



Серия «Науки о Земле»  
2011. Т. 4, № 2. С. 61–81

Онлайн-доступ к журналу:  
<http://isu.ru/izvestia>

---

---

ИЗВЕСТИЯ  
Иркутского  
государственного  
университета

---

---

УДК 550. 348

## К районированию сейсмической опасности территории г. Иркутска

В. И. Джурик ([dzhurik@crust.irk.ru](mailto:dzhurik@crust.irk.ru))  
С. П. Серебренников ([serebr@crust.irk.ru](mailto:serebr@crust.irk.ru))  
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. Усынин ([usynin@crust.irk.ru](mailto:usynin@crust.irk.ru))  
А. Н. Шагун ([shagun@crust.irk.ru](mailto:shagun@crust.irk.ru))  
А. Ю. Ескин ([eskin@crust.irk.ru](mailto:eskin@crust.irk.ru))

**Аннотация.** Для территории г. Иркутска дается краткий анализ имеющихся сейсмогеологических данных и параметров вероятных сильных землетрясений. Предлагаются методические подходы к формированию сигнала, соответствующего исходной сейсмичности района. При этом используются записи местных относительно сильных сейсмических событий (энергетический класс  $K > 13$ ). Полученные указанным способом исходные акселерограммы, несмотря на ряд ограничений при их формировании, являются наиболее обоснованными для территории города. Они позволили на данном этапе исследований использовать их для расчетов необходимых параметров сейсмических воздействий для различных грунтовых условий территории города.

**Ключевые слова:** Иркутск, сейсмическое микрорайонирование, исходный сигнал, максимальные ускорения, резонансные частоты, сейсмическая опасность, акселерограммы, частотные характеристики.

### Введение

Районирование сейсмической опасности территории г. Иркутска является комплексной задачей, которая включает проведение сейсмических, сейсмо-тектонических, инженерно-геологических и инженерно-сейсмологических исследований. Это основные направления, каждое из которых обобщает необходимость решения большого количества частных задач [9]. В нашем случае конечным результатом исследований является карта сейсмической опасности или сейсмического риска в параметрах сейсмических воздействий. Карта должна оценивать вероятность превышения или превышения заданного уровня сейсмического воздействия на конкретных участках строительства и в данный промежуток времени. В дальнейшем она может трансформироваться в карту вероятностных оценок социально-экономических и других потерь, связанных с прогнозируемыми воздействиями. В последнем случае сейсмический риск склады-

вается из техногенного риска, зависящего от сейсмостойкости зданий и сооружений, и социального, зависящего от подготовки людей к возможному сильному землетрясению. Таким образом, уровень потерь при будущем землетрясении является результатом различных подходов к оценкам между сейсмическим риском и сейсмической опасностью. Сейсмическую опасность мы не можем уменьшить, полная защита от повреждений нереальна, но многое можно сделать для снижения риска и, следовательно, уменьшения потерь. Наши исследования нацелены на решение первой задачи – районирования сейсмической опасности территории г. Иркутска в масштабе планирования строительства на вероятностной основе.

Первая схема сейсмического районирования города была составлена в 1965 г. на основе инженерно-геологических исследований [15]. Сейсмическое микрорайонирование территории города в десяти тысячном масштабе было проведено в 1976 г., основывалось на исходной сейсмичности, установленной нормативными документами (СНиП II-A. 12–69\* (1977)). Исходная сейсмичность оценивалась в 8 баллов. Далее исследования по вопросам количественной оценки сейсмической опасности территории г. Иркутска привели к тому, что согласно СНиП II-7–81 (1982) она стала соответствовать 8 баллам с индексом 2. Это свидетельствует о том, что площадь города будет подвержена сотрясению 8 баллов один раз в 1000 лет. В настоящее время в соответствии с утвержденной картой общего сейсмического районирования ОСР-97 [5] и СНиП II-7–81\* (2001) территория города характеризуется сейсмической интенсивностью 8 и 9 баллов для двух уровней сейсмической опасности – 10 % (карта А), 5 % (карта В) возможного превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет – соответственно (рис. 1).

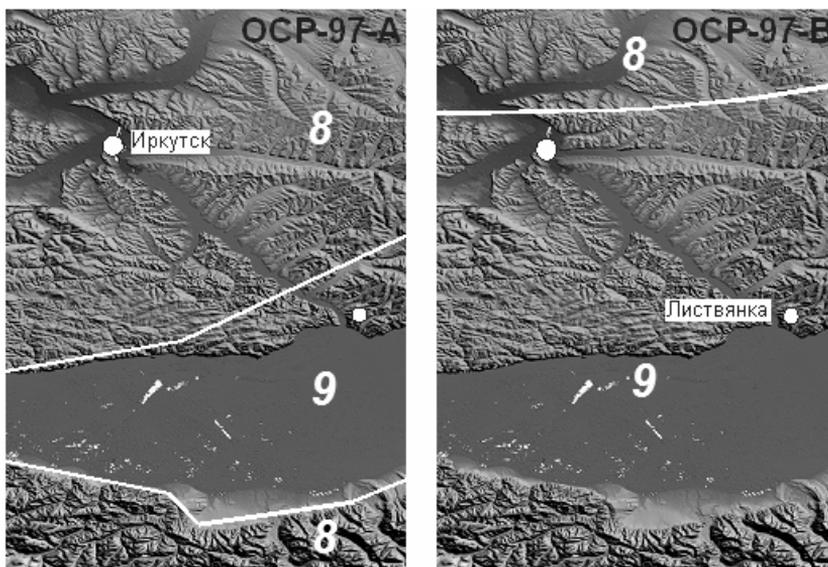


Рис. 1. Фрагмент карты общего сейсмического районирования ОСР-97 (слева – карта А, справа – карта В)

Резюмируя сказанное, отмечаем, что вероятностные оценки параметров исходной сейсмичности с 1980 г. обновлялись дважды. В то время как карта сейсмического микрорайонирования после 1976 г. осталась на прежнем уровне. Она явно не отвечает не только современному уровню методических подходов районирования сейсмической опасности, но и площади перспективного строительства города. В связи с изменившимися условиями строительства (гидрогеологическими, инженерно-геологическими, топографическими и др.) территории «старого» города и новыми требованиями строителей к проектированию сейсмостойких зданий и сооружений с повышенной ответственностью необходимы проведение сейсмического микрорайонирования территории города на новой вероятностной основе и оценка сейсмического риска. Этапы таких исследований для особых инженерно-геологических и сейсмогеологических условий территории г. Иркутска приводятся ниже и реализуются на примере конкретной строительной площадки.

