



УДК 550.34

## **Методика районирования сейсмической опасности приграничных территорий Монголо-Сибирского региона (на примере района г. Эрдэнэт)**

В. И. Джурик ([dzhurik@crust.irk.ru](mailto:dzhurik@crust.irk.ru))  
С. П. Серебренников ([serebr@crust.irk.ru](mailto:serebr@crust.irk.ru))  
Ц. Батсайхан ([batsaihan523@yahoo.com](mailto:batsaihan523@yahoo.com))  
А. Ф. Дреннов ([dzhurik@crust.irk.ru](mailto:dzhurik@crust.irk.ru))  
Е. В. Брыжак ([bryzhak@crust.irk.ru](mailto:bryzhak@crust.irk.ru))  
Л. А. Усинин ([usynin@crust.irk.ru](mailto:usynin@crust.irk.ru))  
А. Ю. Ескин ([eskin@crust.irk.ru](mailto:eskin@crust.irk.ru))

**Аннотация.** Обоснованы проблемные этапы работ по районированию сейсмической опасности в приграничных сейсмоактивных районах Монголии и Сибири. Решение поставленных задач связано с изучением сейсмического режима и современного уровня исходной сейсмичности территории, выделением сейсмоактивных районов и оценкой их вероятного сейсмического потенциала, построением сейсмических моделей для наиболее типичных по грунтовым условиям участков, проведением для них теоретических расчетов основных параметров сейсмических воздействий. В методическом плане реализованные этапы исследований на примере района и территории г. Эрдэнэт могут служить основой районирования сейсмического риска городов и перспективой для освоения территорий Монголо-Сибирского региона.

**Ключевые слова:** Эрдэнэт, сейсмическая опасность, тектоника, сейсмические модели, максимальные ускорения, резонансные частоты, исходный сигнал, акселерограммы.

### **Введение**

Монголо-Сибирский регион (южные районы Сибири, западные и центральные районы Монголии) в последние 100 лет явился ареной крупнейших в мире внутриконтинентальных землетрясений [2; 4; 6]. Они напрямую свидетельствуют о его высоком сейсмическом потенциале. В то же время уровень сейсмической опасности во многом определяет природные условия региона, а, следовательно, и темпы его развития. Окружающая среда, ее уникальные объекты, перспективы развития, безопасность населения и крупных сооружений гражданского и промышленного назначения непосредственно зависят от сейсмичности территории [12; 13]. В этом смысле большое значение приобретает изучение уровня сейсмичности, который в регионе исключительно высок. Отмеченная задача становится

особенно актуальной в настоящее время, когда в планы освоения включаются крупные мероприятия, затрагивающие интересы не только России и Монголии, но и мирового сообщества. Это в первую очередь проблемы экологической безопасности Байкала, во многом зависящей от ситуации в Селенгинском бассейне. К сказанному необходимо добавить и круг проблем, связанных с освоением крупнейших месторождений региона: строительством линейных сооружений, гидротехническим освоением реки Селенги и, как следствие, урбанизацией Селенгинского бассейна с быстро развивающимися городами и населенными пунктами (Улан-Батор, Эрдэнэт, Дархан, Кяхта, Гусиноозерск, Улан-Удэ, Селенгинск и др.). Изучение закономерностей современных геодинамических процессов, и в первую очередь сейсмического, составляют одну из основных задач совместных исследований Института земной коры СО РАН и Исследовательского центра по астрономии и геофизике АНМ. Большое значение уделяется изучению сейсмической опасности территории Селенгинского бассейна и обширных площадей Орхон-Селенгинского и Джидино-Селенгинского междуречий. Именно здесь предполагается сконцентрировать работы на ближайшие годы. Полученные результаты будут являться основой единого методического подхода к районированию сейсмического риска конкретных районов Монголо-Сибирского региона, требующих определенных уточнений их сейсмической опасности. В статье представлены результаты таких исследований для трех уровней оценки сейсмической опасности: ОСР (общее сейсмическое районирование), ДСР (детальное сейсмическое районирование), СМР (сейсмическое микрорайонирование) – на примере территории и района г. Эрдэнэт, который напрямую подвержен воздействиям сильных землетрясений, возникающих как в северо-восточной Монголии, так и в юго-западной части байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

### **Тектоника и сейсмический режим района г. Эрдэнэт**

Одним из проблемных этапов работ по оценке сейсмической опасности любой исследуемой территории является уточнение его исходной сейсмичности. Для общего представления уровня сейсмической активности представлена карта эпицентров землетрясений (рис. 1), на которой показаны сейсмические события, зарегистрированные за инструментальный период наблюдений (60 лет). На карте отчетливо выделяются высокоактивные сейсмические зоны, расположенные на юго-западе и на востоке от города. Наиболее крупные зарегистрированные в этих зонах сейсмические события (энергетический класс  $K < 16$ ) удалены от территории города на расстояние до 100 км на юго-запад и до 200 км на северо-восток. Они подтверждают высокий уровень сейсмической активности исследуемой территории, сейсмические сотрясения от этих землетрясений в пределах города возможно достигали 6–7 баллов [13].

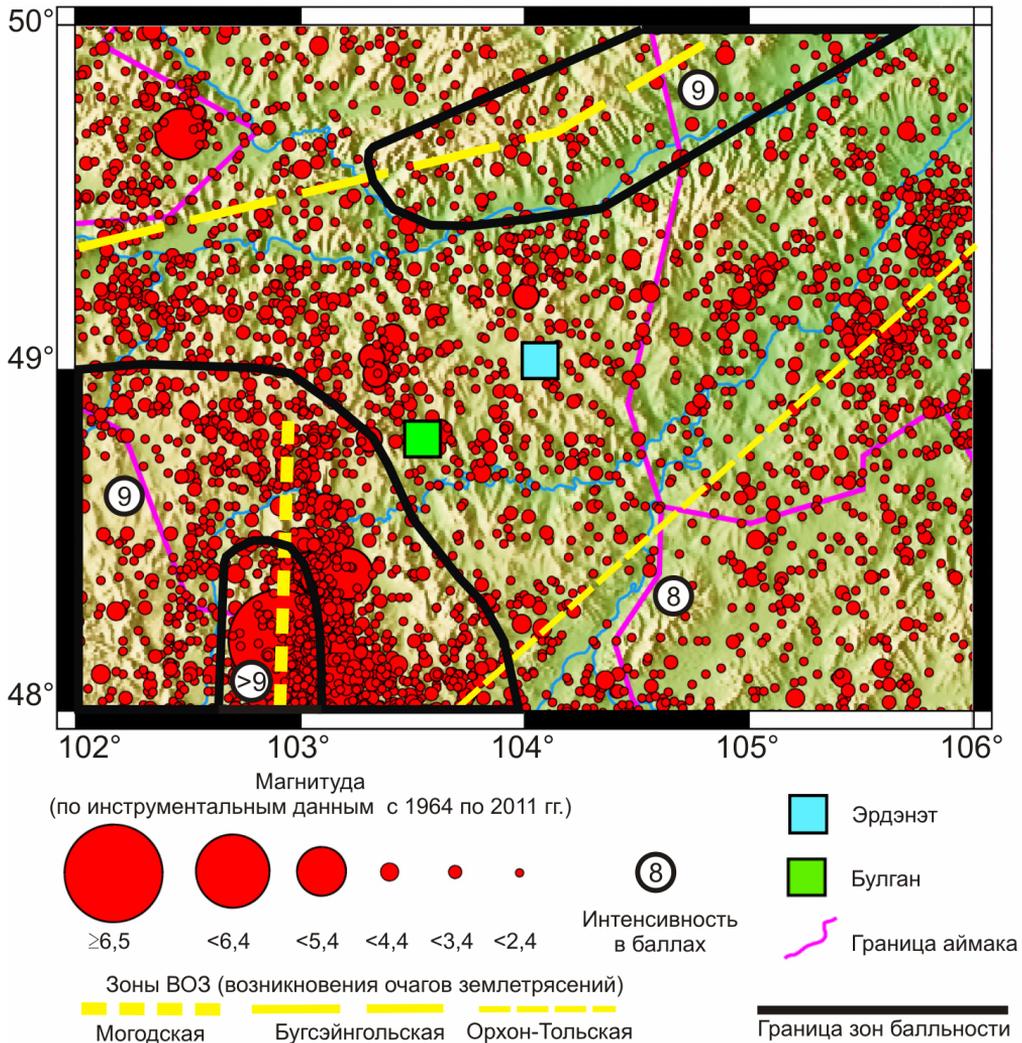


Рис. 1. Сейсмотектоника и сейсмичность района г. Эрдэнэт

В основу сейсмического районирования территории входит выделение различных сейсмогенных зон и обоснование их потенциальной сейсмической опасности. С учетом исследований, проведенных ранее [2; 6; 8], нами представлены три типа неотектонических структур с магнитудой  $M > 7,0$ : Орхон-Тольская система тектонических нарушений, Могодский и Болнайский разломы.

Орхон-Тольская система тектонических нарушений объединяет Орхонский и Тольский разрывы с взбросо-сдвиговым генетическим типом протяженностью от 70 до 100 км. Структуры отчетливо документируются геолого-геофизическими методами. Могодский разлом является составной частью Тулэтской тектонической системы, он документируется всеми методами выявления. При Могодском землетрясении возникла непрерывная

система сейсмогенных разрывов протяженностью до 45 км, отчетливо выраженная в рельефе [6]. Болнайский разлом в пределах исследуемой площади представлен восточным фрагментом крупной одноименной субширотной системой тектонических нарушений протяженностью 600 км. Тектоническая активность в прошлом и в настоящее время подтверждается геолого-геофизическими и сейсмологическими методами. Тектонические нарушения более низкого уровня отмечаются вблизи г. Эрдэнэт, они контролируют региональные морфоструктурные элементы и выражены в рельефе.

