



## IDENTIFICATION OF THE FEATURES OF THE INFLUENCE OF HETEROGENEOUS-VELOCITY GROUND LAYERS ON LARGE-EARTHQUAKE EFFECTS IN THE MONGOLIAN-SIBERIAN REGION

V.I. Dzhurik , E.V. Bryzhak ✉, S.P. Serebrennikov , A.A. Kakourova

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

**ABSTRACT.** The southern part of Eastern Siberia and the northern part of Mongolia were quantitatively assessed in terms of the influence of the upper-crustal heterogeneous-velocity ground layers on a single reasonable initial signal. Seismically, the territory is estimated at 7–9 intensity units; geomorphologically, it appears as a system of intermountain depressions and mountain structures; geologically, the area is a part of the Baikal rift zone system as its southwestern and southern fragments are incorporated therein.

The work is aimed at developing methods for studying and predicting seismic effects of large earthquakes in the Mongolian-Baikal region. The implementation of the task is associated with the need of assigning calculated accelerograms, modeling seismic ground motion, and carrying out theoretical calculations for the region under study. Using the data from 2020–2022 relatively large earthquakes recorded simultaneously in Irkutsk and Ulaanbaatar, I category grounds were assigned a single initial signal with regard to potential source zones of near and distant large earthquakes in the region. Computational models of seismic ground motions were developed based on recently obtained seismic survey and seismometric measurement data. The authors also took into account the available general dataset on the change in seismic wave velocities with depth for the most common types of loose unsaturated grounds to a few hundred meters and for the bedrock to the probable depth of earthquake occurrence. The constructed models are characterized by layer thickness, change in longitudinal and transverse wave velocities with depth, volumetric mass, and attenuation decrement.

The results of theoretical calculations for the features of the influence of heterogeneous-velocity ground layers on the amplitude and frequency composition of the assigned initial signals are presented as the parameters of seismic effects (maximum accelerations, predominant ground motions frequencies and their corresponding amplitude level, resonant frequencies and accompanying ground motions amplification values) for seismic probability models developed based on the calculated accelerograms, spectra, and frequency characteristics.

**KEYWORDS:** seismic effects; seismic ground motion modeling; initial signal; maximum accelerations; spectra; frequency characteristics

**FUNDING:** This research was carried out with support from the Russian Foundation for Basic Research and the Ministry of Education, Culture, Science and Sports of Mongolia as part of scientific project № 20-55-44011. This work was conducted using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RUS (grant No 075-15-2021-682). The work was carried out using the data obtained from the Large-Scale Research Facilities "Seismo-infrasonic complex for monitoring the Arctic permafrost and the complex for continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world".



EDN: XALEEB

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Evgenii V. Bryzhak, [bryzhak@crust.irk.ru](mailto:bryzhak@crust.irk.ru)

Received: May 6, 2024

Revised: 7 August, 2024

Accepted: 14 August, 2024

**FOR CITATION:** Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Serebrennikov S.P., Kakourova A.A., 2024. Identification of the Features of the Influence of Heterogeneous-Velocity Ground Layers on Large-Earthquake Effects in the Mongolian-Siberian Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (6), 0793. doi:10.5800/GT-2024-15-6-0793

## ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ГРУНТОВЫХ СЛОЕВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА

В.И. Джурик, Е.В. Брыжак, С.П. Серебренников, А.А. Какоурова

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

**АННОТАЦИЯ.** Для территорий южной части Восточной Сибири и Северной Монголии дана количественная оценка влияния скоростных неоднородностей грунтовых слоев верхней части земной коры на единый обобщенный исходный сигнал. В сейсмическом отношении территория оценивается в 7–9 баллов, в геоморфологическом – представляется как система межгорных понижений и горных сооружений, в геологическом плане район входит в систему Байкальской рифтовой зоны как ее юго-западный и южный фрагмент.

Работа направлена на развитие методов изучения и прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона. Последовательность реализации поставленной задачи связана с необходимостью задания расчетных акселерограмм, построения сейсмогрунтовых моделей и проведения теоретических расчетов для исследуемого региона. При использовании относительно сильных землетрясений, зарегистрированных в 2020–2022 гг. одновременно в г. Иркутске и г. Улан-Баторе, для грунтов первой категории сформирован единый исходный сигнал с учетом вероятных очаговых зон для прогнозируемых близких и относительно далеких сильных землетрясений региона. Для построения расчетных сейсмогрунтовых моделей использованы результаты сейсморазведочных и сейсмометрических измерений, выполненных в последнее время, а также данные, полученные ранее другими исследователями. Учитывались и имеющиеся обобщенные сведения об изменении скоростей сейсмических волн с глубиной для наиболее распространенных типов рыхлых неводонасыщенных грунтов до первых сотен метров и коренных пород до возможной глубины возникновения землетрясений. Построенные модели характеризуются мощностью слоев, изменением скоростей продольных и поперечных волн с глубиной, объемной массой и декрементом затухания.

Результаты теоретических расчетов особенностей влияния скоростных неоднородностей грунтовых слоев на амплитудный и частотный состав сформированных исходных сигналов представлены в параметрах основных показателей сейсмических воздействий (максимальные ускорения, преобладающие частоты колебаний и соответствующий им амплитудный уровень, резонансные частоты и сопутствующие значения усиления колебаний) для построенных вероятных сейсмических моделей по расчетным акселерограммам, спектрам и частотным характеристикам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сейсмические воздействия; сейсмогрунтовые модели; акселерограммы; исходный сигнал; максимальные ускорения; спектры; частотные характеристики

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта №20-55-44011. В работе задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по гранту 075-15-2021-682. Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

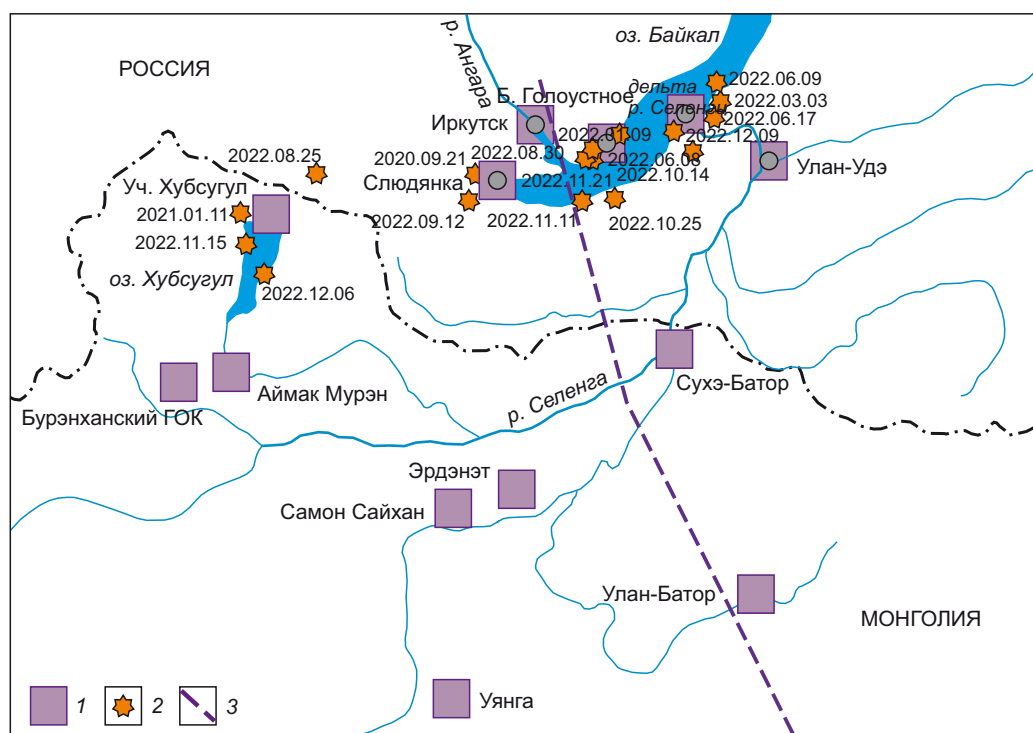
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективы и темпы развития, безопасность населения, крупных сооружений гражданского и промышленного назначения Байкало-Монгольского региона непосредственно зависят от уровня сейсмической опасности исследуемой территории [New Catalog..., 1977], которая в основном оценивается в 7–9 баллов [Khilko et al., 1985]. В геоморфологическом отношении территория представляется как система межгорных понижений и горных сооружений. В геологическом плане район входит в систему Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), ее юго-западный и южный фрагмент (рис. 1).

В структурном отношении юго-западный фрагмент включает систему Тункинских впадин и впадины Северной Монголии. Во фрагментах разломов, контро-

лирующих впадины, зафиксированы зоны возникновения очагов землетрясений с магнитудой до 7.0 – это Мондинское землетрясение (1950 г.), Култукское землетрясение (2008 г.), Хубсугульское землетрясение (2021 г.), Быстринское и Кударинское землетрясения (2020 г.). Для них сейсмические сотрясения в эпицентре оцениваются в 8–9 баллов [Gileva et al., 2020; Tubanov et al., 2021; Emanov et al., 2022].

Южный фрагмент БРЗ включает котловину оз. Байкал и продолжение горного сооружения Хамар-Дабан до долины р. Селенги. Наличие активных в сейсмическом плане разломов и высокий ранг проявившихся здесь землетрясений с магнитудой до 7.5 соответствуют высокому показателю сейсмической опасности фрагмента [Chipizubov et al., 2003]. Присутствие



**Рис. 1.** Обзорная карта-схема работ в пределах юго-западной части Байкальской сейсмической зоны и Северной Монголии: 1 – участки детальных исследований; 2 – эпицентры выбранных относительно сильных землетрясений (2020–2022 г.); 3 – Байкало-Монгольский трансект.

**Fig. 1.** Schematic overview of the works within the southwestern Baikal seismic zone and Northern Mongolia: 1 – detailed study areas; 2 – selected relatively large earthquake epicenters (2020–2022); 3 – Baikal-Mongolia transect.

сейсмических событий в настоящее время (рис. 1) указывает на то, что интенсивный сейсмический процесс продолжается.