### Краткий анализ данных по сейсмичности и сеймотектонике района г. Иркутска

Иркутск расположен в пределах юго-западной части активизированной окраины Сибирской платформы, где основным разрывным нарушением, обуславливающим высокий сейсмический потенциал территории, является Главный Саянский разлом (рис. 2).

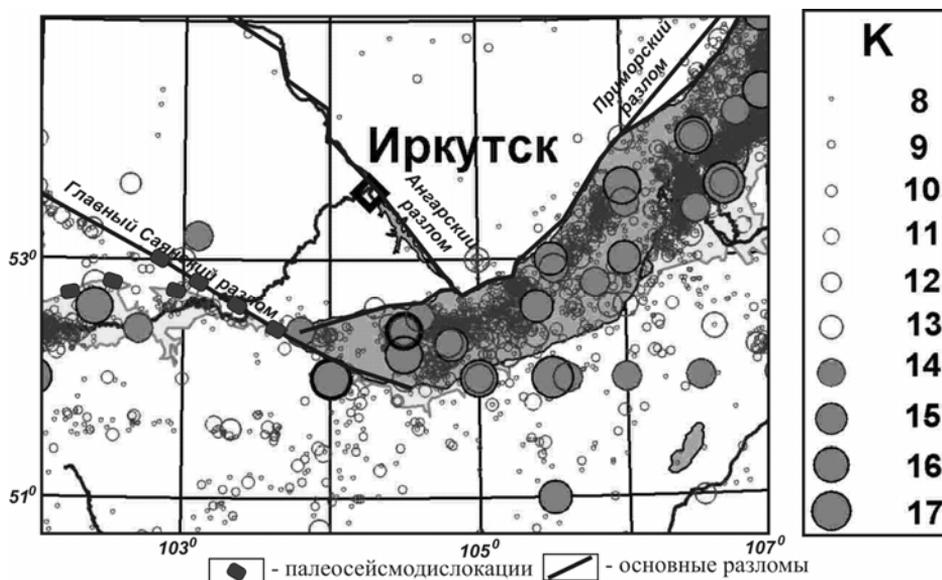


Рис 2. Карта эпицентров землетрясений, схема разломов и палеосейсмодислокаций района г. Иркутска (К – энергетический класс)

Разлом (взбросо-сдвиг) имеет общую протяженность до 900 км (кайнозой), 220 км которого имеют следы современного обновления. Ширина зоны разлома достигает 10 км. В пределах активной части разлома выявлены палеосейсмогенные структуры с возможной магнитудой ( $M$ ) сейсмических событий до 8,0. Главный Саянский разлом является основой Восточно-Саянской зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) с магнитудой  $M = 8,0$  [6; 16].

Другим наиболее крупным в регионе разрывным нарушением является Приморский разлом. При ширине в 10 км разлом протягивается вдоль западного побережья оз. Байкал на 400 км. Высокую сейсмическую активность разлома в недавнем прошлом подтверждают присутствующие здесь палеосейсмогенные структуры. Приморскому разлому соответствует одноименная зона ВОЗ с возможной магнитудой  $M$  до 7,5 [7; 14].

Непосредственно пересекает территорию г. Иркутска Ангарский разлом (см. рис. 2), он протягивается от оз. Байкал вдоль долины р. Ангары на расстояние более 150 км при ширине зоны разрыва до 15 м. Разлом представляет собой зоны повышенной трещиноватости в плейстоцено-голоценовых отложениях песчано-глинистого и песчано-галечного состава, направление зон – северо-западное [16].

Историю развития сейсмического процесса территории можно проследить на материалах сети сейсмостанций лишь за последние десятилетия. Исторические данные о сильных землетрясениях в недалеком прошлом наиболее полно представлены в работах [2; 14]. Первые исторические сведения о сильных землетрясениях Восточно-Сибирского региона датируются концом XVII и началом XVIII вв. Как правило, эти данные отрывисты и содержат мало информации.

Наиболее сильным сейсмическим событием для г. Иркутска является серия землетрясений 1829 г., при которых были повреждены или разрушены многие здания, и в грунтовых основаниях зданий образовались трещины. Эпицентр самого сильного из этой серии землетрясения предположительно расположен на северном склоне хр. Хамар-Дабан. Цаганское землетрясение (12 января 1862 г.) является одним из сильнейших землетрясений Восточной Сибири и наиболее детально описано современниками, его афтершоки вызвали значительные разрушения: во всех каменных зданиях образовались трещины, иногда зияющие. Непрерывные колебания почвы ощущались на протяжении 32 мин [7; 8].

Сильные землетрясения 1905 г. с интенсивностью в 11–12 баллов в эпицентре находились на удалении более 500 км от г. Иркутска. Транзитные сейсмические сотрясения достигали 6–7 баллов: трещины в каменных зданиях, падение тяжелых предметов, паника среди населения. В настоящее время имеются сведения для г. Иркутска о 12 сильных землетрясениях [2], макросейсмические эффекты от которых в пределах города оценивались в 6–7 баллов.

Современный уровень сейсмичности представлен на карте эпицентров землетрясений территории вокруг г. Иркутска (радиус 100–150 км). На карте эпицентров отображены сейсмические события, зарегистрированные сетью сейсмических станций с 1962 г., и землетрясения более раннего периода [8], начиная с 8 энергетического класса  $K$  (см. рис. 2).