Изучение сейсмической опасности северной части территории Монголии позволило выделить линейные зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) (см. рис. 1). Могодская зона ВОЗ является доминирующей на исследуемой площади. Наличие большого количества мелких и средних по энергетическому уровню землетрясений, зарегистрированных в инструментальный период (см. рис. 1), и одного из сильнейших землетрясений в современной истории Монголии (Могодское, 1967 г.,  $M = 7,8$ ) предопределили высокий сейсмический потенциал этой зоны. Могодская сейсмическая зона в основном и определяет общий уровень исходной сейсмичности района г. Эрдэнэт. Отметим также, что в 2002 г. авторами статьи при исследовании геофизическими методами Могодского разлома была найдена палеосейсмодислокация (ее возраст уточняется), расположенная на расстоянии 70 м параллельно Могодской сейсмодислокации.

На севере от района г. Эрдэнэт расположены Бугэйнгольская, Кижинская и Чикойская зоны ВОЗ. Данные зоны являются восточным фрагментом субширотной области с высоким уровнем сейсмичности. В состав области, помимо фрагментов представленных зон ВОЗ, входят Дзуннурская и Болнайская зоны с наиболее высоким сейсмическим потенциалом. Бугэйнгольская зона представлена на исследуемой площади своим западным менее активным участком (см. рис. 1), восточный фланг сейсмически более активный. Присутствие двух сильных землетрясений и палеосейсмодислокации (Бугэйнгольская –  $M = 7,2$ ) определяют для данной зоны магнитуду возможных землетрясений в 7,5. С юго-востока исследуемую площадь ограничивает Орхон-Тольская зона ВОЗ (см. рис. 1). В пределах зоны регистрируются эпицентры землетрясений с 12-го энергетического класса. Магнитуда возможных землетрясений достигает значения 6,0–6,5.

Характеристику сейсмического режима района г. Эрдэнэт мы представляем на примере графика повторяемости землетрясений для Орхон-Тольского участка северной Монголии. Ранее [6] было построено 3 графика (рис. 2, обозначение А), графики 1 и 2 построены с учетом Могодского землетрясения в интервале 1964–1968 гг. График 2 построен по материалам сейсмических событий с 9-го по 16-й энергетический класс, 3 – по слабым землетрясениям ( $K = 9–13$ ). Как видно из рисунка, уровни графиков и их угловые коэффициенты практически совпадают. График 1 построен по данным сейсмических наблюдений более позднего периода. Здесь уровень графика и угловой коэффициент близки к средним значениям для всей территории Монголии. Среднегодовая скорость (плотность)  $V_M$  потока сейс-

мических событий разных магнитуд ( $M_s$ ) для Алтай-Саяно-Байкальского региона, куда полностью входит Орхон-Тольский район [7], показывает (см. рис. 2, обозначение Б), что на этой территории возможны 10 землетрясений в год с  $M = 4,5$  (6–7 баллов), 1 землетрясение в год с  $M = 5,5$  (8 баллов), 1 землетрясение с  $M = 7$  (9–10 баллов) в 10 лет и с  $M = 8$  (10–11 баллов) один раз в 100 лет.

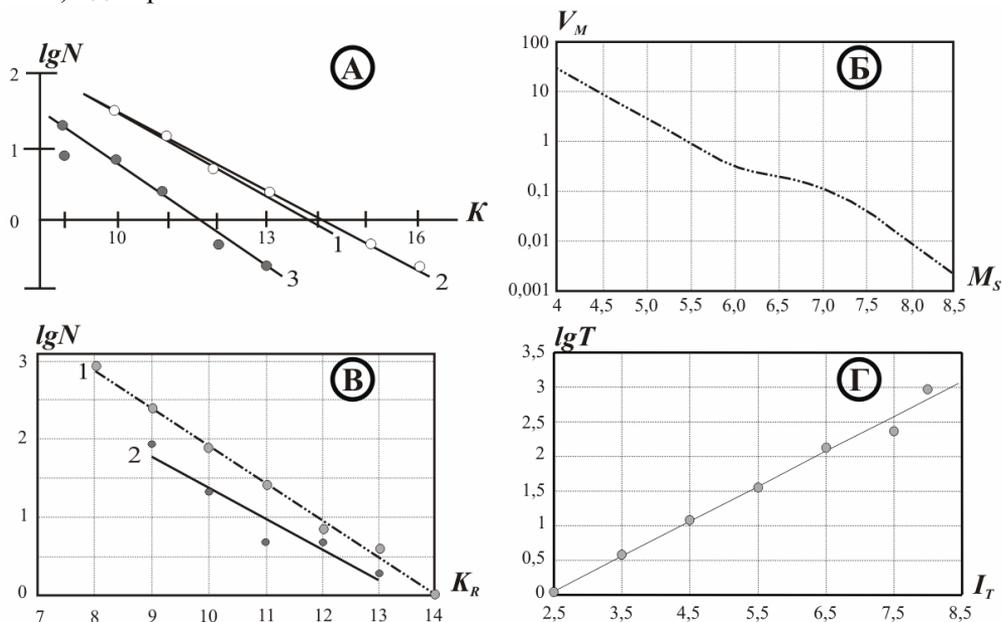


Рис. 2. Сейсмический режим района и территории г. Эрдэнэт

А – Графики повторяемости землетрясений для Орхон-Тольского района: 1 ( $K = 9–13$ ) и 2 ( $K = 9–16$ ) – использованы все землетрясения за 1964–1968 гг., с учетом афтершоков Могодского землетрясения 1967 г.; 3 – график построен для периода 1969–1978 г. Б – Среднегодовая скорость (плотность)  $V_M$  потока сейсмических событий разных магнитуд  $M_s$  для Алтай-Саяно-Байкальского региона [7]. В – графики повторяемости: 1 – график повторяемости землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 8$  за период с 1968 по 2002 гг., 2 – график повторяемости землетрясений с  $K_R \geq 8$  за период с 1978 по 2002 гг. Г – график сейсмического режима территории г. Эрдэнэт

Анализ числа произошедших землетрясений, зарегистрированных инструментально за период с 1968 по 2002 г, также говорит о высокой сейсмической активности исследуемого района. За этот период в радиусе 120 км от г. Эрдэнэт произошло 855 землетрясений 8-го энергетического класса, а с 9 по 14 – около 350 землетрясений, из них четыре 7-балльных и одно 8-балльное (табл. 1). Сила землетрясений  $I_0$  дана с учетом глубины очагов землетрясений в интервале 10–20 км по зависимости, приведенной в работе [6].

Таблица 1

## Число сейсмических событий

Энергетический класс (K)	За период			Сила землетрясений $I_0$ (баллы)	Магнитуда (M)	$I_0$ (баллы), принятая для расчетов
	1068–2002 гг.	1978–2002 гг.	1982–2002 гг.			
8	855	393	324	2–3,2	2,2	–
9	245	103	91	2,9–4,1	2,8	–
10	78	25	22	3,65–4,85	3,3	–
11	26	7	5	4,55–5,75	3,9	V
12	7	5	5	5,3–6,7	4,4	VI
13	4	3	2	6,2–7,4	5,0	VII
14	1			7,1–8,3	5,6	VIII

Графики повторяемости за этот же период (см. рис. 2, обозначение В) достаточно уверенно аппроксимируются линейной зависимостью с угловыми коэффициентами 0,48 и 0,4. На наклон первого графика (см. рис. 2, обозначение В) наибольшее влияние оказывают афтершоки Могодского землетрясения. На второй это влияние несколько снижено, но уменьшилось число данных для статистической обработки (увеличился разброс точек).

Для дальнейшего уточнения сейсмического режима района г. Эрдэнэт необходимо использовать модели очагов землетрясений, обоснованные геолого-геофизическими и сейсмотектоническими исследованиями в районе строительства [7]. Для г. Эрдэнэт такая возможность существует при нахождении для его территории уравнения сейсмического режима. Для этого, используя данные табл. 1, определяются промежутки времени (периоды повторяемости)  $T_i$ , соответствующие сейсмическим событиям  $I_i$  и далее, по найденным парам чисел ( $I_i, T_i$ ) строится график и определяются эмпирические коэффициенты уравнения сейсмического режима [9] (см. рис. 2, обозначение Г):

$$I_T = 2,42 + 1,96 \cdot \lg T, \quad (1)$$

где  $T$  – средний промежуток времени, измеряемый в годах, между землетрясениями силой  $I$  в месте строительства.

По зависимости (1) находится уточненная сила землетрясения  $I$ , соответствующая заданному промежутку времени  $T = 500, 1000$  или  $5000$  лет между толчками различной силы. Вероятность  $P$  превышения интенсивности  $I_T$  в течение  $t$  лет (т. е. произойдет хотя бы одно такое событие) определяется по известной формуле, изложенной в [7]:

$$P = 1 - e^{-t/T}. \quad (2)$$

Согласно карте сейсмического районирования [6] исходная сейсмичность г. Эрдэнэт оценивается в 8 баллов с индексом 2. Это подтверждает и выполненный нами статистический анализ сейсмичности района г. Эрдэнэт (1). В результате площадь города будет подвержена сотрясению 8-балльной интенсивности как минимум один раз в 1000 лет. Далее мы мо-

жем определить по формуле (2) вероятность  $P$  превышения расчетной интенсивности  $I_T$  при  $T = 1000$  лет в течение  $t = 50$  лет (т. е. произойдет хотя бы одно такое событие) [8]. Получаем, что вероятность  $P$  превышения расчетной интенсивности будет оцениваться в 5 %, это соответствует допустимому риску в размере 95 % вероятности непревышения также в течение 50 лет.