В целом, оценка сейсмической опасности грунтовых слоев различного состава и состояния в рамках проблемы предсказания интенсивности землетрясения определяется следующими основными факторами: влиянием потенциальной сейсмичности зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), особенностью трассы сейсмических волн, разломами и другими структурными неоднородностями. Инженерно-геологические условия на территории исследования существенно изменяют пространственную структуру волнового поля землетрясения. Достаточно отметить, что только различия в грунтовых условиях могут определить изменение амплитудного уровня колебания почти на порядок [Pavlov, 1988; Kalinina et al., 2017]. Наименьшие искажения в сейсмический сигнал вносят скальные грунты. По этой причине они наиболее выгодны как эталонная отсчетная точка для анализа пространственных вариаций интенсивности землетрясений. Но и само состояние скальных грунтов и процессы выветривания существенно ограничивают пределы точности, с которой могут быть описаны динамические характеристики землетрясений [Seismic Ground Properties, 1988].

С учетом сказанного выполненные исследования направлены на развитие методов изучения и прогно-

за сейсмических воздействий сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона. Конкретной задачей является оценка влияния скоростных неоднородностей приповерхностных рыхлых отложений и глубинных слоев коренных «эталонных» грунтов, представленных сейсмогрунтовыми моделями, на прогнозируемые сейсмические воздействия сильных землетрясений региона.

## 2. МЕТОДЫ

Исследование основывалось на использовании уже известных методов и подходов, разработанных другими авторами и нами ранее в процессе оценок поведения грунтов различного состава и состояния при заданном уровне сейсмических воздействий [Dzhurik et al., 2015b, 2023]. Выбранные подходы к анализу поведения грунтовых слоев при сейсмических воздействиях излагаются в процессе обсуждения результатов работы, или на них даются соответствующие ссылки. Последовательность реализации поставленных задач связана с необходимостью задания расчетных акселерограмм, построения сейсмогрунтовых моделей и проведения теоретических расчетов.

Задание расчетных акселерограмм или моделирование сейсмических воздействий в настоящее время выполняется на основе использования двух подходов: моделирования воздействия для площадки строительства и моделирования воздействия для сооружения

[Nazarov, 2012]. В нашем случае для территорий южной части Восточной Сибири и Северной Монголии реализовано формирование исходных сигналов для прогнозируемых сильных землетрясений, соответствующих принятой исходной сейсмичности, согласно картам общего сейсмического районирования (ОСР). В данном случае для решения поставленной задачи исходный сигнал сформирован для территорий с возможными 8-балльными сотрясениями для средних грунтов. Особенности задания исходного сигнала изложены в работе [Dzhurik et al., 2009], которая основана на использовании как местных записей землетрясений, так и записей мировой сети, достаточно близких к определенным параметрам зон ВОЗ исследуемого района. В развитии этого подхода нами использованы данные относительно сильных землетрясений, произошедших в последние годы (2020–2022) в наиболее опасных зонах ВОЗ, которые зарегистрированы сейсмическими станциями южной части Восточной Сибири (г. Иркутск) и Северной Монголии (г. Улан-Батор).

На территории г. Иркутска для записи землетрясений применялись цифровые инженерно-сейсмометрические станции «Байкал-7HR» с сейсмоприемниками A1638. Характеристики сейсмических каналов используемого комплекта аппаратуры позволяют регистрировать скорость колебаний в диапазоне частот 0.1–125.0 Гц, в диапазоне амплитуд ускорения от 10 мкм/с<sup>2</sup> до 5 м/с<sup>2</sup>. Данная сейсмостанция установлена сотрудниками ИЗК СО РАН с целью инженерно-сейсмометрического мониторинга сооружений Иркутской ГЭС (52°14'18" N, 104°19'24" E). На территории г. Улан-Батора использовалась аппаратура «Kinematics FBA ES-T EpiSensor Accelerometer», которая регистрирует ускорения в м/с<sup>2</sup> в диапазоне частот меньше 0.01 Гц до 40 Гц без искажений. Сейсмостанция входит в состав глобальной сейсмографической сети (GSN), международный код – ULN (47°51'54.0" N, 107°03'11.0" E).

Для выбранных пунктов регистрации приемники установлены на бетонных основаниях ниже глубины залегания слоя сезонного промерзания, которые опи-

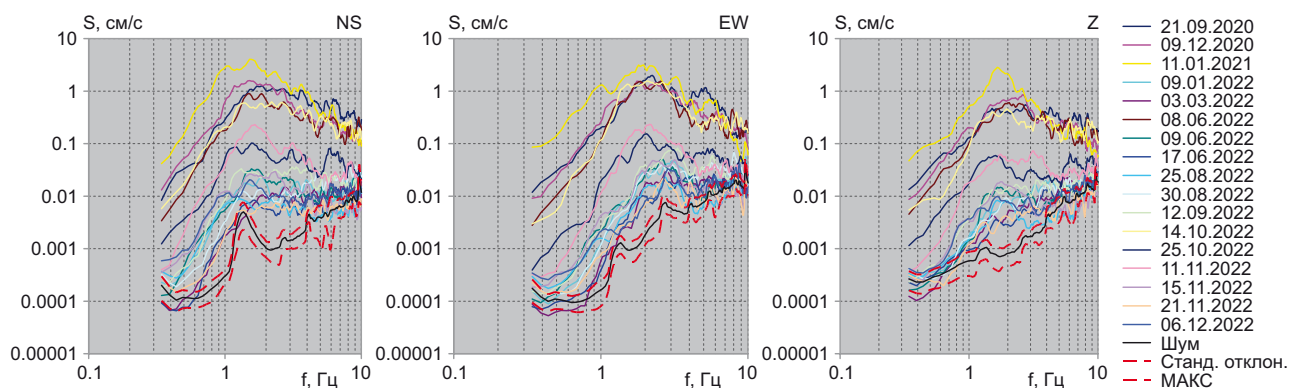
раются, в свою очередь, на крупно- и среднезернистые юрские песчаники (г. Иркутск) и на гранитоиды мезозойского интрузивного комплекса (г. Улан-Батор). Обобщенные значения измеренных скоростей продольных волн ( $V_p$  и  $V_s$ ) в указанных разновидностях грунтов в верхней зоне разреза до 10 м практически сравнимы 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.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первоначальный анализ спектрального состава зарегистрированных землетрясений, необходимо для выбора наиболее представительных записей, включено 17 трехкомпонентных записей землетрясений, зарегистрированных в г. Иркутске и г. Улан-Баторе (табл. 1). Их основные показатели следующие: энергетический класс 10–16, магнитуда 3.5–7.3, интенсивность сотрясения в баллах 2–5 (г. Иркутск) и до 1–2 баллов (г. Улан-Батор), эпицентральные расстояния в пределах 70–324 км (г. Иркутск) и 475–612 км (г. Улан-Батор).

Для первичной оценки расчетных спектров использовались записи землетрясений, зарегистрированных в Иркутске, как наиболее близких по эпицентральному расстоянию и, следовательно, наиболее представительных для выявления связи их параметров с основными параметрами очагов землетрясений. Отмечается, что регистрация землетрясений постоянной сейсмической станцией проводится в пределах города, с высоким уровнем помех. Это обстоятельство учитывалось при анализе спектров.

Расчетные спектры для отобранных акселерограмм до вычитания шума показаны на рис. 2. Они были вычислены с использованием окна длительностью 20.48 с (г. Иркутск) и 81.92 с (г. Улан-Батор) при шаге цифровки 0.01 с. Спектры шума представлены черной линией. Можно отметить общие особенности спектров землетрясений: это быстрое увеличение их значений



**Рис. 2.** Спектры зарегистрированных землетрясений (г. Иркутск) согласно таблице 1. Разноцветные линии – спектры NS-, EW- и Z-компоненты до вычитания шума (черная линия – шум).

**Fig. 2.** Spectra from earthquakes recorded in Irkutsk in accordance with Table 1. Multicolored lines are spectra of NS-, EW- and Z-components prior to noise subtraction (the black line stands for noise).

**Таблица 1.** Основные параметры зарегистрированных землетрясений Байкало-Монгольского региона с 2020 по 2022 г. по данным Байкальского филиала ЕГС РАН**Table 1.** Main parameters of earthquakes in 2020–2022 in the Mongolian-Baikal region from the data of the Baikal branch of the GS RAS