Другой формой отображения сейсмического процесса за регистрируемый период является плотность эпицентров землетрясений. Из карты плотности эпицентров землетрясений территории (рис. 3) видно, что ближние сейсмически активные зоны расположены на юге и на востоке от города. Основные области возникновения землетрясений приурочены к акватории южной и средней частей оз. Байкал. Именно из этих зон постоянно регистрируются макросейсмические эффекты от умеренных и слабых землетрясений, которые оцениваются в 3–4 балла на территории, прилегающей к Иркутску. Наиболее сильный макросейсмический эффект (5 баллов) отмечен при Среднебайкальском землетрясении (29 августа 1959 г.,  $M = 6,8$  [2]).

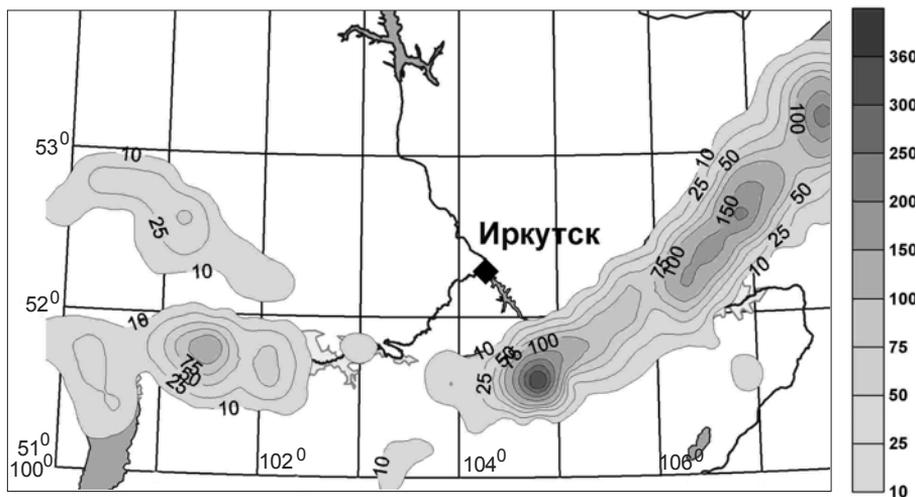


Рис. 3. Карта плотности эпицентров землетрясений района г. Иркутска

Уровень сейсмической опасности территории в большей степени определяется расположением зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) с возможным проявлением сейсмичности магнитудой 6–7 и более. Основными в пределах исследуемой площади являются Приморская зона (южная ( $M = 7$ ) и субширотная ( $M = 7,5$ )), приуроченная к Приморской системе тектонических нарушений, а также Восточно-Саянская (Главный Саянский разлом,  $M = 8$ ) [16]. Вместе эти две зоны формируют уровень сейсмической опасности как исследуемой территории, так и региона в целом.

Для Прибайкалья полученные по макросейсмическим и расчетным данным размеры изосейсмальных площадей сотрясений в 9 баллов [7]

представлены следующими значениями. Для зон ВОЗ с  $M > 8,0$  длина изосейсмальной зоны составляет 500 км, ширина – 90 км; для зон ВОЗ с  $M = 7,5–8,0$  изосейсмальная зона – 80 км; для зон ВОЗ с  $M = 7,0–7,5$  изосейсмальная зона – 50 км. Сейсмические сотрясения в 8 баллов возможны на удалении 600 км (длина изосейсмальной зоны) и 160 км (ширина) от зоны ВОЗ с  $M > 8,0$ , для зоны с  $M = 7,5–8,0$  – 300 км и 100 км и для зоны с  $M = 7,0–7,5$  – 140 км и 70 км. Анализ макросейсмических данных о сейсмических событиях в пределах рассматриваемой площади (исторический и инструментальный периоды) и расчетные данные о возможном транзитном сейсмическом сотрясении из расположенных на исследуемой площади зон ВОЗ можно сделать выводы: территория города находится в зоне сейсмических сотрясений интенсивностью 8–9 баллов (см. рис. 1).

### **Результаты инженерно-сейсмологических исследований**

Итогом обоснования инженерно-сейсмологических условий территории строительства является карта сейсмического микрорайонирования. Карта согласно нормативным документам должна отражать районирование в масштабе строительства основных параметров сейсмических воздействий, необходимых для проектирования сейсмостойкого строительства. Основные параметры картирования – это сейсмическая опасность в баллах, максимальные или пиковые ускорения и резонансные частоты. Для их получения необходим набор сейсмических характеристик для всего многообразия грунтовых условий территории, которые представляются прогнозными акселерограммами сильных землетрясений, спектрами ускорений, частотными характеристиками рыхлой толщи и далее для конкретных типов зданий и сооружений спектрами реакции, коэффициентами сейсмичности и динамичности. Основой карты сейсмического микрорайонирования также являются топографические карты в принятом масштабе, карта инженерно-геологических и гидрогеологических условий и другие данные. Весь этот набор необходимых сведений по вопросам сейсмического микрорайонирования территории г. Иркутска может быть получен только при проведении комплексных инструментальных инженерно-сейсмологических исследований и выполнения большого объема теоретических расчетов.

При выполнении этапов исследований в отмеченном направлении первостепенной задачей является формирование исходного сигнала для территории г. Иркутска [4]. Трудности при задании «эталонного» сейсмического воздействия объясняются тем, что выбор или расчет исходной акселерограммы заведомо не может быть однозначным. Это связано с тем, что проявление землетрясения в конкретной локальной зоне, как и всякий многопараметрический отклик, определяется набором свойств, характеризующих очаг, трассу, в которой распространяется сейсмический сигнал, строение и состав грунтов в основаниях сооружений. Дополнительные сложности создает нали-

чие нескольких зон ВОЗ (см. рис. 2 и рис. 3), физико-механические свойства пород и тип подвижки в очаге. Они определяют вероятность возникновения землетрясений импульсного характера или с относительно медленным нарастанием и спадом его интенсивности на поверхности.