Отмеченный путь обоснования расчетной интенсивности ожидаемого землетрясения за определенный период времени для г. Эрдэнэт в свете уже собранных статистических данных является вполне реальным. Однако полученные данные подлежат уточнению при изучении сейсмического режима на более длительном интервале времени или путем математического моделирования прогнозной сейсмичности.

### **Оценка параметров сейсмических воздействий сильных землетрясений территории г. Эрдэнэт**

При проведении сейсмического районирования территории города в заданном масштабе необходимы сведения о количественной оценке параметров движений грунта на случай сильных землетрясений [3]. Для их получения необходимы формирование исходных сигналов с учетом зон ВОЗ и параметров очага [1, 10], построение необходимого числа сейсмических моделей и проведение теоретических расчетов. Исходные данные для решения поставленных задач были получены путем сейсмогеологических исследований и инструментальных измерений методами малоглубинной геофизики [4]. На территории города выполнялись электроразведочные, сейморазведочные и сейсмометрические измерения, а также обобщены полученные ранее данные о скоростях сейсмических волн [4; 13].

В пределах города и промышленного района присутствуют относительно прочные интрузивные и вулканогенные образования. Общее площадное распространение инженерно-геологических комплексов подчинено основным особенностям рельефа (элювиальные и делювиальные образования). Проллювиальные и аллювиальные отложения приурочены в основном к участкам относительно древних и современных водотоков или основной гидросети района. Грунтовые воды связаны с четвертичными отложениями. Глубина их залегания в пределах низкой поймы 0–2 м, высокой – 2–6 м, первой террасы р. Эрдэнтийн-Гол – 4–10 м и на пологих склонах – до 30 и более метров.

Результаты измерений скоростей распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) сейсмических волн обобщаются следующим образом. Наименьшие значения характерны для слоя сезонного промерзания, они лежат в пределах от 300 до 400 м/с –  $V_p$  и 120–200 м/с –  $V_s$ . Рыхлые воздушно-сухие грунты объединены в одну группу без учета их состава, скорости  $V_p$  в них меняются от 500 до 1200 м/с, а  $V_s$  – от 200 до 620 м/с. Мощность слоя рыхлых грунтов может меняться от 5–10 до 30 и более метров. Наибольшее число измерений приходится на интервалы скоростей  $V_p$  – 600–700 м/с и 1000–1100 м/с. Первый из них соответствует рыхлым отложениям с преобладанием в них относительно мелкой фракции, а второй можно отнести к крупнообломочным и разрушенным коренным породам.

Согласно существующим нормативным документам [10; 15], грунты, соответствующие первому распределению, если их мощность составляет не менее 10 м, относятся к средним по сейсмическим свойствам (II категория), и их сейсмическая опасность будет соответствовать исходной.

Скорости продольных волн в водонасыщенных разновидностях рыхлых грунтов могут увеличиваться в 3–5 раз по сравнению с воздушно-сухими. Значения скоростей  $V_p$  лежат в интервале от 1500 до 2300 м/с, а  $V_s$  – от 300 до 800 м/с. Обводненные рыхлые грунты в большинстве случаев относятся к III категории по сейсмическим свойствам и по отношению к средним их сейсмическая опасность может увеличиться на один балл [14; 15].

Для района г. Эрдэнэт, согласно полученным ранее данным [4; 12; 14], в зависимости от степени разрушения скальных пород скорости  $P$ -волн в них изменяются от 700 м/с в рухляках до 2000 м/с – в сильно разрушенных породах и 2000–4000 м/с – в слабо разрушенных породах. По нашим данным, диапазон изменения скоростей  $V_p$  в скальных породах меняется от 1200 до 3600 м/с. Отношение скоростей  $V_p/V_s$  в коренных относительно сохранных породах 1,6–1,9. По сейсмическим свойствам – это грунты I категории. Они принимаются в качестве «эталонных», и сейсмическая опасность пород, отвечающих этим параметрам, оценивается, согласно нормативным документам [15], на один балл меньше исходной.

Для районирования сейсмической опасности территории города мы использовали подход, основанный на построении сейсмических моделей для площадок с типичными грунтовыми и строительными условиями [3]. Построение таких моделей основывалось на инженерно-геологических данных, материалах бурения и результатах сейсморазведочных измерений, выполненных на этих участках и на участках расположения скважин. Для всей исследуемой территории было составлено около 40 моделей, из них мы представляем 16, как наиболее контрастных и охватывающих весь диапазон изменения сейсмических свойств грунтов районированной территории. То есть исключены промежуточные модели, но при построении карты весь их набор использовался полностью, в особенности в переходных по сейсмической опасности зонах. Состав и состояние грунтов для представительных моделей, мощности слоев ( $h$ ), скорости продольных ( $V_p$ ) и поперечных волн ( $V_s$ ), объемная масса грунтов ( $\rho$ ), сейсмическая опасность в баллах ( $I$ ) и максимальные ускорения ( $A_{max}$ ) сведены в табл. 2.

Отмечается, что каждая построенная модель характеризует определенный участок города, и поэтому если он однородный в скоростном отношении, можно ограничиться построением одной или нескольких моделей. Если территория не однородна по площади и глубине, число моделей может быть неограниченно большим. Если изучаемую территорию представить несколькими однородными площадками, то минимальное количество моделей будет соответствовать числу таких площадок. В общем случае число моделей для изучаемой территории определяется погрешностью построения модели, масштабом карты и допустимой погрешностью неоднородности в масштабе строительства [4].

Таблица 2

Параметры вероятных сейсмических моделей, объединенных по степени их сейсмической опасности

№ модели	Состав и состояние грунтов	$h$ (м)	$V_p$ (м/с)	$V_s$ (м/с)	$\rho$ (т/м <sup>3</sup> )	$I$ (баллы) $A_{max}$ , (см/с <sup>2</sup> )
7-балльная зона (с поверхности разрушенные и трещиноватые коренные породы)						
1 Модель эталона	<b>Сильно трещиноватые коренные породы эффузивы, гранитоиды</b> <b>Относительно-сохранные коренные породы</b>	10	2400	1300	2,5	7
		$\infty$	3000	1600	2,6	106
2	Разрушенные и трещиноватые коренные породы Сильно трещиноватые коренные породы Относительно-сохранные коренные породы	3	1200	620	2,1	7
		10	2400	1300	2,5	127
		$\infty$	3000	1600	2,6	
3	Разрушенные и трещиноватые коренные породы Сильно трещиноватые коренные породы Относительно-сохранные коренные породы	5	1400	740	2,2	7
		10	2400	1300	2,5	126
		$\infty$	3000	1600	2,6	
4	Разрушенные и трещиноватые коренные породы Сильно трещиноватые коренные породы Относительно-сохранные коренные породы	10	1600	840	2,3	7
		10	2400	1300	2,5	120
		$\infty$	3000	1600	2,6	
8-балльная зона (рыхлые неводонасыщенные грунты)						
5	Рыхлые ( $h = 6$ м)	6	600	300	1,8	8
		10	2400	1300	2,5	218
		$\infty$	3000	1600	2,6	
6	«Средние грунты» ( $h = 10$ м)	10	720	360	1,9	8
		10	2400	1300	2,5	231
		$\infty$	3000	1600	2,6	
7	Рыхлые ( $h = 15$ м)	15	780	390	1,9	8
		10	2400	1300	2,5	254
		$\infty$	3000	1600	2,6	
8	Рыхлые ( $h = 30$ м)	30	840	420	2,0	8
		10	2400	1300	2,5	269
		$\infty$	3000	1600	2,6	
9	Рыхлые ( $h = 60$ м)	60	900	450	2,0	8
		10	2400	1300	2,5	249
		$\infty$	3000	1600	2,6	
10	Рыхлые ( $h = 120$ м)	120	960	480	2,1	8
		10	2400	1300	2,5	201
		$\infty$	3000	1600	2,6	

Окончание табл. 2

№ модели	Состав и состояние грунтов	$h$ (м)	$V_p$ (м/с)	$V_s$ (м/с)	$\rho$ (т/м <sup>3</sup> )	$I$ (баллы) $A_{max}$ , (см/с <sup>2</sup> )
9-балльная зона (рыхлые водонасыщенные грунты)						
11	Рыхлые УГВ с 5м	5	720	360	1,9	8 269
		5	1600	380	2,0	
		10	2400	1300	2,5	
		$\infty$	3000	1600	2,6	
12	Рыхлые УГВ с 3м	3	720	360	1,8	9 351
		7	1600	380	2,0	
		10	2400	1300	2,5	
		$\infty$	3000	1600	2,6	
13	«Средние грунты» по со- ставу, обводненные ( $h = 10$ м)	<b>10</b>	<b>1700</b>	<b>420</b>	<b>2,0</b>	<b>9</b> <b>452</b>
		<b>10</b>	<b>2400</b>	<b>1300</b>	<b>2,5</b>	
		$\infty$	<b>3000</b>	<b>1600</b>	<b>2,6</b>	
14	Рыхлые обводненные ( $h = 20$ м)	10	1700	420	2,0	9 503
		10	1800	500	2,1	
		10	2400	1300	2,5	
		$\infty$	3000	1600	2,6	
15	Рыхлые обводненные ( $h = 40$ м)	10	1700	420	2,0	9 537
		10	1800	500	2,1	
		20	1900	600	2,2	
		10	2400	1300	2,5	
16	Рыхлые обводненные ( $h = 80$ м)	3000	1600	2,6	9 532	
		20	1700	420		2,0
		20	1800	500		2,1
		40	1900	600		2,2
		10	2400	1300		2,5
$\infty$	3000	1600	2,6			

Модели № 1 и № 6 (см. табл. 2) соответствуют эталонным скальным и средним грунтам, они обоснованы анализом сейсмических свойств «средних» и коренных «эталонных» пород. Модели № 2–4 представляют территории строительства с неглубоким залеганием коренных пород или с их различной степенью трещиноватости. Модели № 5 и № 7–10 соответствуют различной мощности неводонасыщенных рыхлых грунтов, которая увеличивается от 6 до 120 м. Подстилаются они коренными породами с «эталонными» значениями скоростей.