| №         | Дата и время                     | Широта       | Долгота       | К           | М          | Интенсивность<br>(г. Иркутск),<br>баллы | Эпицентральное<br>расстояние Δ,<br>км | Максимальное<br>значение<br>спектра; NS,<br>EW, Z, см/с | Частота<br>основного<br>максимума<br>спектра: NS,<br>EW, Z, Гц |
|-----------|----------------------------------|--------------|---------------|-------------|------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>1</b>  | <b>2020-09-21<br/>18:04:57.4</b> | <b>51.78</b> | <b>103.41</b> | <b>14.6</b> | <b>6.0</b> | <b>5</b>                                | <b>81</b>                             | <b>1.26</b><br><b>1.99</b><br><b>0.55</b>               | <b>1.86</b><br><b>2.25</b><br><b>2.73</b>                      |
| <b>2</b>  | <b>2020-12-09<br/>21:44:33.6</b> | <b>52.38</b> | <b>106.59</b> | <b>14.0</b> | <b>5.6</b> | <b>5</b>                                | <b>155</b>                            | <b>1.58</b><br><b>1.54</b><br><b>0.85</b>               | <b>1.51</b><br><b>1.76</b><br><b>2.64</b>                      |
| <b>3</b>  | <b>2021-01-11<br/>21:32:58.7</b> | <b>51.27</b> | <b>100.38</b> | <b>16.0</b> | <b>7.3</b> | <b>5</b>                                | <b>292</b>                            | <b>4.03</b><br><b>3.15</b><br><b>2.84</b>               | <b>1.51</b><br><b>1.95</b><br><b>1.66</b>                      |
| 4         | 2022-01-09<br>09:04:08           | 52.12        | 105.79        | 10.6        | 3.7        | 3                                       | 101                                   | 0.021<br>0.041<br>0.017                                 | 1.86<br>3.08<br>4.35                                           |
| 5         | 2022-03-03<br>10:50:04           | 52.20        | 106.51        | 10.6        | 3.7        | 2-3                                     | 150                                   | 0.013<br>0.023<br>0.015                                 | 2.73<br>2.83<br>5.81                                           |
| <b>6</b>  | <b>2022-06-08<br/>12:24:20</b>   | <b>52.06</b> | <b>105.67</b> | <b>14.2</b> | <b>5.6</b> | <b>5</b>                                | <b>94</b>                             | <b>0.89</b><br><b>1.54</b><br><b>0.60</b>               | <b>1.86</b><br><b>2.54</b><br><b>2.05</b>                      |
| 7         | 2022-06-09<br>22:36:15           | 52.63        | 106.97        | 11.1        | 3.9        | 2                                       | 185                                   | 0.031<br>0.043<br>0.014                                 | 1.56<br>2.54<br>1.76                                           |
| 8         | 2022-06-17<br>22:22:35           | 52.29        | 105.98        | 10.3        | 3.5        | 2-3                                     | 113                                   | 0.007<br>0.020<br>0.010                                 | 4.20<br>4.30<br>3.81                                           |
| 9         | 2022-08-25<br>15:18:14           | 51.37        | 100.56        | 11.4        | 4.1        | 2                                       | 277                                   | 0.008<br>0.015<br>0.008                                 | 2.15<br>2.73<br>1.66                                           |
| 10        | 2022-08-30<br>00:34:26           | 52.03        | 105.67        | 10.6        | 3.7        | 3                                       | 95                                    | 0.032<br>0.050<br>0.029                                 | 8.25<br>8.06<br>8.35                                           |
| 11        | 2022-09-12<br>06:56:53           | 51.68        | 102.13        | 11.6        | 4.2        | 3                                       | 163                                   | 0.034<br>0.077<br>0.019                                 | 3.32<br>3.32<br>3.32                                           |
| <b>12</b> | <b>2022-10-14<br/>00:53:54</b>   | <b>52.06</b> | <b>105.68</b> | <b>14.0</b> | <b>5.6</b> | <b>5</b>                                | <b>93</b>                             | <b>0.63</b><br><b>1.56</b><br><b>0.46</b>               | <b>2.2</b><br><b>2.05</b><br><b>1.95</b>                       |
| 13        | 2022-10-25<br>00:33:33           | 51.67        | 104.78        | 12.1        | 4.5        | 3-4                                     | 71                                    | 0.10<br>0.15<br>0.058                                   | 1.56<br>2.05<br>1.61                                           |
| 14        | 2022-11-11<br>07:25:18           | 51.64        | 105.81        | 12.9        | 4.9        | 4                                       | 122                                   | 0.23<br>0.23<br>0.071                                   | 1.66<br>2.15<br>3.13                                           |
| 15        | 2022-11-15<br>00:24:00           | 51.05        | 99.97         | 12.4        | 4.7        | 2                                       | 329                                   | 0.029<br>0.044<br>0.018                                 | 2.34<br>2.25<br>1.76                                           |
| 16        | 2022-11-21<br>05:40:36           | 52.57        | 106.52        | 10.6        | 3.7        | 2                                       | 154                                   | 0.006<br>0.014<br>0.005                                 | 2.34<br>2.64<br>3.17                                           |
| 17        | 2022-12-06<br>14:40:17           | 51.08        | 100.02        | 12.5        | 4.7        | 2-3                                     | 324                                   | 0.018<br>0.027<br>0.009                                 | 1.51<br>2.88<br>1.66                                           |

Примечание. Магнитуда (М) получена пересчетом из энергетического класса Кр (по Т.Г. Раутиан) по формуле Гуттенберга–Рихтера–Раутиан:  $M = (Kp - 4) / 1.8$  (при  $Kp \leq 14$ ) и  $M = (Kp - 8) / 1.1$  (при  $Kp > 14$ ) [Riznichenko, 1985]. Основные параметры землетрясений взяты с сайта Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<https://seis-bykl.ru/>). Полужирным шрифтом выделены землетрясения, записи которых использовались при дальнейших расчетах исходного сейсмического сигнала.

Note. Magnitude (M) was obtained by recalculation from energy class Kp (after T.G. Rautian) on Gutenberg-Richter-Rautian formula:  $M = (Kp - 4) / 1.8$  (at  $Kp \leq 14$ ) and  $M = (Kp - 8) / 1.1$  (at  $Kp > 14$ ) [Riznichenko, 1985]. The main earthquake parameters are taken from the Baikal branch of the GS RAS website (<https://seis-bykl.ru/>). The bolded earthquakes are those whose records were used in further calculations of the initial seismic signal.

до 1.0–1.5 Гц, их относительно полагая часть до 3–4 Гц, и далее наблюдается спад до 10 Гц. По интенсивности значения спектра шума закономерно увеличиваются с возрастанием частоты и по величине могут меняться от минимального значения в пределах 1–2 порядков. Проследить изменение максимумов спектров и их частот в зависимости от эпицентрального расстояния и магнитуды по представленным данным не представляется возможным, хотя по приведенным кривым после вычитания шума (табл. 1) отмечается, что для сравнимых по магнитуде землетрясений с увеличением эпицентрального расстояния величина  $S$  (значения спектра) снижается и, в связи с большим поглощением высокочастотных колебаний с увеличением эпицентрального расстояния, максимумы спектров могут несколько смещаться в сторону низких частот. Но и для отмеченной связи определенные коррективы может вносить глубина и механизм очагов. В целом, максимальные значения спектров меняются для горизонтальных компонент от 0.006 до 4.030 см/с и для вертикальных – от 0.005 до 2.940 см/с. Частоты основных максимумов спектров для трех компонент находятся в интервале 1.56–8.35 Гц. Общий анализ спектрального состава рассматриваемых землетрясений Байкало-Монгольского региона свидетельствует о том, что вполне обоснованно для формирования исходного сигнала достаточен выбор наиболее сильных и близких по эпицентральному расстоянию землетрясений, зарегистрированных в Улан-Баторе и Иркутске.

Спектры слабых и удаленных отобранных землетрясений по отношению к спектрам «шума» могут различаться в пределах до одного порядка, сильных и относительно сильных землетрясений – на 2–3 порядка (рис. 2). Этот показатель, кроме уже отмеченных  $\Delta$ ,  $K$ ,  $M$ , имеет существенное значение и учитывался при выборе землетрясений для формирования исходного сигнала, в особенности для промышленных и административных центров, какими являются территории г. Иркутска и г. Улан-Батора.

Из приведенных данных (табл. 1) были отобраны пять записей сильных землетрясений, зарегистрированных одновременно в Иркутске и Улан-Баторе на грунтах I категории по сейсмическим свойствам. Отобранные землетрясения характеризуются длительностью колебаний до 20 с (г. Иркутск) и до 80 с (г. Улан-Батор) (рис. 3, а, б), интенсивностью в эпицентре 7.0–8.7 балла, магнитудой ( $M$ )>5, энергетическим классом ( $K$ )>14 и основными максимумами спектров на частотах 1.61–2.25 Гц (г. Иркутск) и 0.83–1.62 Гц (г. Улан-Батор). Отмечается, что по максимальным ускорениям записи отобранных землетрясений не превышают 10 см/с<sup>2</sup> для Иркутска и 1 см/с<sup>2</sup> для Улан-Батора (рис. 3; табл. 2).

Реализован способ, в котором учитываются местные условия формирования исходного сигнала. Основа этого способа опирается на теорию восстановления сигналов и изображений по фазовым характеристикам. В отличие от имеющихся подходов [Field, 2000; Boore,

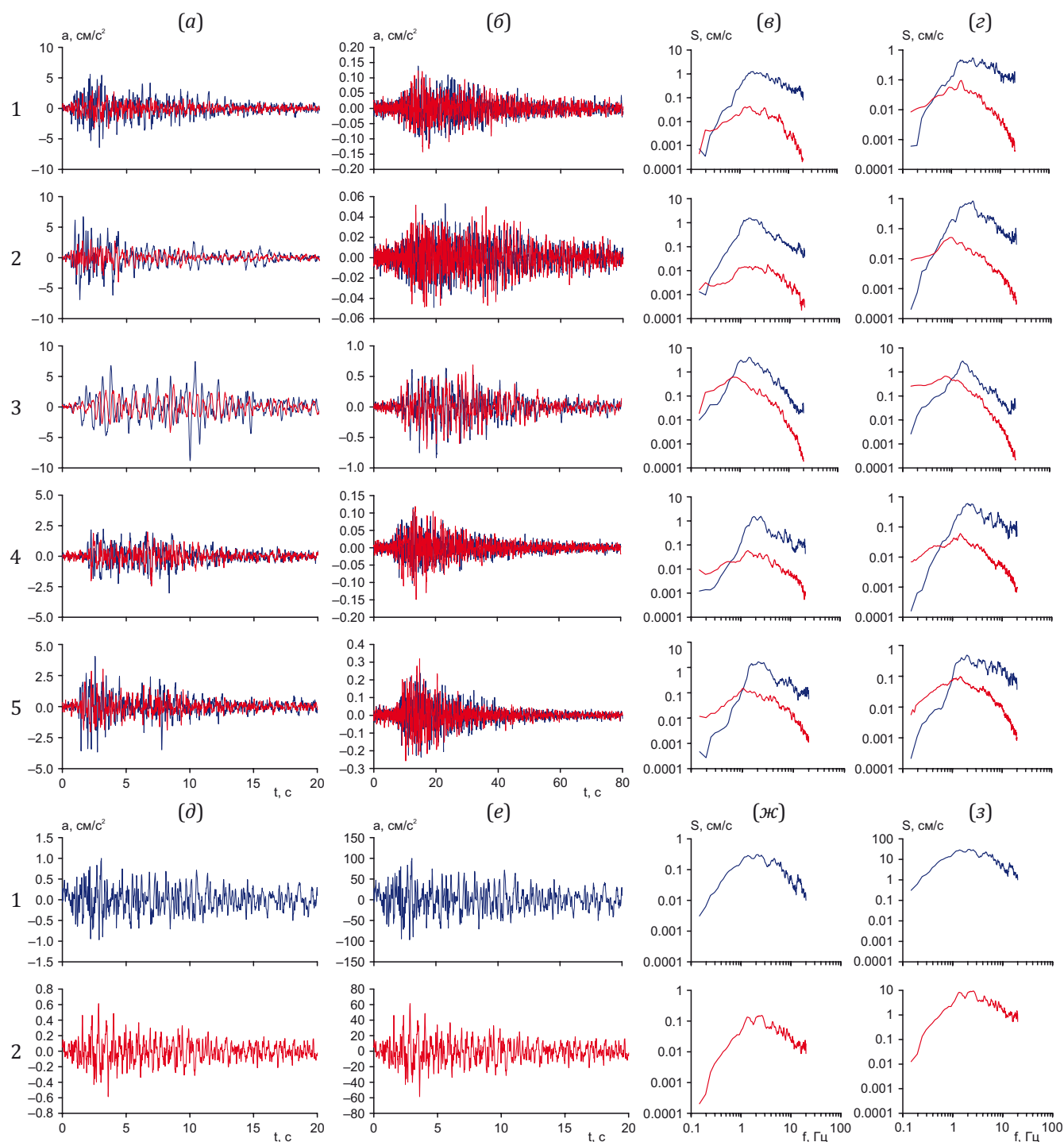
Thompson, 2014], по данным записей землетрясений региональной сети сейсмических станций задается амплитудный и фазовый спектры землетрясения с необходимыми параметрами (для задания амплитудного спектра можно также использовать мировые данные). В итоге формирование исходного сигнала сводится к ряду относительно простых процедур. Поскольку среда выступает формообразующим фактором очагового импульса, фазовый спектр так или иначе учитывает излучение очага и рассеивающие свойства неоднородностей среды.

