Частоты основных максимумов спектра, по этой же причине, для “Улаанбаатара” по сравнению с “Иркутском” смещаются в низкочастотную область в среднем на 1–1.5 Гц.

Общая закономерность, связанная с относительно большим затуханием высокочастотных колебаний с расстоянием, для конкретно рассматриваемых землетрясений, сохраняется. Но явно не проявляется при их непосредственном

сравнении и это может быть связано с различиями направления и пути распространения сейсмических волн, что требует дальнейшего подтверждения.

На основе анализа спектров по трем землетрясениям сформирован единый исходный сигнал, который по частотному и амплитудному составу может уточняться при использовании вновь произошедших сильных землетрясений из рассматриваемых и других опасных зон ВОЗ. По амплитудному составу он может масштабироваться в зависимости от прогнозируемой исходной сейсмичности для конкретных рассматриваемых территорий, что и выполнено, в первом приближении для грунтов первой категории по сейсмическим свойствам для “Иркутска” и “Улаанбаатара”.

Отмеченные вариации спектрального состава колебаний из рассмотренных зон ВОЗ могут быть связаны с путем распространения сейсмического луча, углом подхода и характеристиками самих очагов землетрясений. Для выяснения, более детально в количественном отношении, отмеченных особенностей проявления сейсмичности необходимо накопление данных по относительно сильным землетрясениям, прежде всего из опасных зон ВОЗ с последующим их учетом для конкретных территорий. Проведенный анализ является основой для реализации в дальнейшем прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений, сами результаты исследований найдут применение при моделировании современных геодинамических и сейсмических процессов для конкретных зон ВОЗ и районирования сейсмической опасности территорий Байкало-Монгольского региона.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Радзиминович Я.Б. и др. Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ($M_W = 5.5$) в Южном Прибайкалье: предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 7. № 4. С. 55–71.

Демьянович М.Г., Ключевский А.В., Демьянович В.М. Основные разломы Монголии и их роль при сейсмическом районировании территории // Литосфера. 2008. № 3. С. 3–13.

Дженкинс Г., Баттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т. 1. М.: Мир, 1972. 289 с.

Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. Динамика спектрального состава колебаний приповерхностного слоя годовых вариаций температур при землетрясениях в Байкальском регионе // Геология и геофизика. 2020. № 8. С. 1136–1146.

Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П. и др. Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 57–67.

Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П. и др. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. 420 с.

Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебренников С.П. и др. Основные параметры спектров ускорений при землетрясениях с $M \geq 5$ для Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 5. С. 984–994.

Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука, 1985. 222 с.

Литосфера Центральной Азии. Новосибирск: Наука, 1996. 238 с.

ОСР-2016. Изменение № 1 к СП 14.13330.2018 “СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах”. М.: Стандартинформ, 2020. 72 с.

Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. 224 с.

Расчетные методы СМР // Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. С. 106–130.

СП 408.1325800.2017. Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.

Хромовских В.С., Николаев В.В., Демьянович М.Г. и др. Новая карта сейсмического районирования территории Северной Евразии // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI в. / Под ред. Н.А. Логачева, К.Г. Леви. Новосибирск: Наука, 1996. С. 94–99.

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–937.

Dzburik V.I., Drennov A.F., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V. A study of the relationships between the characteristic acceleration frequencies and earthquake magnitude: the Baikal rift zone // J. Volcanology and Seismology. 2018. V. 12. № 1. P. 67–74.

Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly report of Railway Technical Research Institute. 1989. V. 30. P. 25–33.

Spectral Analysis of Large Earthquakes of the Baikal-Mongolian Region Registered in Irkutsk And Ulaanbaatar in 2020–2021

**V. I. Dzhurik^{1, *}, E. V. Bryzhak^{1, **}, Ts. Batsaikhan²,
S. P. Serebrennikov¹, A. N. Shagun¹, and A. Yu. Eskin¹**

¹*Institute of the Earth's Crust of SB RAS, Lermontova str., 128, Irkutsk, 664033 Russia*

²*Institute of Astronomy and Geophysics MAS, P.O.B. - 152, Ulaanbaatar – 51, 13343 Mongolia*

**e-mail: dzhurik@crust.irk.ru*

***e-mail: bryzhak@crust.irk.ru*

An analysis is given of the spectral composition of three large earthquakes in the Baikal-Mongolian region for solid soils in the territories of the cities of Irkutsk and Ulaanbaatar, registered from the same source zones in 2020 and 2021. Accelerograms, frequency characteristics of the upper soil layers and ground motion spectra were used to describe and analyze the behavior of the geological environment at earthquake registration points. Variations in the spectral composition of the considered large earthquakes were estimated, and their records were used to form a single initial signal for soils of the first category in Ulaanbaatar and Irkutsk taking into account the considered source zones. The results of the analysis are the basis for the future implementation of the prediction of seismic effects of large earthquakes in the Baikal-Mongolian region.

Keywords: Baikal-Mongolian region, seismic effects, earthquakes, accelerograms, spectra, frequency characteristics, source zones, Irkutsk, Ulaanbaatar