Для участков с различной глубиной залегания грунтовых вод представлено шесть моделей (см. табл. 2). В первых трех моделях (№ 11–13) глубина залегания УГВ составляет 5, 3 и 0 м соответственно. Модель № 13 полностью соответствует модели № 6 по составу и мощности рыхлых грунтов, но состояние этих моделей различное: № 6 – воздушно-сухое, а № 13 – водонасыщенное. Модели № 14–16 построены для полностью водонасыщенных толщ рыхлых отложений долины реки, пересекающей районизируемую территорию, мощность рыхлых отложений от 20 до 80 м.

Для построенных моделей, характеризующих определенные участки города, проведен расчет сейсмической опасности в баллах с учетом грунтовых условий и глубины залегания УГВ по методике, изложенной в работах [4; 9; 12]. В итоге расчеты показывают, что относительно «эталонных» коренных пород приращение балльности за счет грунтовых условий меняются от 0,96 до 2,3 баллов. В случае принятия исходной сейсмичности для территории города, равной 8 баллам (для средних грунтов), сейсмическая опасность участков, представленных грунтовыми моделями, будет меняться от 7,96 до 9,3 баллов (в табл. 2 они усреднены до целых баллов).

Одной из характеристик интенсивности в практике сейсмостойкого строительства является ускорение грунта, и оно выражается в значениях так называемого эффективного или пикового ускорения. Это расчетное максимальное ускорение для определенных участков города, представленных в нашем случае сейсмическими моделями (см. табл. 2). Эта величина рассчитывается для определенной вероятности, тем самым учитывается неопределенность, с которой ожидается разрушительное землетрясение для изучаемой территории.

При расчетах использовался набор методов [14] и программ [5; 11]. Для их реализации, кроме построенных моделей (см. табл. 2), необходимо задание исходного сигнала. Синтез исходного сигнала нами выполнен с учетом сейсмологических данных о параметрах сильных землетрясений из выделенных зон ВОЗ (см. рис. 1). Они имеют следующие интервалы: эпицентральное расстояние 0–100 км, магнитуда 6,0–7,9, интенсивность в баллах 8, глубина очагов 10–20 км, механизм очагов – сдвиг и взбросо-сдвиг. С учетом параметров вероятных сильных землетрясений и диапазонов их изменений для изучаемой территории, нами была синтезирована исходная акселерограмма для максимальной горизонтальной ( $EW$ ) компоненты по методике, изложенной ранее [3; 4]. Кратко она сводится к следующему: из каталога мировых данных были отобраны первичные акселерограммы для максимальных горизонтальных компонент, отвечающие указанным выше параметрам местных сильных землетрясений. Далее делается нормировка выбранных акселерограмм по максимальному значению и производится разделение их амплитудных и фазовых спектров с помощью прямого преобразования Фурье. Затем вычисляются осредненные амплитудный и фазовый спектры. После этого с помощью обратного преобразования Фурье и при использовании осредненного фазового спектра местных землетрясений производится синтез исходного сейсмического сигнала. В нормированном виде он представлен в виде акселерограммы (рис. 3, обозначение А) и ее амплитудного спектра (см. рис. 3, обозначение Б). Для дальнейшего использования сформированного сигнала необходимо его масштабирование на эталонные сейсмические воздействия, соответствующие установленной исходной сейсмичности, равной 7 баллам. В нашем случае это сигнал, падающий на нижний слой коренных пород, представленный моделью эталона (см. табл. 2, модель № 1).

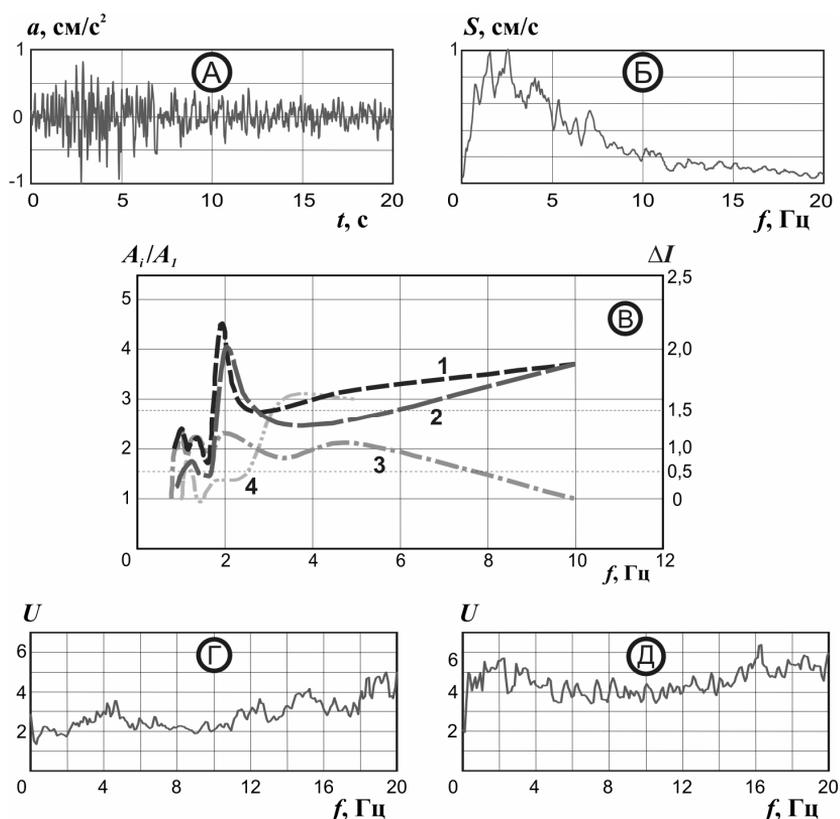


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные характеристики сейсмических сигналов

А – нормированная акселерограмма исходного сигнала; Б – нормированный спектр исходного сигнала; В – частотные характеристики по данным записей землетрясений (1 и 2 – для водонасыщенных грунтов мощностью 30 и 40 м, 3 и 4 – для неводонасыщенных слоев рыхлых отложений мощностью 10 и 20 м); Г – обобщенная частотная характеристика по данным микросейсм для неводонасыщенных рыхлых отложений; Д – обобщенная частотная характеристика по данным микросейсм для водонасыщенных рыхлых отложений.

Его основные параметры следующие: максимальное ускорение  $58 \text{ см/с}^2$ , максимальное значение спектра  $10 \text{ см/с}$ , интервал частот спектра на уровне 0,7 от максимума меняется от 1 до 5 Гц, длительность колебаний на уровне 0,3 от максимума составляет 20 с. В итоге площадки строительства районируемой территории, представленные моделью эталона (см. табл. 2, модель № 1), будут характеризоваться сейсмическими воздействиями, равными  $106 \text{ см/с}^2 - \text{NS}$  и  $40 \text{ см/с}^2 - \text{Z}$  (табл. 3 и 4, модель № 1). Это согласно шкале балльности соответствует эталонному сейсмическому воздействию для скальных пород района, равному 7 баллам. Спектр ускорений (рис. 4, обозначение Б для модели № 1) имеет максимум (на уровне 0,5) в интервале частот 1–5,5 Гц. Основные максимумы приходятся на частоты 1,5 и 2,5 Гц, и спектральные плотности на них достигают значения  $21 \text{ см/с}$ .

Таблица 3

Параметры расчетных акселерограмм и спектров  
для моделей 1–16 (компонента NS)

№ модели	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)	Резонансная частота рыхлых слоев $F$ , (Гц)	Максимальное увеличение на резонансной частоте, $U$
7-балльная зона						
<b>1</b>	<b>106</b>	<b>20,6; 20,8</b>	<b>1,5; 2,5</b>	<b>0,6–4,4</b>	<b>&gt;20</b>	<b>2,1</b>
2	127	23,5; 23,7	1,5; 2,5	0,6–4,4	>20	2,2
3	126	23,5; 23,7	1,5; 2,5	0,6–4,4	>20	2,2
4	120	23,5; 23,7	1,5; 2,5	0,6–4,4	>20	2,4
8-балльная зона						
5	218	37,2; 38,4	1,5; 2,5	0,8–5,3	12,5	3,2
<b>6</b>	<b>231</b>	<b>38; 39,8</b>	<b>1,5; 2,5</b>	<b>0,7–7,2</b>	<b>9,4</b>	<b>3,5</b>
7	254	37,7; 42,6	1,5; 2,5	1,1–7,2	6,7	3,7
8	269	57,3	2,5	1,4–4,4	3,5	3,8
9	249	63,5	1,5	1,2–2,6	1,9	3,8
10	201	63,5	1,5	1,2–2,6	1	3,7
9-балльная зона						
11	269	48,6; 50,8	1,5; 2,5	0,7–5,3	9	2,8
12	351	63,8; 66,4	1,5; 2,5	0,7–5,3	8,5	2,7
<b>13</b>	<b>452</b>	<b>83; 86</b>	<b>1,5; 2,5</b>	<b>0,7–5,3</b>	<b>9,5</b>	<b>2,6</b>
14	503	86; 94	1,5; 2,5	1,2–5,4	6	3
15	537	110	2,5	1,3–4,6	3,8	3,1
16	532	126; 117	1,5; 2,5	1,2–2,7	2	3,3

Прим. жирным шрифтом отмечены модели «эталона».