Существующие способы задания исходных акселерограмм ориентируются в основном на получение или расчет его пиковых ускорений и масштабирование [9] в соответствии с сейсмическими шкалами [13]. Немногочисленность зарегистрированных сильных событий, не только в зонах ВОЗ, но и в обширных регионах, заставляет обращаться либо к каталогу сильных событий, зарегистрированных мировой сейсмической сетью, либо использовать данные слабых землетрясений совместно с заданием фазовых характеристик с помощью «счетчика случайных чисел» [1]. Такой подход усугубляет вышеперечисленные неопределенности. Нами реализованы два способа, в первом из которых учитываются местные условия его формирования и возможность использования записей сильных событий мировой сетью. Теоретическая основа этого способа опирается на теорию восстановления сигналов и изображений по фазовым характеристикам. В отличие от имеющихся подходов задается амплитудный спектр землетрясения с необходимыми параметрами, фазовый спектр определяется по данным записей местных землетрясений [4], а в итоге формирование исходного сигнала сводится к ряду относительно простых процедур.

Во втором способе использовались только записи землетрясений региональной сети сейсмических станций. Поскольку среда выступает формирующим фактором очагового импульса, то фазовый спектр так или иначе учитывает излучение очага и рассеивающие свойства неоднородностей среды. Для задания исходной акселерограммы были использованы средние амплитудные спектры ускорений нескольких землетрясений средней силы, зарегистрированные в разное время сейсмостанцией «Иркутск» Байкальского филиала геофизической службы СО РАН. Магнитуда  $M$  выбранных землетрясений меняется от 5 до 6,3, а эпицентрального расстояние от 71 до 285 км (табл. 1). Сами записи акселерограмм и полученные по ним спектры характеризуют выбранные землетрясения по максимальным ускорениям и основным частотам максимумов спектров (рис. 4). Для расчета спектров методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) выбирались участки акселерограмм поперечных волн длительностью  $T = 20$  с. При этом нижняя граничная частота определялась по соотношению  $f_{нч} = 1/T = 1/20 = 0,05$  Гц. Верхняя граничная частота, определяемая частотой Найквиста, связана с шагом дискретизации  $\Delta t$  ( $\Delta t = 0,01$  с) соотношением  $f_n = 1/T = 1/2\Delta t = 50$  Гц.

Таблица 1

Основные параметры землетрясений, записи которых использованы для формирования исходного сигнала

№ (соотв. рис. 4)	Дата и время	Координаты эпицентров		$K$	$M$	Эпицентральное расстояние ( $\Delta$ , км), интенсивность ( $I$ , баллы)
		$\varphi$	$\lambda$			
1	25. 02. 1999 18:58:29,9	51,64	104,82	14,6	5,9	77 км, 5–6 баллов (Южно-Байкальское)
2	25. 02. 1999 19:11:07,0	51,65	104,8	13,7	5,4	77 км, 4–5 баллов (афтершок Южно-Байкальского)
3	31. 05. 2000 16:28:08,7	51,71	104,84	13,4	5,2	71 км, 4 балла (область Южно-Байкальского)
4	28. 07. 2002 20:28:33,4	52,99	107,71	13,1	5,1	245 км, 3 балла (Ольхонское)
5	23. 02. 2005 19:55:11,2	52,35	101,59	13,6	5,3	285 км, 2–3 балла (Главный Саянский разлом)
6	27. 08. 2008 01:35:31,4	51,62	104,06	>15,2	6,3	72 км, 6–7 баллов, дана моментная магнитуда $M_w$ по данным NEIC (Култукское, Главный Саянский разлом)
7	27. 08. 2008 01:41:31,8	51,61	104,03	13,0	5,0	72 км, 5 баллов (афтершок Култукского)

Примечание. Магнитуда  $M$  получена пересчетом из энергетического класса  $K$  по формуле Гуттенберга – Рихтера – Раутиан:  $M = (K - 4) / 1,8$  [9].

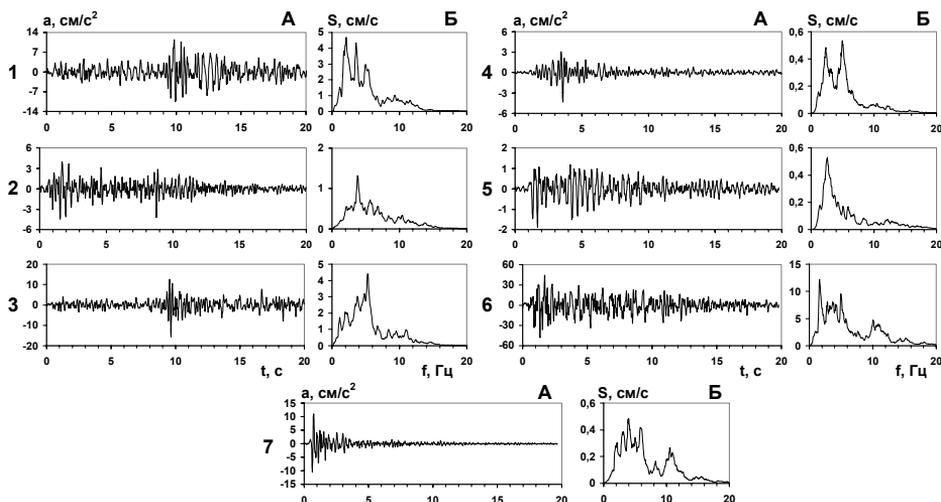


Рис. 4. Зарегистрированные сейсмостанцией «Иркутск» землетрясения, записи которых использовались для формирования исходного сигнала (А – акселерограммы, Б – их амплитудные спектры, слева указаны номера, соответствующие табл. 1)