Расчетные спектры (рис. 3, в, г) нормировались, и рассчитывался средний амплитудный спектр по пяти землетрясениям для NS- и Z-компоненты. Выбор NS-компоненты обусловлен тем, что в инженерной сейсмологии для оценки сейсмических воздействий принято использовать максимальную из двух горизонтальных компонент [Pavlenko, 2009; Aleshin, 2017]. Максимальное значение ускорений приходится на NS-компоненту землетрясения № 3 (см. табл. 1). Расчет среднего спектра не является вполне корректной процедурой после отмеченных выше связей параметров спектров с параметрами очагов рассмотренных землетрясений (см. табл. 1), но при таком анализе средний расчетный спектр учитывает особенности колебаний из каждой зоны В03, для которой зарегистрировано землетрясение, по частотному составу, что, в первую очередь, сказывается на его расширении для выбранных уровней 0.5 и 0.7 от их максимума (табл. 2).

Фазовый спектр находился, по данным записи землетрясения № 1, как наиболее близкий по эпицентральному расстоянию и сравнимый с другими по интенсивности в г. Иркутске (рис. 3, а1), с помощью прямого преобразования Фурье [Jenkins, Watts, 1971]. Следующим этапом является Фурье-синтез расчетного среднего амплитудного спектра сильных землетрясений с полученным фазовым спектром [Dzhurik et al., 2015a]. Расчетные нормированные акселерограммы (рис. 3, д1–2) масштабировались по значениям максимальных амплитуд (рис. 3, е1–2), что не противоречит нормативным документам [Pavlov, 1988].

При таком подходе сформированный сигнал для рассматриваемых компонент отвечает параметрам очагов как близких, так и относительно далеких сильных землетрясений. Максимум спектра для NS-компоненты равен 2.15 Гц и 2.57 Гц – для Z-компоненты (рис. 3, ж, з; табл. 3), и по интенсивности колебаний поверхности, равной 100 см/с<sup>2</sup>, для NS-компоненты и 61 см/с<sup>2</sup> – для Z-компоненты соответствует уровню сейсмичности для «эталонных» коренных пород, равному 7 баллам, т.е. исходный сигнал отвечает территориям южной части Восточной Сибири и Северной Монголии с исходной сейсмичностью, равной 8 баллам для средних грунтов (II категория по сейсмическим свойствам [Construction..., 2018]), и отражает особенности опасных зон В03.

В отношении построения сейсмогрунтовых моделей необходимо отметить, что при оценке сейсмических



**Рис. 3.** Формирование исходного сигнала для «эталонных» коренных пород.

1–5 – акселерограммы отобранных землетрясений для максимальной горизонтальной (синяя) и вертикальной (красная) компоненты; (а) – акселерограммы, зарегистрированные в Иркутске; (б) – акселерограммы, зарегистрированные в Улан-Баторе; (в, г) – их спектры, также для NS- и Z-компоненты соответственно; (д) – нормированная акселерограмма для NS- (1) и Z-компоненты (2); (е) – масштабированная акселерограмма для NS- (1) и Z-компоненты (2) на 8-балльные сотрясения по шкале MSK-64 для «эталонных» коренных пород; (ж, з) – их спектры, также для NS- и Z-компоненты соответственно.

**Fig. 3.** An initial signal assignment for reference bedrock.

1–5 – accelerograms of the selected earthquakes for maximal horizontal (blue) and vertical (red) components; (а) – accelerograms recorded in Irkutsk; (б) – accelerograms recorded in Ulaanbaatar; (в, г) – their spectra, as well as for NS- and Z-components, respectively; (д) – normalized accelerogram for NS-component (1) and Z-component (2); (е) – scaled accelerograms for NS- and Z-components for shaking intensity level of VIII on the MSK-64 scale for reference bedrock; (ж, з) – their spectra, as well as for NS- and Z-components, respectively.

**Таблица 2.** Основные параметры акселерограмм и соответствующих им спектров для отобранных землетрясений  
**Table 2.** Main parameters of accelerograms and their corresponding spectra for the selected earthquakes

| Компонента                                    | Максимальное ускорение $A_{\max}$ , см/с <sup>2</sup> | Максимальное значение спектра $S_{\max}$ , см/с | Частота основного максимума спектра, Гц | Интервал частот для $0.7 \cdot S_{\max}(f)$ , Гц | Интервал частот для $0.5 \cdot S_{\max}(f)$ , Гц |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Землетрясение № 1, сейсмостанция «Иркутск»    |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| 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» |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| NS                                            | 0.16                                                  | 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»    |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| 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» |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| NS                                            | 0.06                                                  | 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»    |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| 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» |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| 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                                        |
| Землетрясение № 4, сейсмостанция «Иркутск»    |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| NS                                            | 3.02                                                  | 1.65                                            | 2.54                                    | 1.66–2.73                                        | 1.56–3.03                                        |
| Z                                             | 2.45                                                  | 0.62                                            | 2.05                                    | 1.66–2.78                                        | 1.56–8.3                                         |
| Землетрясение № 4, сейсмостанция «Улан-Батор» |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| NS                                            | 0.12                                                  | 0.06                                            | 1.37                                    | 1.22–2.49                                        | 1.07–3.61                                        |
| Z                                             | 0.15                                                  | 0.06                                            | 1.44                                    | 1.06–1.66                                        | 0.92–2.05                                        |
| Землетрясение № 5, сейсмостанция «Иркутск»    |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| NS                                            | 4.05                                                  | 1.69                                            | 2.05                                    | 1.46–2.78                                        | 1.37–3.03                                        |
| Z                                             | 3.01                                                  | 0.48                                            | 1.95                                    | 1.46–4.15                                        | 1.17–9.08                                        |
| Землетрясение № 5, сейсмостанция «Улан-Батор» |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| NS                                            | 0.24                                                  | 0.15                                            | 1.03                                    | 0.88–1.71                                        | 0.83–3.56                                        |
| Z                                             | 0.32                                                  | 0.10                                            | 1.44                                    | 0.92–1.67                                        | 0.57–2.29                                        |
| Исходный сигнал масштабированный              |                                                       |                                                 |                                         |                                                  |                                                  |
| NS                                            | 100                                                   | 30.8                                            | 2.15                                    | 1.12–4.74                                        | 0.98–6.30                                        |
| Z                                             | 61                                                    | 9.4                                             | 2.59                                    | 1.27–2.83                                        | 1.17–4.44                                        |

воздействий под приповерхностными неоднородностями понимается изменение скоростей сейсмических волн с глубиной и по площади в грунтовых слоях различного состава и состояния. Например, при сейсмическом микрорайонировании обязательная глубина исследований составляет 10–30 м [Pavlov, 1988], но для расчетов максимальных ускорений, преобладающих периодов и резонансных частот требуется ее увеличение вплоть до залегания «эталонных» коренных пород (приповерхностная скоростная неоднородность) [Dzhurik et al., 2023]. При этом не исключается и изучение глубинных неоднородностей как рыхлых, вклю-

чая и кайнозойские отложения впадин Байкало-Монгольского региона, так и коренных пород верхней части земной коры практически до глубин возникновения сильных землетрясений в пределах Байкало-Монгольского регион (глубинная скоростная неоднородность). Это особенно существенно для оценки сейсмических воздействий близких сильных землетрясений для промышленных районов юга Сибири и Северной Монголии [Dzhurik et al., 2022a].

Для выявления степени влияния отмеченных приповерхностных и глубинных неоднородностей для рыхлых и коренных пород на сформированный исходный

**Таблица 3.** Основные параметры сейсмогрунтовых моделей  
**Table 3.** Main parameters of seismic ground motion models

| № модели                                           | Мощность слоя, км | Скорость продольных волн, $V_p$ , км/с | Скорость поперечных волн, $V_s$ , км/с | Объемная масса, г/см <sup>3</sup> | Декремент затухания, D |
|----------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1<br>Модель «эталона»                              | 0.03              | 2.0                                    | 1.1                                    | 2.3                               | 0.05                   |
|                                                    | 0.10              | 2.8                                    | 1.5                                    | 2.4                               | 0.04                   |
|                                                    | 0.20              | 3.2                                    | 1.7                                    | 2.5                               | 0.032                  |
|                                                    | 0.60              | 4.0                                    | 2.3                                    | 2.5                               | 0.02                   |
| 2<br>Рыхлые (h=10 м),<br>ниже коренные породы      | 0.01              | 0.5                                    | 0.24                                   | 1.75                              | 0.24                   |
|                                                    | 0.03              | 2.0                                    | 1.1                                    | 2.3                               | 0.05                   |
|                                                    | 0.10              | 2.8                                    | 1.5                                    | 2.4                               | 0.04                   |
|                                                    | 0.20              | 3.2                                    | 1.7                                    | 2.5                               | 0.032                  |
|                                                    | 0.68              | 4.0                                    | 2.3                                    | 2.5                               | 0.028                  |
| 3<br>Рыхлые (h=30 м),<br>ниже коренные породы      | 0.01              | 0.5                                    | 0.24                                   | 1.75                              | 0.24                   |
|                                                    | 0.02              | 0.6                                    | 0.3                                    | 1.8                               | 0.22                   |
|                                                    | 0.03              | 2.0                                    | 1.1                                    | 2.3                               | 0.05                   |
|                                                    | 0.10              | 2.8                                    | 1.5                                    | 2.4                               | 0.04                   |
|                                                    | 0.20              | 3.2                                    | 1.7                                    | 2.5                               | 0.032                  |
|                                                    | 0.60              | 4.0                                    | 2.3                                    | 2.5                               | 0.028                  |
| 4<br>Рыхлые (h=90 м),<br>ниже коренные породы      | 0.01              | 0.5                                    | 0.24                                   | 1.75                              | 0.24                   |
|                                                    | 0.02              | 0.6                                    | 0.30                                   | 1.80                              | 0.20                   |
|                                                    | 0.06              | 0.8                                    | 0.40                                   | 1.90                              | 0.11                   |
|                                                    | 0.03              | 2.0                                    | 1.10                                   | 2.30                              | 0.05                   |
|                                                    | 0.10              | 2.8                                    | 1.50                                   | 2.40                              | 0.04                   |
|                                                    | 0.20              | 3.2                                    | 1.70                                   | 2.50                              | 0.032                  |
|                                                    | 0.60              | 4.0                                    | 2.30                                   | 2.50                              | 0.028                  |
| 5<br>Рыхлые (h=210 м),<br>ниже коренные породы     | 0.01              | 0.5                                    | 0.24                                   | 1.75                              | 0.24                   |
|                                                    | 0.02              | 0.6                                    | 0.3                                    | 1.8                               | 0.22                   |
|                                                    | 0.06              | 0.8                                    | 0.4                                    | 1.9                               | 0.11                   |
|                                                    | 0.12              | 0.9                                    | 0.45                                   | 2.0                               | 0.09                   |
|                                                    | 0.03              | 2.0                                    | 1.1                                    | 2.3                               | 0.05                   |
|                                                    | 0.10              | 2.8                                    | 1.5                                    | 2.4                               | 0.04                   |
|                                                    | 0.20              | 3.2                                    | 1.7                                    | 2.5                               | 0.032                  |
|                                                    | 0.60              | 4.0                                    | 2.3                                    | 2.5                               | 0.028                  |
| 6<br>Коренные породы<br>(глубинная неоднородность) | 0.8               | 4.8                                    | 2.9                                    | 2.6                               | 0.025                  |
|                                                    | 1.2               | 5.6                                    | 3.2                                    | 2.7                               | 0.023                  |
|                                                    | 3.0               | 6.0                                    | 3.6                                    | 2.8                               | 0.020                  |
|                                                    | 3.0               | 6.2                                    | 3.7                                    | 2.9                               | 0.018                  |
|                                                    | 3.0               | 6.4                                    | 3.8                                    | 3.0                               | 0.016                  |
|                                                    | 3.0               | 6.8                                    | 3.9                                    | 3.1                               | 0.015                  |
|                                                    | –                 | 7.0                                    | 3.95                                   | 3.2                               | 0.014                  |