Далее необходимо отметить, что теоретически методика расчета сейсмических воздействий для грунтовых моделей различного состояния и, в частности, для частично или полностью водонасыщенных рыхлых грунтов на данном этапе исследований недостаточно разработана. Выход из этого положения – совместное использование теоретических расчетов и экспериментальных данных. Но накопление последних по записям сильных землетрясений для конкретного района практически не реально из-за их низкой повторяемости. Поэтому мы для этой цели использовали экспериментальные частотные характеристики слоев рыхлых грунтов различного состояния и мощности, полученные при регистрации слабых землетрясений и микросейсм.

На основе данных записей землетрясений, полученных при ранее проведенных исследованиях [14], показано, что наибольшее увеличение интенсивности колебаний исходного сигнала (близкое к 4) приходится на частоты 1,5–2,5 Гц, и они характерны для водонасыщенных грунтов мощностью до 30–40 м (см. рис. 3, обозначение В, графики 1 и 2). Неводонасыщенные слои рыхлых отложений мощностью от 10 до 20 м в этом же диапазоне частот увеличивают интенсивность исходного сигнала в пределах от 1,5 до 2,5 (см. рис. 3, обозначение В, графики 3 и 4).

Таблица 4

Параметры расчетных акселерограмм и спектров  
для моделей 1–16 (компонента Z)

№ модели	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)	Резонансная частота рыхлых слоев $F$ , (Гц)	Максимальное увеличение на резонансной частоте, $U$
7-балльная зона						
<b>1</b>	<b>40</b>	<b>7,7</b>	<b>1,5; 2,5</b>	<b>0,6–4,4</b>	<b>&gt;20</b>	<b>2,1</b>
2	48	8,8	1,5; 2,5	0,6–4,4	>20	2,2
3	48	8,8	1,5; 2,5	0,6–4,4	>20	2,2
4	49	8,8	1,5; 2,5	0,6–4,4	>20	2,4
8-балльная зона						
5	76	13,6; 13,8	1,5; 2,5	0,8–4,4	12,5	3,2
<b>6</b>	<b>80</b>	<b>13,6; 13,9</b>	<b>1,5; 2,5</b>	<b>0,8–4,7</b>	<b>9,4</b>	<b>3,5</b>
7	94	13,7; 14,2	1,5; 2,5	0,8–7,2	6,7	3,7
8	141	27,1	7	5,3–7,4	3,5	3,8
9	112	34,4	3,9	2,5–4,4	1,9	3,8
10	93	35,9	2	1,4–2,4	1	3,7
9-балльная зона						
11	96	17,6; 17,7	1,5; 2,5	0,6–4,4	9	2,8
12	123	23	1,5; 2,5	0,6–4,4	8,5	2,7
<b>13</b>	<b>156</b>	<b>30,2</b>	<b>1,5; 2,5</b>	<b>0,6–4,4</b>	<b>9,5</b>	<b>2,6</b>
14	154	30	1,5; 2,5	0,6–4,2	6	3
15	159	29,4; 27,3	1,5; 2,5	0,6–2,8	3,8	3,1
16	147	25	1,5; 2,5	0,6–7,2	2	3,3

Прим. жирным шрифтом отмечены модели «эталона».

По данным микросейсм [10] получены амплитудно-частотные характеристики в 50 пунктах, расположенных в различных грунтовых условиях территории города. Как и для землетрясений, они представлены в обобщенном виде по огибающей максимальных значений всего набора кривых для средних по сейсмическим свойствам грунтовых условий. Это неводонасыщенная толща рыхлых отложений до 20 м (см. рис. 3, обозначение Г), и водонасыщенная – для этих же разновидностей грунтов (см. рис. 3 обозначение Д). Здесь также подтверждается отмеченная выше закономерность (в пределах 0–10 Гц), что на относительно низких частотах от 1 до 5 Гц интенсивность колебаний для средних грунтов увеличивается в 1,6–3,5 раза и для водонасыщенных – в 3,6–5,7 раза.

Использование экспериментальных частотных характеристик в какой-то степени носит методический характер и в дальнейшем будет уточняться. Уточнение связано с накоплением таких данных для различных по составу водонасыщенных слоев грунта при воздействии относительно сильных землетрясений, энергетический класс ( $K$ ) которых больше 10. Нами использовался набор данных, полученных для относительно слабых ( $K < 10$ ) и далеких землетрясений с  $K > 10$ , когда вся энергия колебаний практически уходит на упругие деформации.

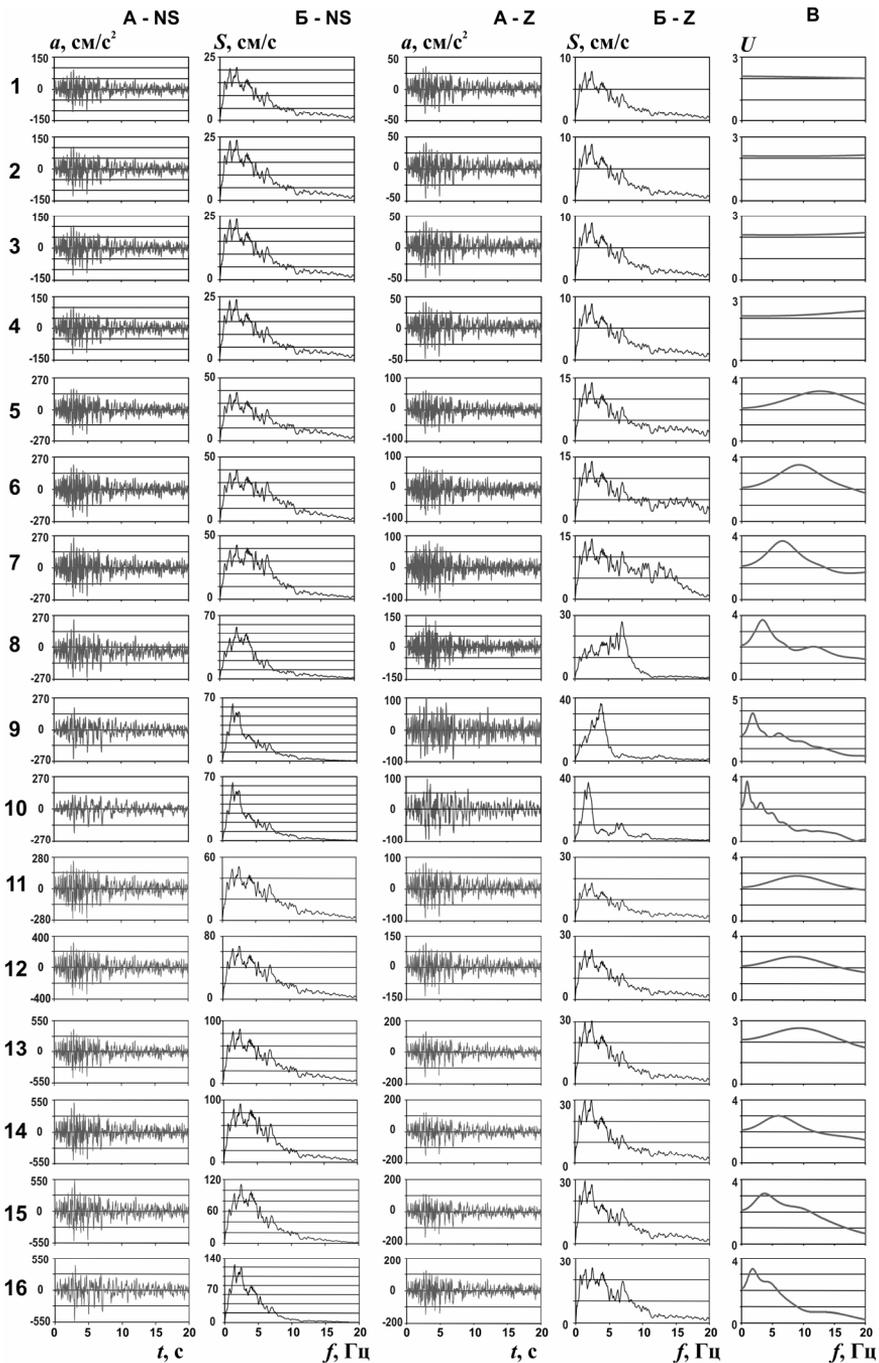


Рис. 4. Акселерограммы (А), их спектры (Б) и частотные характеристики (В), рассчитанные для горизонтальных (NS) и вертикальных (Z) компонент для моделей 1–16 (номера соответствуют табл. 2, 3 и 4)

Расчеты спектров акселерограмм исследуемых грунтов ( $S_{sp}$ ) проведен при использовании соотношения:

$$S_{sp} = S_{ск} \cdot U_1, \quad (3)$$

где  $S_{ск}$  – спектр исходной акселерограммы на подошве слоя рыхлого грунта, и  $U_1$  – экспериментальная частотная характеристика этого же слоя грунта с естественной степенью водонасыщения.