Поскольку землетрясения имели различные эпицентральные расстояния ( $\Delta$ , км) и энергетические характеристики ( $M$ ), амплитудные спектры ускорений приводились к одному эпицентральному расстоянию и магнитуде (в нашем случае  $\Delta = 80$  км и  $M = 7,5$ ). Для этого были использованы полученные нами для Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) частотно-зависимая функция затухания спектров с расстоянием  $n_{\text{эф}}(f)$  и энергетически зависимая функция  $\beta_M(f)$ , определяющая приращение уровня спектра при увеличении магнитуды на единицу [3]. С привлечением дополнительных данных они имеют вид:

$$\begin{cases} n_{\text{эф}}(f) = 0,94, f \leq 1\text{Гц} \\ n_{\text{эф}}(f) = 0,94^{0,39}, f > 1\text{Гц} \end{cases} \begin{cases} \beta_M(f) = 0,94, f \leq 1\text{Гц} \\ \beta_M(f) = -0,37\lg(f) + 0,94, f > 1\text{Гц} \end{cases}$$

В результате был получен средний (из не сглаженных) амплитудный спектр, соответствующий некоторому моделируемому землетрясению с эпицентральной расстоянием  $\Delta = 80$  км и магнитудой  $M = 7,5$ . Отметим, что все использованные землетрясения имеют наиболее характерные для БРЗ подвижки в очаге: сбросо-сдвиг.

Затем полученный амплитудный спектр приводился к грунтам I категории (плотные грунты) путем деления его на частотные характеристики грунтов верхней зоны разреза под сейсмической станцией «Иркутск» (рис. 5). Частотные кривые были найдены двумя независимыми методами: расчетным методом тонкослоистых сред, опирающимся на построение скоростных моделей верхней зоны разреза [10], и способом спектральных отношений [17], в котором используется отношение спектров горизонтальной составляющей записи землетрясения к вертикальной ( $H/V$ ). Также была применена средняя полученных этими двумя способами частотная характеристика.

В качестве фазового взят спектр записи ускорений наиболее сильного и относительно близкого за последнее десятилетие землетрясения – Култукского (Главный Саянский разлом), имеющего  $M_w = 6,3$  и  $\Delta = 77$  км. Отметим, что десятью годами ранее, недалеко от него произошло сравнимое с ним по мощности Южно-Байкальское землетрясение 1999 г. ( $M = 5,9$ , Ангарский разлом, см. рис. 2).

Завершающим шагом нахождения моделируемой акселерограммы является синтез полученного среднего амплитудного спектра с фазовым спектром с помощью обратного преобразования Фурье [1]. В результате получено три варианта расчетных акселерограмм (см. рис. 5), соответствующих трем частотным характеристикам, использованным для приведения амплитудного спектра к грунтам первой категории. На этом же рисунке приведены сглаженные амплитудные спектры этих акселерограмм с разрешающей способностью 0,5 Гц и стандартной ошибкой  $\varepsilon = 0,25$ . Отмечаем, что все три акселерограммы мало отличаются друг от друга по значению максимальных ускорений (250–270 см/с<sup>2</sup>). Тем самым подтверждается, что основной характеристикой при расчетах сейсмических воздействий на основания сооружений при заданной исходной акселерограмме для коренных эталонных грунтов является амплитудно-частотная характеристика верхней части разреза.

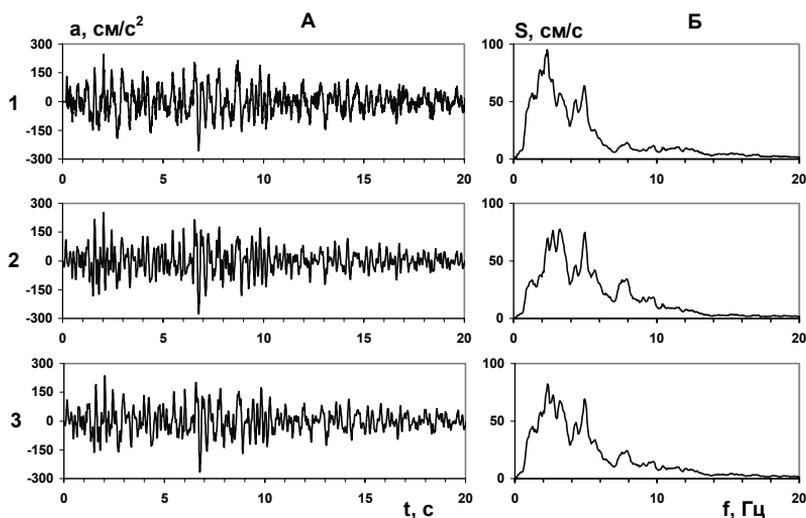


Рис. 5. Расчетные акселерограммы (А) и соответствующие им спектры (Б), полученные для коренных пород под сейсмостанцией «Иркутск». 1 – при использовании расчетной частотной характеристики; 2 – при использовании отношения  $H/V$ ; 3 – при использовании средней частотной характеристики

Параметры расчетных акселерограмм (см. рис. 5) согласно шкале балльности соответствуют эталонному сейсмическому воздействию для скальных пород района г. Иркутска, равному 8 баллам (карта В) [5]. Спектры ускорений (см. рис. 5, обозначение Б) имеют уровни, превышающие значение 0,7 от максимального, в интервале частот 1,5–5,2 Гц. Основные максимумы приходятся на частоту, близкую к 2 Гц, и спектральные плотности на них достигают значений от 78 до 95 см/с – для максимальной горизонтальной компоненты.

Районирование сейсмической опасности в масштабе строительства по предлагаемому комплексу инструментальных и расчетных методов с возможностью использования исходных акселерограмм, сформированных для плотных коренных пород (см. рис. 5), и экспериментальных частотных характеристик, полученных по методу микросейсм, реализовано при обосновании сейсмической опасности участка строительства «Зазеркалье» – нового общественно делового центра г. Иркутска.

Сам участок расположен на территории города, ограниченной р. Ангарой, р. Иркут и ул. Кирова, площадь застройки около 150 га. Важно, что этот участок характеризуется средними по составу в пределах десяти метров, рыхлыми водонасыщенными отложениями (песок различного гранулометрического состава, галечниковый и гравийный грунт) от 8 до 14 м и полускальными грунтами. К породам коренной основы на этом участке относятся аргиллиты, алевролиты, песчаники и сланцы. Это средние в сейсмическом отношении участки строительства для территории г. Иркутска.