сигнал в первом приближении построено пять сейсмогрунтовых моделей (табл. 3). Для их построения использовались имеющиеся данные бурения, результаты сейсморазведочных и сейсмометрических измерений. Выбор по состоянию и общей мощности рыхлых отложений основывался на анализе проведенных ранее работ [Dzhurik et al., 2009] по обоснованию инженерно-сейсмологических условий строительства в регионе, отмеченных на схеме (см. рис. 1). Учитывались и полученные в последнее время обобщенные данные о скоростях сейсмических волн для наиболее распространенных типов грунтов исследуемой территории [Dzhurik et al., 2022b].

Первая модель соответствует, сверху до 30 м, «эталонным» коренным породам. Для юго-западной части Байкало-Монгольского региона отмечаются широкие пределы изменения скоростей сейсмических волн. В сильнотрещиноватых скальных породах диапазон изменения  $V_p$  составляет 1800–2300 м/с, наиболее вероятное их значение в этом состоянии равно 2000 м/с. В слаботрещиноватых, при их залегании до 30 м и более,

пределы изменения скоростей от 2800 до 4000 м/с (табл. 3, м. 1). Для анализа влияния приповерхностных неоднородностей на сформированный исходный сигнал первая модель была дополнена сверху рыхлыми отложениями мощностью 10, 30, 90 и 210 м соответственно для моделей 2–5 (табл. 3, м. 2–5). Скорости  $V_p$  в рыхлых неводонасыщенных породах меняются от аномально низких 500–600 м/с в верхнем слое до 10 м, до 800–900 м/с – в нижележащих слоях. При этом  $V_s$  находится в пределах 240–450 м/с и отношение  $V_p/V_s$  – от 1.9 до 2.0. По сейсмическим свойствам это «средние грунты» II категории, к которым относится исходная сейсмичность по картам ОСП [Construction..., 2018].

Одним из основных параметров при расчетах сейсмических воздействий для построенных моделей является затухание сейсмических волн, которое характеризуется декрементом поглощения (D) и оценивается в зависимости от скоростей сейсмических волн согласно модели Гуревича [Gurevich, 1974]. В нашем случае для построенных сейсмогрунтовых моделей при диапазоне

изменения  $V_p$  от 600 до 4000 м/с декремент поглощения находится в пределах от 0.240 до 0.028 (см. табл. 2) и при увеличении скорости до 7000 м/с уменьшается до 0.014.

Теоретические расчеты основывались на использовании методики и программы расчетов колебаний на поверхности и во внутренних точках среды [Ratnikova, 1973]:

$$S_2(f) = U(f) \cdot S_1(f), \quad (1)$$

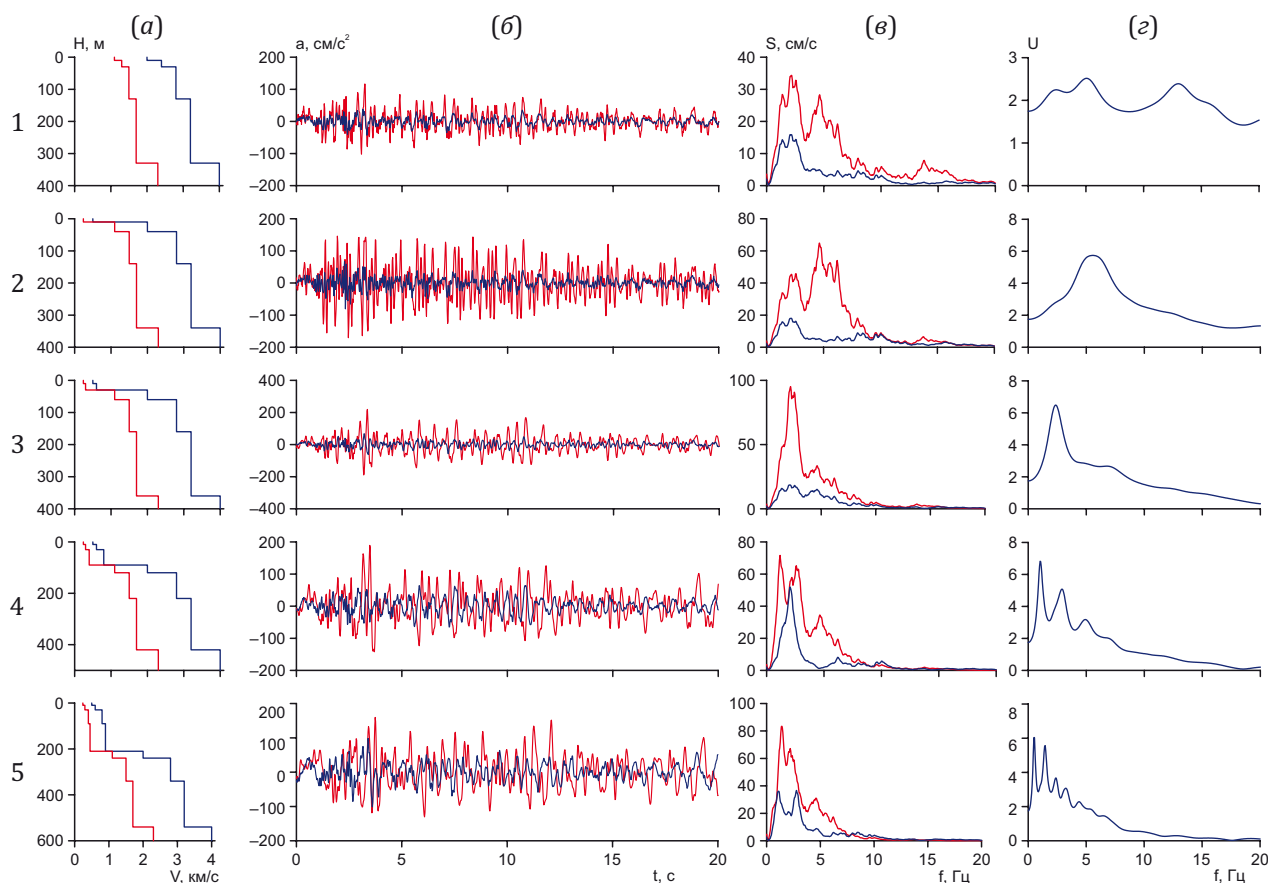
где  $S_1(f)$  – спектр колебаний сейсмической волны, падающей на пачку тонких слоев (рыхлых отложений),  $U(f)$  – частотная характеристика рыхлой толщи,  $S_2(f)$  – спектр колебаний на свободной поверхности.

Необходимо отметить, что при расчетах сформированный на 8-балльные сейсмические воздействия (для средних грунтов) исходный сигнал использовался только для выявления сравнительной оценки его изменения для построенных моделей. При этом предполагалось, что вся энергия исходного сигнала уходит

на упругое деформирование вышележащих слоев коренных и рыхлых пород.

Результаты расчетов показывают (рис. 4; табл. 4), что для модели коренных «эталонных» пород максимальное ускорение равно 117 см/с<sup>2</sup> для NS-компоненты и 42 см/с<sup>2</sup> – для Z-компоненты, преобладающая частота спектра, соответствующая его максимальным уровням (34.3 см/с – NS и 15.9 см/с – Z), равна 2.15 Гц. Резонансная частота слоя коренных пород мощностью 30 м равна 13 Гц, а уровень частотной характеристики не превышает 2.4 (табл. 4).

Дополненные рыхлыми грунтами модели следующим образом влияют на изменение основных параметров исходного сигнала. Согласно принятому авторами 8-балльному воздействию на рыхлые неводонасыщенные грунты (рис. 4, м. 2–5; табл. 4) максимальные ускорения при изменении мощности рыхлых отложений от 10 до 210 м увеличились и находятся в пределах 166–219 см/с<sup>2</sup> для NS-компоненты и 68–101 см/с<sup>2</sup> – для Z-компоненты.



**Рис. 4.** Расчетные показатели сейсмических воздействий для сейсмогрунтовых моделей 1–5, построенных до глубины залегания коренных «эталонных» пород.

(а) – изменение скоростей (Р – синяя и S – красная линия) сейсмических волн с глубиной для построенных моделей; (б) – акселерограммы для компонент: NS – красная и Z – синяя линия; (в) – спектры для компонент: NS – красная и Z – синяя линия; (г) – частотные характеристики рыхлых слоев.