Далее, используя обратное преобразование Фурье, получаем акселерограмму на поверхности исследуемого грунта.

Таким образом, нами сформированы сейсмические модели и синтезирована акселерограмма для коренных «эталонных» пород, отвечающая уровню исходной сейсмичности района г. Эрдэнэт. Далее реализуется расчет указанных выше параметров для участков, представляемых сформированными сейсмическими моделями (см. табл. 2). Получены следующие результаты. Ускорение на поверхности коренных пород для участков, соответствующих построенной модели «эталона» (табл. 3 и 4, модель № 1; см. рис. 4, обозначение 1), увеличивается для горизонтальной (см. табл. 3, модель № 1) и вертикальной (см. табл. 4, модель № 1) составляющих сейсмических колебаний по сравнению с исходным примерно в два раза. При малом изменении акустической жесткости в верхнем слое это связано с учетом двойного отражения и величиной угла выхода сейсмической радиации. Угол подхода сейсмического луча на границе полупространства рассчитан для г. Эрдэнэт с учетом зон ВОЗ. Он равен  $25 \pm 5^\circ$  от вертикали.

Для модели эталона, представленной средними грунтами (см. табл. 3 и 4, модель № 6; рис. 4, обозначение 6), максимальное ускорение может достигать  $231 \text{ см/с}^2$  – NS и  $80 \text{ см/с}^2$  – Z, что соответствует 8-балльному воздействию, соответствующему исходной сейсмичности района. Для дальнейших расчетов использовалась исходная акселерограмма, синтезированная для скальных грунтов, как менее искаженная приповерхностными неоднородностями. Поэтому для реализации расчетов сейсмические модели были построены до монолитных коренных пород, принятых нами за эталон.

Необходимо отметить, что расчетные параметры эталонных сейсмических воздействий являются в какой-то степени масштабированными [1] на 7-балльные сейсмические воздействия скального основания и 8-балльные для средних грунтов. В то же время они получены путем представленного выше анализа реальных землетрясений, соответствующих параметрам основных зон ВОЗ для района г. Эрдэнэт, и будут отвечать по своим параметрам вероятным сильным землетрясениям для территории города по максимальным ускорениям и частотному составу. Кроме того, масштабирование контролировалось результатами расчетов по экспериментальным данным (см. рис. 3) и по уравнению (3). Это позволило расчетным и экспериментальным путем более реально оценить изменение частотного и амплитудного состава эталонных сейсмических колебаний верхними грунтовыми слоями, представленными вероятными сейсмогрунтовыми моделями (см. табл. 2). Последние в параметрах сейсмической

опасности (баллы) оцениваются следующим образом. Для территорий, представляемых моделями 1–4 (грунты первой категории по сейсмическим свойствам [15]), сейсмическая опасность оценивается в 7 баллов; для территорий, представленных моделями 5–10 – в 8 баллов и для моделей 11–16 – в 9 баллов.

Не менее важной характеристикой сейсмических воздействий является изменение интенсивности сейсмических колебаний слоем рыхлых грунтов в зависимости от частоты исходного сигнала для построенных моделей [11]. Наглядно это представляют частотные характеристики, показанные на рис. 4 (обозначение В). С увеличением мощности рыхлых отложений частота основного максимума уменьшается. Так, для 10-метрового слоя средних грунтов она равна 9,4 Гц (модель 6), а для 60-метрового слоя рыхлых неводонасыщенных грунтов она составляет 1,9 Гц (см. рис. 4, обозначение В, модель 9). Максимальные увеличения исходного сигнала на этих резонансных частотах, показанные на рисунке 4 и сведенные в табл. 3 и 4, являются относительными только для каждого состояния грунтов. Но они соответствуют их увеличению по отношению к моделям 1, 6 и 13, представляющим эталонные грунты различного состояния. Например, для воздушно-сухих грунтов исходный сигнал от эталонного (модель 1) может увеличиваться в 2,1–3,8 раза на частотах от 1 до 20 Гц (см. табл. 3 и 4).

Для водонасыщенных грунтов (мощность рыхлых отложений в пределах 10 м) изменения основных параметров частотной характеристики для трех моделей незначительны, и они приходятся на относительно высокие частоты 8–10 Гц (см. рис. 4; табл. 3 и 4, модели 11–13). В то же время использование экспериментальных частотных характеристик (в сочетании с расчетными) повышает степень оценки резонансных частот слоя рыхлых отложений [3], в том числе и с учетом их обводненности в самой верхней зоне разреза. Резонансная частота для моделей, представляющих водонасыщенные грунты для территории города, в зависимости от их мощности может меняться от 2 до 9,5 Гц.

Увеличение интенсивности колебаний для построенных моделей на резонансных частотах сказывается на изменении уровня спектра исходного сигнала на этих же частотах (см. рис. 4). В совокупности увеличения ускорений сейсмических колебаний обязаны изменению мощности и акустической жесткости грунтовых слоев, затуханию сейсмических волн, углу подхода сейсмической радиации и неоднородностям среды на пути исходных сейсмических колебаний.

Возможность использования изучаемых параметров для районирования территории мы показываем на примере двух типичных геолого-геофизических разрезов (рис. 5). Разрезы представляют участки пологих склонов (см. рис. 5, обозначение 1) и участки, расположенные в пределах поймы и надпойменной террасы (см. рис. 5, обозначение 2). Разрезы с повышенной неоднородностью по скоростям сейсмических волн и строению характеризуются соответственно и большим числом моделей. Основные расчетные параметры сейсмических воздействий вынесены на разрезы.

Они показывают, что на участках пологих склонов (см. рис. 5, обозначение 1) сейсмическая опасность в основном определяется мощностью рыхлых отложений и величинами скоростей сейсмических волн и может различаться на один балл (на рисунках расчетные значения приращений усреднены до 1 балла). При близком залегании уровня грунтовых вод (см. рис. 5, обозначение 2) различия могут достигать двух баллов, а сейсмическая опасность участков – 7; 8 или 9 баллов. Величины пиковых ускорений при этом меняются от 106 до 440  $\text{см}/\text{с}^2$ , а преобладающих частот – от 1,9 до 20 Гц.

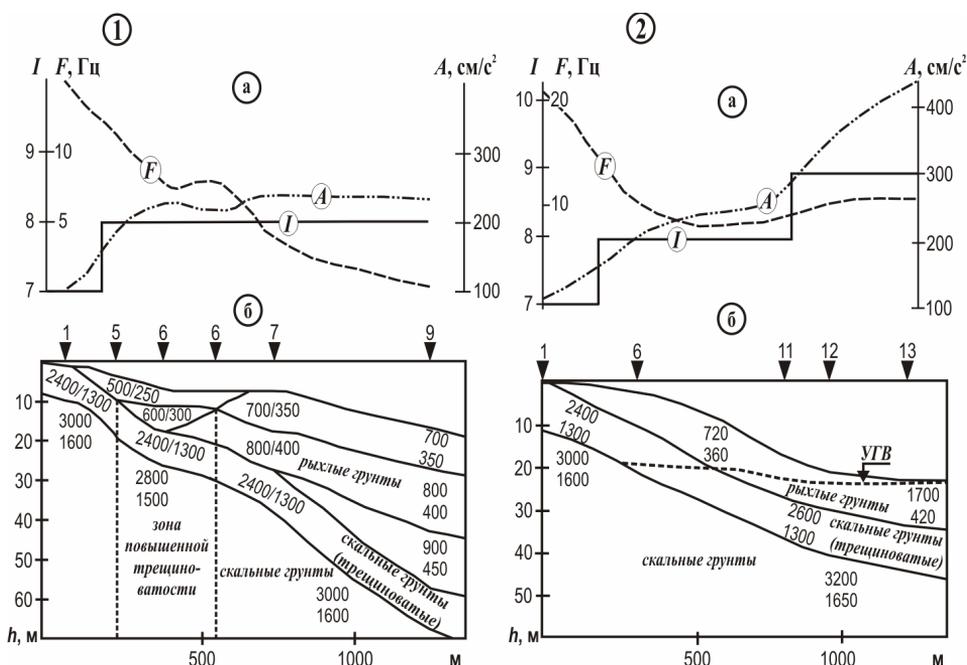


Рис. 5. Изменение параметров сейсмических воздействий на участках типовых сейсмогрунтовых разрезов на пологом склоне (1) и в пределах поймы и первой террасы р. Эрдэнтийн-Гол (2)

а – преобладающие частоты ( $F$ , Гц), максимальные ускорения ( $A$ ,  $\text{см}/\text{с}^2$ ) и сейсмическая опасность в баллах ( $I$ ); б – типовой скоростной разрез: сверху (в числителе) скорости продольных волн в м/с, снизу (в знаменателе) – поперечных волн. Цифры над треугольниками – номера моделей и грунтовых условий согласно табл. 2 и рис. 4; УГВ – глубина залегания уровня грунтовых вод

Таким образом, нами получены все необходимые сведения для районирования территории города. Дополнительно использовалась топооснова в масштабе 1:25 000 и данные по инженерно-геологическому и гидрогеологическому районированию [5], также в указанном масштабе. Сама методика построения карты кратко изложена ниже.

### **Методика построения карты сейсмического микрорайонирования и краткая характеристика выделенных зон**

При построении карты (рис. 6) нами реализуется методика сейсмического микрорайонирования территории г. Эрдэнэт по сейсмогрунтовым моделям. Выбранный подход позволяет получить полный набор необходимых параметров сейсмических воздействий для строительства сейсмостойких зданий и сооружений. При таком подходе обоснована и вероятность сейсмических воздействий согласно принятому уровню исходной сейсмичности. Основные этапы данной методики районирования территории города сводятся к следующему.