Для проведения расчетов сейсмической опасности в баллах и теоретических расчетов необходимы данные о составе грунтов, скоростях распространения в них продольных и поперечных волн, глубине залегания уровня грунтовых вод, мощности рыхлых отложений и их составе, объемной массе эталонных и исследуемых грунтов [4; 9]. Исходные данные для решения поставленной задачи были получены путем сейсмогеологических исследований (регистрация местных землетрясений) и результатов инструментальных измерений (измерения уровня микросейсм, электроразведочные, сейсморазведочные и ультразвуковые измерения).

Скорости сейсмических волн измерялись методом преломленных волн (МПВ) [11; 12]. Измерения проводились отдельными зондированиями с обеспечением встречных и нагоняющих годографов. Длина годографов составляла 69 м, а в отдельных случаях достигала 138 м. Сейсмические волны возбуждались с помощью ударов. Привязка на местности осуществлялась по GPS-геодезии. Наблюдения проводились с возможностью регистрации продольных и поперечных волн. Такая методика измерений позволяет получать средние значения скоростей в верхней зоне разреза до глубины 10–20 м. Скорости сейсмических волн в «эталонных» коренных породах измерялись в районе г. Иркутска на их обнажениях. Для оценки их наиболее вероятных значений использовались также фондовые и литературные данные об измерениях скоростей сейсмических волн в рыхлых и коренных породах [4].

На площадке выполнено около 60 сейсмондирований и для изучения эталонных коренных пород на их выходах – около 20 зондирований. Это достаточно плотная сеть измерений для районируемой территории. Характерные сейсмограммы, зарегистрированные непосредственно на площадке строительства и результаты их интерпретации представлены на рис. 6. Их представление связано с тем, что практически вся центральная часть территории г. Иркутска имеет такую же направленность распределения скоростей сейсмических волн с глубиной по слоям, которая определяется в большей степени их состоянием (воздушно-сухие или водонасыщенные). Поэтому характеристика их физических свойств на примере нашего участка дается относительно подробно. Она может быть полезной при составлении проекта и проведения сейсмического микрорайонирования территории города, поскольку обоснование сейсмической опасности территорий с худшими грунтовыми условиями должно быть наиболее обоснованным.

Интерпретация характерных сейсмограмм показана в виде годографов (см. рис. 6, обозначение А) продольных ( $P$ ) и поперечных ( $SH$ ) волн и скоростных разрезов (см. рис. 6, обозначение Б). Мы видим, что по представленным исходным данным до глубины 10–20 м повсеместно выделяются три слоя (см. рис. 6, обозначение В), по мощности и в скоростном отношении они достаточно выдержаны для всей исследуемой территории. Учитывая статистику измерений, скорости распространения сейсмических волн в них представляем в виде гистограмм (рис. 7).

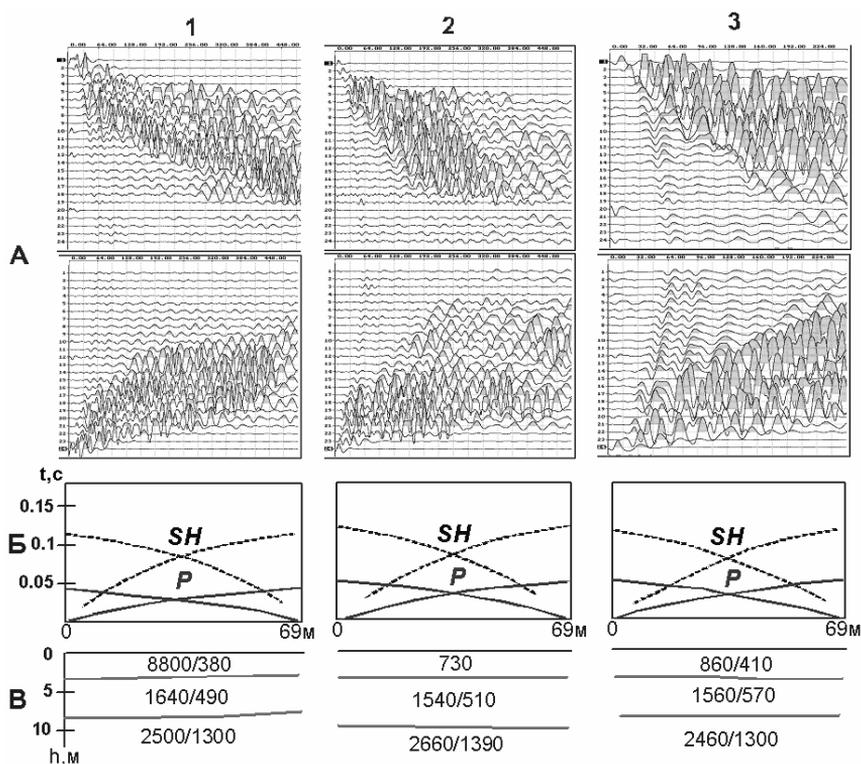


Рис. 6. Встречные сейсмограммы (А), годографы (Б) и скоростные разрезы (В) для участков сейсмозондирования 1, 2 и 3

Первый слой от 2–3 до 5 м, представленный рыхлыми неводонасыщенными грунтами, имеет широкий диапазон изменения скоростей продольных ( $VP$  – от 570 до 970 м/с) и поперечных ( $VS$  – от 280 до 490 м/с) волн (см. рис. 7, слой № 1). Отношение скоростей продольных волн к поперечным в этом слое близко к 2. Второй слой представлен обводненными рыхлыми грунтами, в основном это галечниковые, гравийные и песчаные отложения. Его мощность от 4 до 6 м, в редких случаях до 9 м. Скорости сейсмических волн меняются в следующих пределах:  $VP$  – от 1500 до 1900 м/с и  $VS$  – от 440 до 660 м/с (см. рис. 7, слой № 2). На некоторых участках в этом слое скорости  $VP$  имеют значения ниже 1500 м/с (1300–1400 м/с). Это может объясняться малой мощностью водонасыщенных грунтов, процентным содержанием глинистой фракции и наличием разрушенных полускальных пород. Выделяемые скоростные слои по мощности контролировались данными бурения, однако учитывались и несоответствия, связанные со сравнимыми значениями скоростей в водонасыщенных рыхлых грунтах и в верхней зоне выветрелых коренных пород, поры и трещины которых заполнены водой. При таких различиях предпочтение отдавалось данным прямых методов (бурения) и это учитывалось при построении расчетных сейсмических моделей. Наиболее вероятное значение отношения скоро-