**Fig. 4.** Calculated seismic effects for seismic ground motion models 1–5, reaching the depth of occurrence of reference bedrock.

(a) – change in seismic wave (P – blue line and S – red line) velocities with depth for the constructed models; (б) – accelerograms for NS-component (red line) and Z-component (blue line); (в) – spectra for NS-component (red line) and Z-component (blue line); (г) – frequency characteristics of loose layers.

**Таблица 4.** Основные параметры расчетных акселерограмм для моделей 1–5, построенных до глубины залегания коренных «эталонных» пород с учетом приповерхностных скоростных неоднородностей**Table 4.** Main calculation accelerogram parameters for models 1–5, reaching the depth of occurrence of reference bedrock with regard to near-surface velocity heterogeneities

| № модели<br>(h слоя), м        | Максимальное<br>ускорение $A_{\max}$<br>см/с <sup>2</sup> | Максимальное<br>значение спектра<br>$S_{\max}$ см/с | Частота основного<br>максимума<br>спектра, Гц | Интервал<br>частот для<br>$0.7 \cdot S_{\max}(f)$ , Гц | Максимальный<br>уровень<br>частотной<br>характеристики | Резонансная<br>частота рыхлых<br>слоев, Гц |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| NS-компонента                  |                                                           |                                                     |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| Коренные «эталонные» породы    |                                                           |                                                     |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 1(330)                         | 117                                                       | 34.3                                                | 2.15                                          | 1.17–4.83                                              | 2.4                                                    | 13                                         |
| Рыхлые неводонасыщенные породы |                                                           |                                                     |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 2 (10)                         | 171                                                       | 64.9                                                | 4.64                                          | 2.54–6.30                                              | 5.7                                                    | 5.57                                       |
| 3 (30)                         | 219                                                       | 95.1                                                | 2.2                                           | 1.9–2.78                                               | 6.5                                                    | 2.34                                       |
| 4 (90)                         | 189                                                       | 71.6                                                | 1.17                                          | 1.03–2.93                                              | 6.8                                                    | 1.03                                       |
| 5 (210)                        | 160                                                       | 83.5                                                | 1.42                                          | 1.12–2.54                                              | 6.0                                                    | 0.49                                       |
| Z-компонента                   |                                                           |                                                     |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| Коренные «эталонные» породы    |                                                           |                                                     |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 1(330)                         | 43                                                        | 15.9                                                | 2.15                                          | 1.12–2.78                                              | 2.5                                                    | 5.08                                       |
| Рыхлые неводонасыщенные породы |                                                           |                                                     |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 2 (10)                         | 81                                                        | 18.0                                                | 2.15                                          | 1.12–2.78                                              | 5.7                                                    | 5.57                                       |
| 3 (30)                         | 68                                                        | 18.6                                                | 2.15                                          | 1.17–4.79                                              | 6.5                                                    | 2.34                                       |
| 4 (90)                         | 65                                                        | 51.9                                                | 2.05                                          | 1.81–2.29                                              | 6.8                                                    | 1.03                                       |
| 5 (210)                        | 101                                                       | 36.7                                                | 2.78                                          | 0.88–2.98                                              | 6.0                                                    | 0.49                                       |

По отношению к сейсмогрунтовой модели «эталона» (табл. 4) ускорение сейсмических колебаний увеличивается в 1.40–1.87 раза для NS- и в 1.61–2.40 раза – для Z-компоненты. Если оценивать по шкале балльности MSK-64, то это будет близко к интенсивности проявления сейсмичности в 8 баллов [Construction..., 2018].

Частоты основных максимумов спектров для неводонасыщенных грунтов для рассматриваемых мощностей находятся в интервале 1.17–4.64 Гц для NS- и в 2.05–2.78 Гц – для Z-компоненты. Но сам интервал частот на уровне  $0.7 \cdot S_{\max}$  несколько смещается в сторону низких частот и имеет тенденцию к уменьшению с увеличением мощности рыхлых отложений, что не всегда соблюдается из-за уровня и формы частотной характеристики: для моделей 4 и 5 имеется большее, чем для модели 3, количество резонансных пиков, растянутых в частотной области.

Показательными в этом отношении являются изменения параметров частотных характеристик. При увеличении общей мощности рыхлых отложений в интервале от 10 до 210 м для выбранного авторами эталона резонансная частота закономерно уменьшается для их неводонасыщенного состояния от 5.57 до 0.49 Гц (рис. 4, г; табл. 4). Для максимального значения уровня частотной характеристики такой закономерности в зависимости от общей мощности слоя не наблюдается.

Представленные особенности влияния приповерхностных неоднородностей рыхлых грунтов на исходный сейсмический сигнал рассматриваются авторами далее в сочетании с глубинными для коренных пород, также с учетом их скоростной неоднородности, вплоть до возможных глубин возникновения очагов землетрясений [Dzhurik, Drennov, 1991]. Последние для исследуемого региона регистрируются на глубине порядка 10 км [Golenetskii, 1997], и основная часть гипотенцентров землетрясений расположена в пределах от 10 до 25 км [Radziminovich, 2022]. Для юго-западной части Байкало-Монгольского региона построена одна модель, соответствующая в пределах промышленных районов Иркутска и Улан-Батора распределению скоростей сейсмических волн до глубины 14 км. Для уточнения скоростного разреза использовались сведения, приведенные в работе [Zorin et al., 1994]. Для российской части трансекта (см. рис. 1) использовались данные глубинного сейсмического зондирования [Puzyrev, 1981], для монгольской – данные метода поверхностных волн по наблюдениям стационарных станций России и Монголии. По этим данным толщина земной коры варьируется в пределах 40–42 км и является типично континентальной вдоль всего трансекта (см. рис. 1). Другая особенность земной коры связана с постоянством средней скорости продольных волн, равной  $6.4 \pm 0.1$  км/с. В пределах Монголо-Амурской складчатой системы скорость сейсмических волн с поверхности

фундамента до глубины 20–30 км увеличивается от 4–5 до 6.8 км/с. При этом по значениям  $V_p$  выделяются от четырех до шести слоев. На границе Мохо скорость достигает 8.1 км/с.

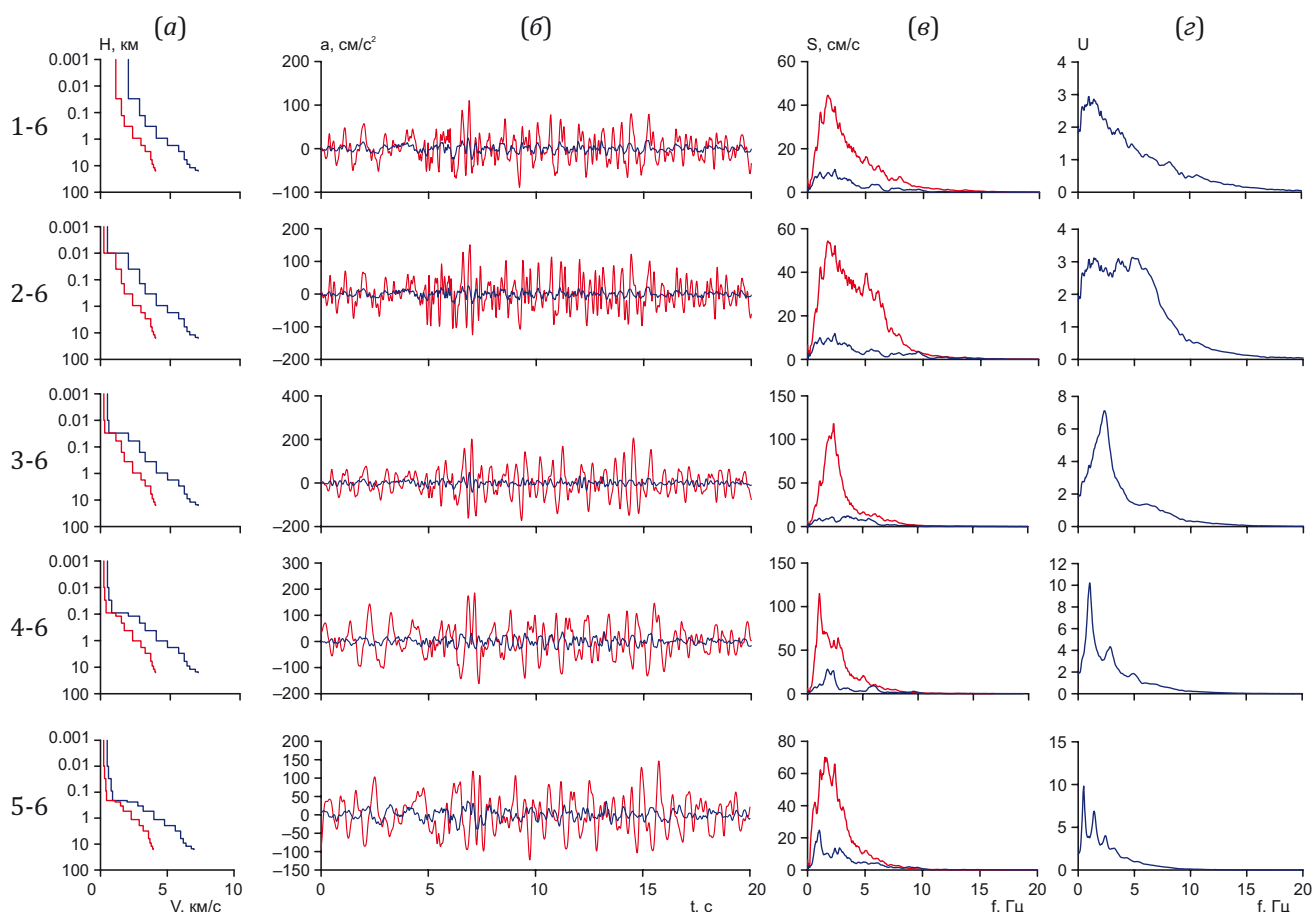
С учетом отмеченных данных о скоростях сейсмических волн построенная скоростная модель коренных пород (рис. 5, а, м. 1-6) сверху до 330 м представлена на распределением с глубиной скоростей соответствующих модели коренных эталонных пород (см. табл. 3, м. 1). Ниже этого слоя модель 1 дополнена распределением скоростей  $V_p$  и  $V_s$  до возможных глубин гипоцентров близких землетрясений. Это распределение представлено в виде модели 6 (см. табл. 3). В итоге ниже 330 м до глубин 3–4 км скорость  $V_p$  увеличивается от 4 до 6 км/с [Dzhurik et al., 2009] и на глубине 14–15 км достигает значений 6.8–7.0 км/с.