1. Комплексный анализ исходных геолого-геофизических и сейсмологических материалов, обоснование зон вероятных очагов землетрясений (ВОЗ), уточнение границ исходной сейсмической опасности при использовании данных о зонах ВОЗ. Определение основных параметров вероятных сильных землетрясений, соответствующих исходной сейсмичности.

2. Изучение сейсмических свойств наиболее распространенных грунтов основания линейного сооружения с учетом их состава и состояния. Обоснование выбора параметров эталонных скальных грунтов. Проведение районирования сейсмической опасности по данным измерения скоростей сейсмических волн, выполненных на преобладающих по составу и состоянию грунтов и на представительных участках.

3. Обобщение и анализ данных регистрации близких землетрясений. Синтез исходных сигналов для «эталонных» коренных пород, соответствующих по интенсивности исходной сейсмичности исследуемых районов. Построение достаточного набора вероятных сейсмических моделей, расчет основных параметров сейсмических воздействий и районирование по ним территории города.

Нами на основе реализации предложенной методики для районирования территории представлены основные параметры сейсмических воздействий и основные сейсмические характеристики. Часть из них – скорости сейсмических волн, акселерограммы, спектры ускорений, частотные характеристики и их параметры получены непосредственно для основных разновидностей грунтов в различном их состоянии. Другие параметры, в том числе и сейсмическая опасность в баллах, определялись путем проведения необходимых расчетов. Само районирование проведено по сейсмогрунтовым моделям, каждая из которых описывается набором указанных выше параметров. Такой подход нами показан на примере типовых разрезов.

Основой для построения сейсмогрунтовых моделей служили инженерно-геологические данные, типовые разрезы, сведения о мощности рыхлых отложений и глубине залегания уровня грунтовых вод, полученных по данным бурения и малоглубинной геофизики. В итоге территория города вполне обоснованно была разделена на участки с сейсмической опасностью 7, 8 и 9 баллов. Характеристика сейсмической опасности этих зон была дополнена теоретическими расчетами.

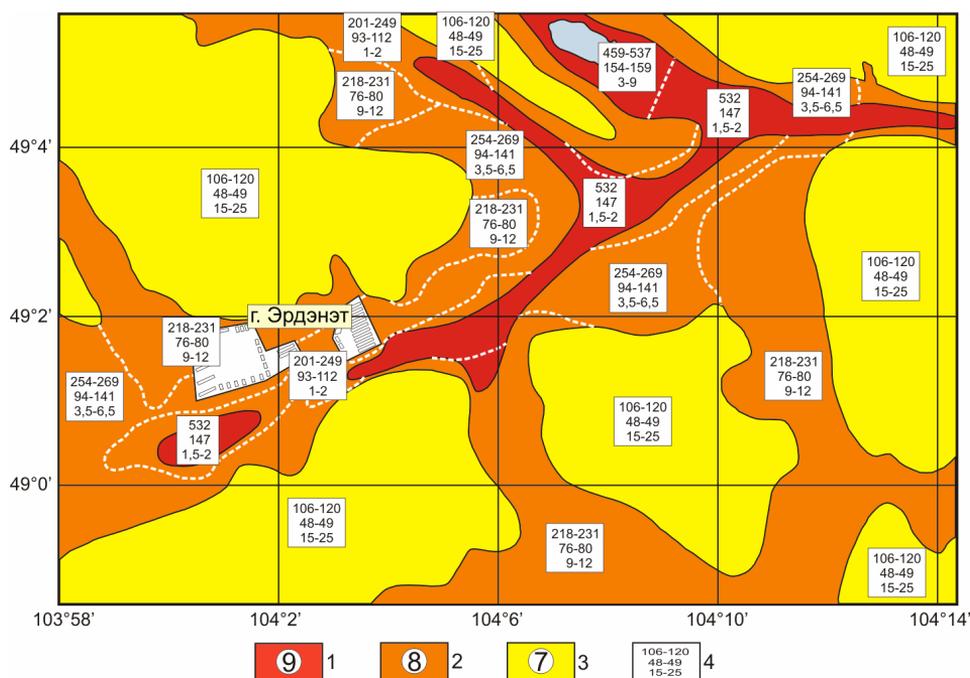


Рис. 6. Карта сейсмического микрорайонирования территории и района г. Эрдэнэт.

1 – 9-балльная зона; 2 – 8-балльная; 3 – 7-балльная зона; 4 – сверху вниз: значения максимальных ускорений для горизонтальной компоненты (NS), значения максимальных ускорений для вертикальной компоненты (Z) и резонансные частоты рыхлого слоя

Мы полагаем, что выбранный нами подход для целей сейсмического микрорайонирования г. Эрдэнэт через построение сейсмогрунтовых моделей и районирование по ним территории города представляют собой оптимальный вариант инженерно-сейсмологической оценки исследуемой территории.

**7-балльная зона** – это территория, которая представляет собой поверхности водоразделов и их достаточно крутых склонов. Мощность четвертичных отложений обычно менее 3 м, поэтому степень устойчивости территории к сейсмическим воздействиям определяется мощностью, прочностными и сейсмическими свойствами элювиальной зоны пород. Ниже идут достаточно крепкие, слаботрешиноватые магматические «эталонные» коренные породы. В пределы 7-балльной зоны попадают небольшие плоские водоразделы, седловины и относительно пологие склоны. Диапазон изменения максимальных ускорений для горизонтальной компоненты может меняться для этой территории от 106 до 120  $\text{см}/\text{с}^2$ , вертикальной – от 40 до 50  $\text{см}/\text{с}^2$ , преобладающая частота верхнего ослабленного слоя от 15 до 25 Гц. Но усиление колебаний этим слоем незначительное.

**8-балльная зона.** Она включает участки, где расположен г. Эрдэнэт (зона гражданской застройки). Это поверхности первой (7–8 м) и второй (15–20 м) надпойменных террас р. Эрдэнтийн-Гол, которые сформировались в отложениях древнего пролювия, поэтому общая мощность четвертичных отложений здесь может достигать 20 м и более. В верхней части разреза преобладают песчаные разновидности грунтов, в нижней – глинистые. Следует отметить развитие на склонах суффозионно-эрозионных форм (рытвины, промоины, небольшие овраги), связанных с лёссовидными отложениями современного делювиального комплекса. Небольшая площадь в пределах 8-балльной зоны приходится на участки, представляющие собой древние долины, заполненные отложениями пролювия преимущественно глинистого состава, который перекрыт маломощным (до 1,5 м) современным делювием (это суглинки и супеси с включениями дресвы и щебня) или техногенными образованиями. Общая мощность четвертичных отложений 5–15 м (в редких случаях до 20 м). Грунтовые воды до глубины 20 м не вскрыты.

Охарактеризованная по типовым сейсмогрунтовым моделям выделенная 8-балльная зона занимает основную часть районированной территории и застроена в большей степени. В то же время эта территория является перспективной для расширения территории города и промышленного района, поэтому она нами детализирована и разбита на три зоны, что, на наш взгляд, может учитываться при планировании строительства на этой территории.

Изменения максимальных ускорений для горизонтальной компоненты в 8-балльной зоне может меняться от 201 до 269 см/с<sup>2</sup>, вертикальной от 76 до 112 см/с<sup>2</sup>, преобладающая или резонансная частота верхнего рыхлого слоя – от 1 до 12 Гц. В общем разделение самой зоны на три участка обязательно изменению резонансной частоты, которая для трех зон имеет значения 9–12; 3,5–6,5 и 1–2 Гц соответственно. Диапазон изменения остальных параметров сейсмических воздействий незначительный и их значения могут перекрываться.

**9-балльная зона.** В геоморфологическом отношении эта территория представляет собой озерное расширение долины р. Эрдэнтийн-Гол, переуглубление которой связано с тектоническими подвижками блокового характера в период эпиплатформенной активизации на рубеже плиоцена и эоплейстоцена. Здесь отмечается максимальная (по сравнению с другими зонами) мощность четвертичных отложений (40–70 м). Грунтовая толща имеет сложное строение: содержит 3–5 этажей, представленных различными геолого-генетическими комплексами разнообразного литологического состава. Обводненность толщи разнородна: грунтовые воды вскрываются на глубине от 0 до 4 м; в элювиальной зоне гранодиоритов фиксируются трещинные воды на глубине от 20 до 50 м. Перечисленные особенности увеличивают «чувствительность» территории к сейсмическим воздействиям. Лёссовидные грунты на этом участке отсутствуют. Из числа природно-техногенных геологических процессов отмечаются заболоченность и небольшие обрушения берегов в уступах высокой поймы.

Максимальные ускорения для горизонтальной компоненты в 9-балльной зоне меняются от 459 до 537 см/с<sup>2</sup>, вертикальной – от 147 до 159 см/с<sup>2</sup>, преобладающая или резонансная частота верхнего рыхлого слоя – от 1,5 до 9 Гц. Эта зона также разделена на два участка по изменению резонансной частоты, которая имеет значения 6–9 и 1,5–3 Гц, соответственно.

Таким образом, районы современного гражданского и промышленного освоения г. Эрдэнэт (см. рис. 6) находятся в 8-балльной и 9-балльной сейсмических зонах; карьер по добыче медно-молибденовых руд расположен в 7-балльной зоне. Территории перспективной застройки можно планировать в пределах 7- и 8-балльной зон.