стей ( $VP/VS$ ) для второго слоя близко к 3. Согласно данным бурения, нижний слой соответствует полускальным породам в основном низкой прочности. Но скорости сейсмических волн в нем имеют относительно высокие значения, по видимому они обязаны в основном степени их водонасыщения и наличию трещинно-пластовых вод. Скорость продольных волн ( $VP$ ) в слое меняется от 1900 до 2700 м/с, поперечных ( $VS$ ) – от 900 до 1480 м/с (см. рис. 7, слой № 3). Отношение скоростей  $VP/VS$  для этого слоя в большинстве случаев находится в интервале 1,9–2,0.

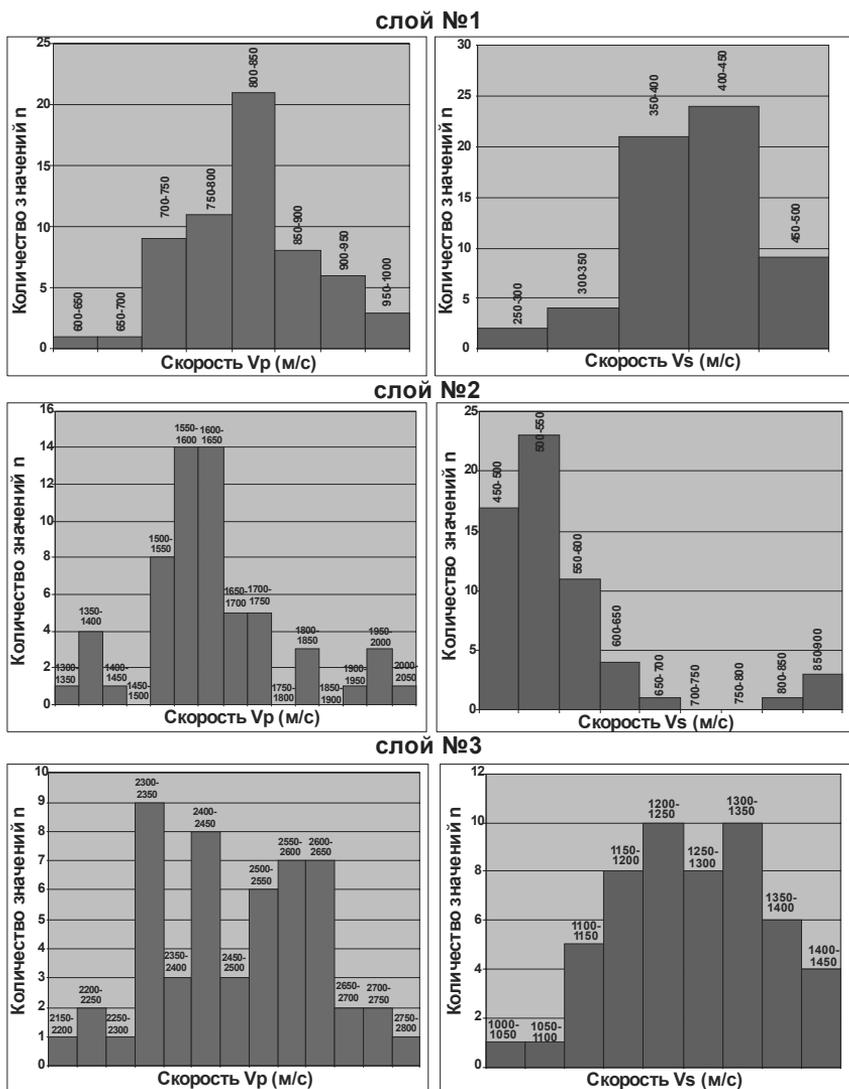


Рис. 7. Гистограммы распределения скоростей продольных ( $VP$ ) и поперечных ( $VS$ ) волн в выделенных грунтовых слоях на участке «Зазеркалье»

В образцах скальных пород в районе г. Иркутска (гнейсы, гранито-нейсы, кристаллические сланцы) измерения проведены на 76 образцах. Они показали, что в зависимости от их сохранности скорость ультразвука меняется от 1800 до 3400 м/с и объемная масса по данным гидростатического взвешивания находится в пределах от 2,5 до 3,0 г/см<sup>3</sup>.

В итоге, вполне обоснованно за эталон принимаются наиболее вероятные значения скоростей в трещиноватых скальных и полускальных грунтах верхней зоны разреза, равные 2200–2400 м/с, объемная масса этих грунтов близка к 2,5 г/см<sup>3</sup>. По сейсмическим свойствам это грунты I категории, и их сейсмическая опасность обычно принимается на один балл меньше исходной [9], в нашем случае это соответствует 7 баллам для карты А и 8 – для карты В [5]. Средним грунтам соответствуют значения скоростей в верхнем десятиметровом слое (неводонасыщенная толща рыхлых отложений), находящихся в пределах 600–700 м/с. Эти скорости входят в диапазон их изменений для верхней зоны неводонасыщенных грунтов исследуемой площадки и являются наиболее вероятными для территории г. Иркутска (исключая слой сезонного промерзания). По сейсмическим свойствам это грунты II категории, и их сейсмическая опасность соответствует исходной и равняется 8 и 9 баллам для карт А и В – соответственно.