Для сравнительного анализа влияния приповерхностных и глубинных неоднородностей на сформиро-

ванный единый исходный сигнал (см. рис. 3) построенная модель (рис. 5, а, м. 1-6), в свою очередь, была дополнена сверху моделями рыхлых отложений мощностью 10, 30, 90 и 210 м. Сформированные таким способом модели 1-6, 2-6, 3-6, 4-6 и 5-6 представлены на рис. 5, а, а их цифровые значения сведены в табл. 3.

Отмечается, что при расчетах сформированный исходный сигнал (см. рис. 3) использовался для сравнительной оценки его изменения для построенных моделей и, следовательно, для относительного изменения параметров сейсмических воздействий для возможных территорий строительства Байкало-Монгольского региона, отвечающих построенным моделям. Предполагалось, что вся энергия исходного сигнала уходит на упругое деформирование вышележащих слоев коренных и рыхлых пород.

Результаты расчетов показывают (табл. 5), что для модели коренных «эталонных» пород максимальное



**Рис. 5.** Расчетные показатели сейсмических воздействий для сейсмогрунтовых моделей 1-6 – 5-6, построенных до возможных глубин гипоцентров землетрясений Монголо-Сибирского региона.

(а) – изменение скоростей (P – красная и S – черная линия) сейсмических волн с глубиной для построенных моделей; (б) – акселерограммы для компонент NS красная и Z-синяя линия; (в) – спектры для компонент NS – красная и Z – синяя линия; (г) – частотные характеристики рыхлых слоев.

**Fig. 5.** Calculated seismic effects for seismic ground motion models 1-6 – 5-6, reaching the intended hypocenter depths of earthquakes of the Mongolian-Siberian region.

(а) – change in seismic wave velocities (P – red line and S – black line) with depth for the constructed models; (б) – accelerograms for NS-component (red line) and Z-component (blue line); (в) – spectra for NS-component (red line) and Z-component (blue line); (г) – frequency characteristics of loose layers.

ускорение равно 110 см/с<sup>2</sup> для NS- и 25 см/с – для Z-компоненты, преобладающая частота спектра, соответствующая их максимальному уровню (44.6 и 10.5 см/с), равна 1.76 и 2.34 Гц. Эти показатели свидетельствуют о преобладании низкочастотных колебаний коренных пород, представленных моделью 1-6, что подтверждается частотой основного максимума частотной характеристики, близкой к 1 Гц (табл. 5, м. 1-6).

Дополненная рыхлыми грунтами модель следующим образом влияет на изменение основных параметров исходного сигнала. Максимальные ускорения при изменении мощности рыхлых отложений от 10 до 210 м увеличились и находятся в пределах 146–207 см/с<sup>2</sup> для NS- и 29–48 см/с<sup>2</sup> – для Z-компоненты. Но определенная зависимость от мощности рыхлых грунтов по представленным данным начинает сказываться с 30 м, при этом  $A_{\max}$  снижается с 207 до 146 см/с<sup>2</sup> для NS-компоненты. Для Z-компоненты изменения незначительны (38–46 см/с<sup>2</sup>) и явного снижения не является.

Такая же закономерность отмечается и для максимальных значений спектра. Это связано с затуханием сейсмических волн. Частота основного максимума спектра меняется незначительно – от 1.51 до 2.34 Гц для NS- и от 1.03 до 3.61 Гц – для Z-компоненты. Частотные характеристики в интервале изменения мощностей рыхлых отложений от 10 до 210 м для построенных моделей (рис. 5, г; табл. 5) показывают, что

резонансная частота закономерно уменьшается с увеличением мощности рыхлых отложений от 4.83 до 0.49 Гц. В то же время наблюдается зависимость увеличения значений уровня частотной характеристики с увеличением общей мощности слоя рыхлых грунтов от 10 до 90 м. На 90 и 210 м значения сопоставимы.

Непосредственная оценка различия влияния слоев рыхлых неводонасыщенных грунтов для построенных сейсмогрунтовых моделей представлена для наглядности на рис. 6 в виде частотно зависимых функций  $U(f)$ . Они получены согласно выражению:

$$U(f) = U_i(f) / U_1(f), \quad (2)$$

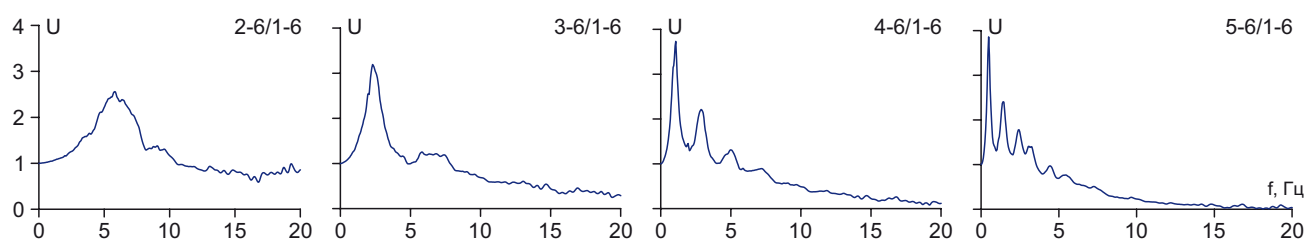
где  $U_i(f)$  – расчетные частотные характеристики для моделей 2-6 – 5-6 и  $U_1(f)$  – расчетная частотная характеристика для модели эталонных коренных пород 1-6 (см. рис. 5, а).

Частоты основных максимумов относительных частотных характеристик несколько увеличились по сравнению с резонансными частотами для рассматриваемых мощностей рыхлых отложений (от 4.83 до 0.49 Гц), но не более чем на 1 Гц (от 5.8 до 0.5 Гц), и это различие уменьшается с увеличением общей мощности рыхлых слоев. Основные максимумы относительных характеристик также сдвигаются в сторону низких частот и меняются от 2.5 до 3.8, но их вклад от общего воздействия значительный. По отношению к максимумам частотных характеристик для построенных моделей,

**Таблица 5.** Основные параметры расчетных акселерограмм для моделей 1-6 – 5-6, построенных с учетом глубинных скоростных неоднородностей

**Table 5.** Fundamental parameters of the calculation accelerograms for models 1-6 – 5-6, constructed with regard to deep-seated velocity heterogeneities

| № модели;<br>(h-слоя<br>рыхлых<br>грунтов), м | Максимальное<br>ускорение $A_{\max}$ ,<br>см/с <sup>2</sup> | Максимальное<br>значение спектра<br>$S_{\max}$ , см/с | Частота основного<br>максимума<br>спектра, Гц | Интервал<br>частот для<br>$0.7 \cdot S_{\max}(f)$ , Гц | Максимальный<br>уровень<br>частотной<br>характеристики | Резонансная<br>частота рыхлых<br>слоев, Гц |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| NS-компонента                                 |                                                             |                                                       |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| Коренные «эталонные» породы                   |                                                             |                                                       |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 1-6 (330)                                     | 110                                                         | 44.6                                                  | 1.76                                          | 1.03–2.78                                              | 2.9                                                    | 0.98                                       |
| Сверху – рыхлые неводонасыщенные породы       |                                                             |                                                       |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 2-6 (10)                                      | 151                                                         | 54.4                                                  | 1.76                                          | 1.07–5.13                                              | 3.1                                                    | 4.83                                       |
| 3-6 (30)                                      | 207                                                         | 118                                                   | 2.34                                          | 1.66–2.73                                              | 7.1                                                    | 2.34                                       |
| 4-6 (90)                                      | 186                                                         | 115                                                   | 1.07                                          | 0.93–1.27                                              | 10.2                                                   | 1.03                                       |
| 5-6 (210)                                     | 146                                                         | 70.1                                                  | 1.51                                          | 1.03–2.54                                              | 9.8                                                    | 0.49                                       |
| Z-компонента                                  |                                                             |                                                       |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| Коренные «эталонные» породы                   |                                                             |                                                       |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 1-6 (30)                                      | 25                                                          | 10.5                                                  | 2.34                                          | 0.93–2.49                                              | 2.9                                                    | 0.98                                       |
| Сверху – рыхлые неводонасыщенные породы       |                                                             |                                                       |                                               |                                                        |                                                        |                                            |
| 2-6 (10)                                      | 29                                                          | 11.9                                                  | 2.34                                          | 0.93–2.49                                              | 3.1                                                    | 4.83                                       |
| 3-6 (30)                                      | 48                                                          | 12.2                                                  | 3.61                                          | 1.03–5.66                                              | 7.1                                                    | 2.34                                       |
| 4-6 (90)                                      | 38                                                          | 28.3                                                  | 1.81                                          | 1.66–2.44                                              | 10.2                                                   | 1.03                                       |
| 5-6 (210)                                     | 42                                                          | 24.8                                                  | 1.03                                          | 0.73–1.12                                              | 9.8                                                    | 0.49                                       |



**Рис. 6.** Выявление влияния слоев рыхлых неводонасыщенных грунтов для сейсмогрунтовых моделей по отношениям частотных характеристик.

**Fig. 6.** Identifying the influence of loose unsaturated grounds for seismic ground motion models from the characteristic frequency ratio.

которые меняются от 3.1 до 10.2 (табл. 5), он может быть меньше в 1.24–2.68 раза.

Результаты проведенного анализа влияния неоднородностей грунтовых слоев верхней части земной коры на единый обоснованный исходный сигнал по данным теоретических расчетов приводят к выводу о снижении влияния неоднородностей верхней зоны разреза и увеличении влияния структурных неоднородностей на интенсивность сейсмических колебаний с уменьшением их частоты. Тем самым показана необходимость учета при районировании сейсмической опасности территорий приповерхностных и глубинных скоростных неоднородностей рыхлых отложений и коренных пород.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дан общий анализ спектрального состава произошедших сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона в 2020–2022 гг. по максимальным значениям спектров и соответствующим им частотам, в том числе и на различном уровне вероятности. Это позволило при использовании отобранных землетрясений, одновременно зарегистрированных в Иркутске и Улан-Баторе, по изложенной выше методике для грунтов первой категории впервые сформировать единый исходный сигнал с учетом вероятных очаговых зон для прогнозируемых близких и относительно далеких сильных землетрясений региона.