Мы полагаем, что выбранный нами подход к проведению сейсмического микрорайонирования района и территории г. Эрдэнэт через построение сейсмогрунтовых моделей и районирование по ним территории города, при использовании результатов типизации геологической среды, реализованной по новой разработанной методике, представляет собой оптимальный вариант инженерно-сейсмологической оценки исследуемой территории.

Использованная нами методика построения карты наиболее экономична для сейсмически активных районов Монголии и Сибири и позволяет с большей степенью надежности районировать перспективные для освоения территории по вероятным максимальным сейсмическим воздействиям. Отмечается, что расчеты сейсмических ускорений выполнены в предположении упругого деформирования на случай сильных землетрясений.

Дальнейшее районирование территории г. Эрдэнэт при укрупнении масштаба строительства по набору параметров сейсмических воздействий, оцененных по вероятным сейсмическим моделям, при его достаточной инженерно-геологической и гидрогеологической изученности не будет представлять затруднений. В случае необходимости (исследования под конкретные объекты) или при выявлении участков с более сложными строительными условиями число моделей может быть увеличено с учетом обеспечения точности их построения в соответствии с изменением масштаба строительства. Такой подход к районированию при детализации исходных данных может быть использован и для построения крупномасштабных электронных карт сейсмического риска (максимальных ускорений) территорий интенсивного освоения Монголо-Сибирского региона.

## **Заключение**

Проблемы районирования сейсмической опасности урбанизированных территорий Монголо-Сибирского региона выявлены на примере быстро развивающегося в последние годы промышленного центра Монголии г. Эрдэнэт. Сейсмическое районирование его территории начато с выделения различных сейсмогенных зон и обоснования их потенциальной сейсмической опасности. Нео- и сейсмотектонические исследования прошлых лет позволили выделить на исследуемой площади геодинамические типы неотектонических структур и соответствующие им сейсмогенные зоны. В результате анализа указаны пределы, в которых могут меняться параметры

сильных землетрясений из выделенных зон ВОЗ. Территория города расположена в 8-балльном сейсмическом районе. Повторяемость 8-балльных землетрясений для территории города – один раз в 1000 лет.

Дан анализ сейсмических свойств грунтов территории города, построены вероятные сейсмические модели. Синтезирована акселерограмма, соответствующая исходной сейсмичности г. Эрдэнэт. На этой основе проведен расчет акселерограмм, максимальных ускорений колебаний грунтов, преобладающих периодов колебаний на случай сильного землетрясения, резонансных частот рыхлой толщи и сейсмической опасности в баллах. По этим характеристикам, найденным для 16 наиболее типичных сейсмических моделей, которые охватывают основной диапазон грунтовых условий территории города, и дополнительных 24 моделей, проведено районирование его сейсмической опасности.

Выявлены основные проблемы, связанные с районированием сейсмического риска для территорий Монголо-Сибирского региона. Они заключаются в необходимости уточнения сейсмического режима на более длительном интервале времени, в накоплении экспериментальных данных о поведении грунтов различного состава и состояния в пределах Монголо-Сибирского региона при сейсмических воздействиях различной интенсивности и частотного состава, в необходимости исследования «региональной сейсмичности» – для построения обоснованных моделей сейсмической опасности исследуемых территорий, в изучении сейсмических свойств наиболее распространенных типов грунтов по составу и состоянию (для составления расчетных сейсмических моделей одно-, двух- или трехмерных).

В то же время отмечается, что выполненные исследования носят методический характер, однако существующие и строящиеся сооружения на территории г. Эрдэнэт могут испытать расчетные максимальные ускорения в соответствии с учетом исходной сейсмичности – это 5%-ный риск вероятности превышения (или 95%-ной вероятности непревышения) расчетной интенсивности в течение 50 лет. Реализованные этапы исследований, могут служить основой районирования сейсмического риска (пиковых или максимальных ускорений) перспективных для освоения приграничных территорий Монголии и Сибири.

#### Список литературы

1. Антикаев Ф. Ф. Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных записей / Ф. Ф. Антикаев, О. О. Эртелева // Физика Земли. – 2002. – № 7. – С. 39–45.
2. Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона. – Новосибирск : Наука, 1995. – 185 с.
3. К районированию сейсмической опасности территории г. Иркутска / В. И. Джурик [и др.] // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2011. – Т. 4, № 2. – С. 61–82.
4. Джурик В. И. Сейсмическое микрорайонирование Аймачных центров Монголии / В. И. Джурик, Т. Дугармаа, В. А. Потапов. – Улаанбаатар : АНМ, 1998. – 248 с.

5. Сейсмическое районирование территории г. Эрдэнэт в масштабе 1:25 000 / В. И. Джурик [и др.] // Материалы VIII Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2010. – С. 94–99.
6. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. – М. : Наука, 1985. – 224 с.
7. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. – М. : МНИТ РФ, ОИФЗ им. О. Ю. Шмидта, 1999. – 57 с.
8. Литосфера Центральной Азии. – Новосибирск : Наука, 1996. – 238 с.
9. Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений МДС 22–1.2004. – М. : ФГУП ЦПП, 2004. – 48 с.
10. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. – М. : Наука, 1988. – 224 с.
11. Ратникова Л. И. Расчет колебаний на свободной поверхности во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта / Л. И. Ратникова // Сейсмическое микрорайонирование. – М. : Наука, 1984. – С. 116–121.
12. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / под ред. В. П. Солоненко. – Новосибирск : Наука, 1977. – 303 с.
13. Сейсмическое районирование в Северной Монголии. – М. : Наука, 1980. – 179 с.
14. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2009. – 420 с.
15. СНиП-11–7–81\*. Строительство в сейсмических районах / Госстрой России. – М. : ГУП ЦПП, 2000. – 44 с.

## Methods for Seismic Hazard Zoning of Mongolian-Siberian Region Border Territories (on an Example of Erdenet City Area)

V. I. Dzhurik, S. P. Serebrennikov, Ts. Batsaihan, A. F. Drennov,  
E. V. Bryzhak, L. A. Usynin, A. Yu. Eskin

**Annotation.** The paper substantiates the problem stages of seismic hazard zoning in border seismically active areas of Mongolia and Siberia. Solving these problems is attributed to the study of the seismic regime and the modern original seismicity rate of the territory, identification of seismically active areas and the probable seismic potential assessment, determination of seismic models for areas with typical ground conditions, theoretical calculations of essential seismic actions parameters. Methodically the stages of the study for Erdenet city can be the basis for seismic hazard zoning of cities and perspective territories of Mongolian-Siberian region.

**Key words:** Erdenet, seismic hazard, tectonics, seismic models, maximal accelerations, resonance frequency, original signal, accelerograms.

*Джурик Василий Ионович*  
доктор геолого-минералогических наук  
главный научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42–75–10

*Dzhurik Vasily Ionovich*  
Doctor of Geology and Mineralogy,  
Chief Research Scientist  
Institute of the Earth's crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 42–75–10

- |  |  |
|--|--|
| <i>Серебрянников Сергей Петрович</i><br>кандидат геолого-минералогических наук<br>старший научный сотрудник<br>Институт земной коры СО РАН<br>664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128<br>тел.: (3952) 42–58–60 | <i>Serebrennikov Sergei Petrovich</i><br>Ph. D in Geology and Mineralogy<br>Senior Research Scientist<br>Institute of the Earth's Crust SB RAS<br>128, Lermontov st., Irkutsk, 664033<br>tel.: (3952) 42–58–60 |
| <i>Батсайхан Церенпил</i><br>кандидат геолого-минералогических наук<br>Исследовательский центр<br>по астрономии и геофизике МАН<br>тел.: 976-(11)-458849   | <i>Batsaihan Tserenpil</i><br>Ph. D in Geology and Mineralogy<br>Research Center of Astronomy<br>and Geophysics MAS<br>tel.: 976-(11)-458849   |
| <i>Дреннов Александр Федорович</i><br>кандидат геолого-минералогических наук<br>старший научный сотрудник<br>Институт земной коры СО РАН<br>664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128<br>тел.: (3952) 42–58–60   | <i>Drennov Alexander Fedorovich</i><br>Ph. D in Geology and Mineralogy<br>Senior Research Scientist<br>Institute of the Earth's crust SB RAS<br>128, Lermontov st., Irkutsk, 664033<br>tel.: (3952) 42–58–60   |
| <i>Брызжак Евгений Вадимович</i><br>аспирант<br>Институт земной коры СО РАН<br>664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128<br>тел.: (3952) 42–58–60  | <i>Bryzhak Evgeny Vadimovich</i><br>postgraduate student<br>Institute of the Earth's crust SB RAS<br>128, Lermontov st., Irkutsk, 664033<br>tel.: (3952) 42–58–60  |
| <i>Усыннин Леонид Андреевич</i><br>младший научный сотрудник<br>Институт земной коры СО РАН<br>664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128<br>тел.: (3952) 42–58–60  | <i>Usynin Leonid Andreevich</i><br>Junior Research Scientist<br>Institute of the Earth's Crust SB RAS<br>128, Lermontov st., Irkutsk, 664033<br>tel.: (3952) 42–58–60  |
| <i>Ескин Александр Юрьевич</i><br>кандидат геолого-минералогических наук<br>главный специалист<br>Институт земной коры СО РАН<br>664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128<br>тел.: (3952) 42–58–60              | <i>Eskin Alexander Yuryevich</i><br>Ph. D in Geology and Mineralogy<br>Chief Specialist<br>Institute of the Earth's crust SB RAS<br>128, Lermontov st., Irkutsk, 664033<br>tel.: (3952) 42–58–60               |