В соответствии с поставленными задачами для построения расчетных сейсмогрунтовых моделей использованы результаты сейсморазведочных и сейсмометрических измерений, выполненных авторами в последнее время, и данные, полученные ранее другими исследователями. Учитывались также имеющиеся обобщенные сведения об изменении скоростей сейсмических волн с глубиной для наиболее распространенных типов рыхлых неводонасыщенных грунтов до первых сотен метров и коренных пород до возможных глубин возникновения землетрясений. Построенные модели характеризуются мощностью слоев, изменением скоростей продольных и поперечных волн с глубиной, объемной массой и декрементом затухания.

В итоге при использовании сформированного исходного сигнала и построенных сейсмогрунтовых моделей выявлены особенности влияния скоростных неод-

нородностей приповерхностных и глубинных грунтовых слоев отдельно и в их сравнении, представленные авторами по основным показателям сейсмических воздействий: акселерограммам, спектрам, частотным характеристикам и их параметрам. Полученные расчетные величины сейсмических воздействий в первом приближении могут быть масштабированы для территорий, соответствующих построенным сейсмогрунтовым моделям, расположенным в пределах бассейна р. Селенги и на юго-западной части Байкальской сейсмической зоны, с исходной сейсмичностью, равной 7 и 9 баллам. Авторы также отмечают, что принятие сформированного исходного сигнала для всех 8-балльных территорий южной части Восточной Сибири и Северной Монголии является дискуссионным вопросом на данном этапе исследований, а сама методика может в дальнейшем совершенствоваться, в том числе и за счет накопления статистических данных по сильным землетрясениям региона.

#### 5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

#### 6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

#### 7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aleshin A.S., 2017. Fundamental Aspects of Seismic Microzonation. Earthquake Engineering. Constructions Safety 4, 8–17 (in Russian) [Алешин А.С. Фундаментальные аспекты сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 8–17].

Boore D.M., Thompson E.M., 2014. Path Durations for Use in the Stochastic-Method Simulation of Ground Motions. Bulletin of the Seismological Society of America 104 (5), 2541–2552. <https://doi.org/10.1785/0120140058>.

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., Semenov R.M., 2003. Fault Scarps and Prehistoric Earthquakes in the Tunka Fault (Southwestern Baikal Region). *Russian Geology and Geophysics* 44 (6), 561–574.

Construction in Seismic Areas, 2018. An Actual Revision of SNiP II-7-81\*. SP 14.13330.2018. Standartinform, Moscow, 115 p. (in Russian) [Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. СП 14.13330.2018. М.: Стандартинформ, 2018. 115 с.].

Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Batsaikhan Ts., Serebrennikov S.P., Shagun A.N., Eskin A.Yu., 2022a. Spectral Analysis of Large Earthquakes in the Baikal-Mongolia Region as Recorded at Irkutsk and Ulaanbaatar in 2020–2021. *Journal of Volcanology and Seismology* 16, 385–395. <https://doi.org/10.1134/s0742046322050049>.

Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Batsayhan Ts., Serebrennikov S.P., 2023. Predicting Dynamic Effects of Large Earthquakes in Areas of Degrading Permafrost (Baikal-Mongolia Region). *Russian Geology and Geophysics* 64 (3), 370–377. <https://doi.org/10.2113/RGG20224478>.

Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Serebrennikov S.P., Eskin A.Yu., 2022b. Evaluation of Seismic Impacts of Strong Earthquakes in Various Permafrost and Seismic Zones of the Mongolian-Siberian Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0623 (in Russian) [Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. Оценка сейсмических воздействий сильных землетрясений в различных мерзлотных и сейсмических зонах Монголо-Сибирского региона // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 3. 0623]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0623>.

Dzhurik V.I., Drennov A.F., 1991. The Influence of Deep-Seated and Near-Surface Inhomogeneities on Seismic Signal Dynamics. *Russian Geology and Geophysics* 9, 119–122 (in Russian) [Джурик В.И., Дреннов А.Ф. Влияние глубинных и приповерхностных неоднородностей на динамику сейсмических сигналов // Геология и геофизика. 1991. № 9. С. 119–122].

Dzhurik V.I., Drennov A.F., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V., Eskin A.Y., 2015a. A Study of Dynamic Parameters for Earthquakes in the Baikal Rift Zone in Order to Derive the Expected Seismic Shaking. *Journal of Volcanology and Seismology* 9, 339–348. <https://doi.org/10.1134/S0742046315050036>.

Dzhurik V.I., Klyuchevskii A.V., Serebrennikov S.P., Demianovich V.M., Batsaikhan Ts., Bayaraa G., 2009. Seismicity and Seismic Hazard Zoning of Mongolia. IEC SB RAS, Irkutsk, 420 p. (in Russian) [Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. 420 с.].

Dzhurik V.I., Tubanov Ts.A., Serebrennikov S.P., Drennov A.F., Bryzhak E.V., Eskin A.Yu., 2015b. An Overview of the Technique for Seismicity Microzonation Mapping of the Ulan-Ude City Territory. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (3), 365–386. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0186>.

Emanov A.F., Emanov A.A., Shevkunova E.V., Fateev A.V., Gladyshev E.A., Arapov V.V., Artemova A.I., Podkorytova V.G., Chechel'nitskii V.V., Radziminovich Y.B., Kobeleva E.A., 2022. The Khuvsgul Earthquake of January 12, 2021 ( $M_w=6.7$ ,  $M_L=6.9$ ) and Early Aftershocks. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 58, 59–73. <https://doi.org/10.1134/S1069351322100019>.

Field E.H., 2000. A Modified Ground-Motion Attenuation Relationship for Southern California That Accounts for Detailed Site Classification and a Basin-Depth Effect. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90 (6B), S209–S221. <https://doi.org/10.1785/0120000507>.

Gileva N.A., Kobeleva E.A., Radziminovich Ya.B., Melnikova V.I., Chechel'nitsky V.V., 2020. The September 21, 2020,  $M_w=5.5$ , Bystraya Earthquake in the Southern Baikal Region: Preliminary Results of Instrumental and Macroseismic Observations. *Problems of Engineering Seismology* 47 (4), 55–71 (in Russian) [Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В. Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ( $M_w=5.5$ ) в Южном Прибайкалье: предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 55–71]. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-4>.

Golenetskii S.I., 1997. Earthquakes in Irkutsk. *Imya, Irkutsk*, 92 p. (in Russian) [Голенецкий С.И. Землетрясения в Иркутске. Иркутск: Имя, 1997. 92 с.].

Gurevich G.I., 1974. Deformability of Media and Seismic Wave Propagation. *Nauka, Moscow*, 484 p. (in Russian) [Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 484 с.].

Jenkins G.M., Watts D.G., 1971. Spectral Analysis and Its Applications. Vol. 2. *Mir, Moscow*, 257 p. (in Russian) [Дженкинс Г.М., Ваттс Д.Г. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. Вып. 2. 287 с.].

Kalinina A.V., Ammosov S.M., Bykova V.V., Tatevossian R.E., 2017. Effect of the Uppermost Part of the Soil Profile on the Site Response. *Questions of Engineering Seismology* 44 (4), 77–92 (in Russian) [Калинина А.В., Аммосов С.М., Быкова В.В., Татевосян Р.Э. О влиянии параметров верхней части грунтового разреза на реакцию грунтов при сейсмическом воздействии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44. № 4. С. 77–92]. DOI:10.21455/VIS2017.4-5.

Khilko S.D., Kurushin R.A., Kochetkov V.M., Misharina L.A., Melnikova V.I., Gilyova N.A., Lastochkin S.V., Baljinnyam I., Monkhoo D., 1985. Earthquakes and Basis for Seismic Zoning of Mongolia. *Nauka, Moscow*, 224 p. (in Russian) [Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А., Ласточкин С.В., Балжинням И., Монхоо Д. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука, 1985. 224 с.].

Nazarov Yu.P., 2012. Computational Models of Seismic Effects. *Nauka, Moscow*, 414 p. (in Russian) [Назаров Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий. М.: Наука, 2012. 414 с.].

New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times to 1975, 1977. *Nauka, Moscow*, 536 p. (in

Russian) [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 536 с.].

Pavlenko O.P., 2009. Seismic Waves in Ground Layers: Nonlinear Ground Behavior During Large Earthquakes over Recent Years. Nauchny Mir, Moscow, 260 p. (in Russian) [Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир, 2009. 260 с.].

Pavlov O.V. (Ed.), 1988. Assessing the Influence of Ground Conditions on Seismic Hazard. Methodological Guide to Seismic Microzoning. Nauka, Moscow, 223 p. (in Russian) [Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / Ред. О.В. Павлов. М.: Наука, 1988. 223 с.].

Puzyrev N.N. (Ed.), 1981. Baikal Interior from Seismic Data. Nauka, Novosibirsk, 105 p. (in Russian) [Недра Байкала по сейсмическим данным / Ред. Н.Н. Пузырев. Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.].

Radziminovich N.A., 2022. Earthquake Depth Frequency Distribution in the Baikal Rift System. Pure and Applied Geophysics 179, 619–639. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02952-x>.

Ratnikova L.I., 1973. Methods for the Computation of Seismic Waves in Finely-Layered Media. Nauka, Moscow, 124 p. (in Russian) [Ратникова Л.И. Методы расчета сей-

смических волн в тонкослоистых средах. М.: Наука, 1973. 124 с.].

Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.].

Seismic Ground Properties, 1988. Nauka, Novosibirsk, 134 p. (in Russian) [Сейсмические свойства скальных грунтов. Новосибирск: Наука, 1988. 134 с.].

Tubarov Ts.A., Sanzhieva D.P.-D., Kobeleva E.A., Predein P.A., Tsydypova L.R., 2021. Kudarinsky Earthquake of 09.12.2020 (Mw=5.5) on Lake Baikal: Results of Instrumental and Macroscopic Observations. Problems of Engineering Seismology 48 (4), 32–47 (in Russian) [Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. (Mw=5.5) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48. № 4. С. 32–47]. DOI:10.21455/VIS2021.4-2.

Zorin Yu.A., Belichenko V.G., Turutanov E.Kh., Mordvinova V.V., Kozhevnikov V.M., Khozboyar P., Tomurtogoo O., Arviasbaatar N., Gao Sh., Devis P., 1994. Baikal-Mongolia Transect. Russian Geology and Geophysics 35 (7–8), 94–110 (in Russian) [Зорин Ю.А., Беличенко В.Г., Турутанов Е.Х., Мордвинова В.В., Кожевников В.М., Хозбойар П., Томуртогоо О., Арвиасбаатар Н., Гао Ш., Девис П. Байкало-Монгольский трансект // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7–8. С. 94–110].