Таким образом, для проведения расчетов сейсмической опасности в баллах, построения необходимого набора сейсмических моделей и реализации расчетных методов получены все необходимые данные о составе грунтов, скоростях распространения в них сейсмических волн, мощности слоя водонасыщенных грунтов, мощности рыхлых отложений и объемной массе эталонных и исследуемых грунтов.

В центральной части участка обводненными являются в основном галечниковые гравийные и щебенистые грунты и верхняя зона полускальных грунтов. Для полускальных грунтов поправка за обводненность не вводилась, для крупнообломочных и щебенистых рассчитывалась с коэффициентом 0,5, для гравийно-галечных с песчаным заполнителем, песков и суглинков принималась, равной 1 (последнее характерно для береговых участков строительства). Необходимо отметить, что если даже поправку за обводненность вводить для продольных и поперечных волн, то сейсмическая опасность площадки будет оцениваться от 0,7 до 2,1 баллов – по данным продольных волн, и от 0,7 до 1,9 балла – по данным поперечных волн. Учитывая некоторую неопределенность при расчетах влияния слоя водонасыщенных грунтов по методу сейсмических жесткостей, мы провели оценку сейсмической опасности участка строительства по методу микросейсм [9].

В основе метода микросейсм лежат измерения и анализ реакции различных категорий грунтов на микросейсмические колебания естественного или техногенного происхождения. Измерения уровня и спектральный анализ микросейсмических колебаний позволяют оценить относительные изменения сейсмических свойств грунтов на исследуемой площадке по отношению к выбранному эталону. Всего на площадке получены цифровые записи микроколебаний в 30 пунктах измерений, для которых рассчитаны амплитудно-частотные характеристики, а их максимумы использовались

для оценки сейсмической опасности в баллах для каждого пункта измерений. Они приводят к следующим результатам. Приращение сейсмической опасности по отношению к эталонным коренным породам меняется от 0,5 до 2,1 баллов. Сейсмическая опасность площадки по этому методу (для карты В, исходная сейсмичность 9 баллов [5]) меняется от 8,5 до 10,1 балла. Это находится в хорошем согласии с данными метода сейсмических жесткостей, рассчитанных без учета влияния обводненности слоя галечников мощностью от 2 до 5 м. Но и с учетом этого влияния, различия не превышают  $\pm 0,3$  баллов и находятся в пределах среднеквадратической погрешности используемых методов. Поэтому их результаты могут приниматься как достоверные при построении карты сейсмического микрорайонирования в баллах.

Как было отмечено в начале статьи, проектирование сейсмостойких сооружений для г. Иркутска с учетом его современного уровня развития требует реализации прогноза сейсмических воздействий максимальных ускорений, преобладающих частот для вероятных сильных землетрясений и резонансных частот колебаний рыхлой толщи. Методически это может решаться проведением теоретических расчетов [10] или использованием экспериментальных данных. На конкретном выбранном нами примере предпочтение отдается второму подходу, который основывается на использовании экспериментальных частотных характеристик, полученных по методу микросейсм.

Для обоснования такого подхода из всех рассчитанных (около 20) выбраны частотные характеристики для наиболее контрастных по инженерно-геологическим данным участков, а, следовательно, и по величине их сейсмической опасности в баллах, оцененной по методам сейсмических жесткостей и микросейсм для территории строительства «Зазеркалье» (рис. 8).

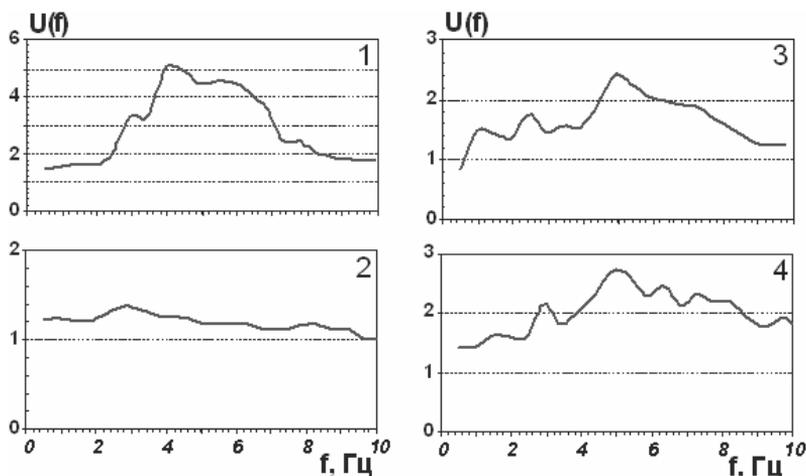


Рис. 8. Примеры экспериментальных частотных характеристик для участка «Зазеркалье». 1 – водонасыщенные рыхлые грунты мощностью 8–12 м; 2–4 – рыхлые грунты мощностью 3–7 м, ниже идут водонасыщенные полускальные разрушенные и сильнотрещиноватые грунты (номера соответствуют рис. 9 и табл. 1)

Можно отметить общую закономерность для зарегистрированных частотных характеристик в отношении их максимальных амплитуд и периодов: малая мощность рыхлых отложений и быстрое возрастание скоростей сейсмических волн с глубиной, обязанное слою водонасыщенных грунтов и близкому залеганию полускальных пород, определяют максимумы частотных характеристик. Они проявляются в центральной части участка строительства на частотах 9–14 Гц, на его окраинах по периметру уменьшаются в связи с увеличением мощности рыхлых отложений до 4–9 Гц.

Участки, соответствующие приведенным частотным характеристикам (см. рис. 8), достаточно хорошо были изучены в скоростном отношении до относительно сохранных коренных «эталонных» грунтов. Это позволило построить для них сейсмические модели и провести теоретические расчеты по методу тонкослоистых сред [10]. Результаты расчетов акселерограмм, сформированных при использовании конкретных частотных характеристик для сейсмостанции «Иркутск» и исходного сигнала (см. рис. 5, обозначение 3), мы представляем в наглядной (рис. 9) и табличной формах (табл. 2).

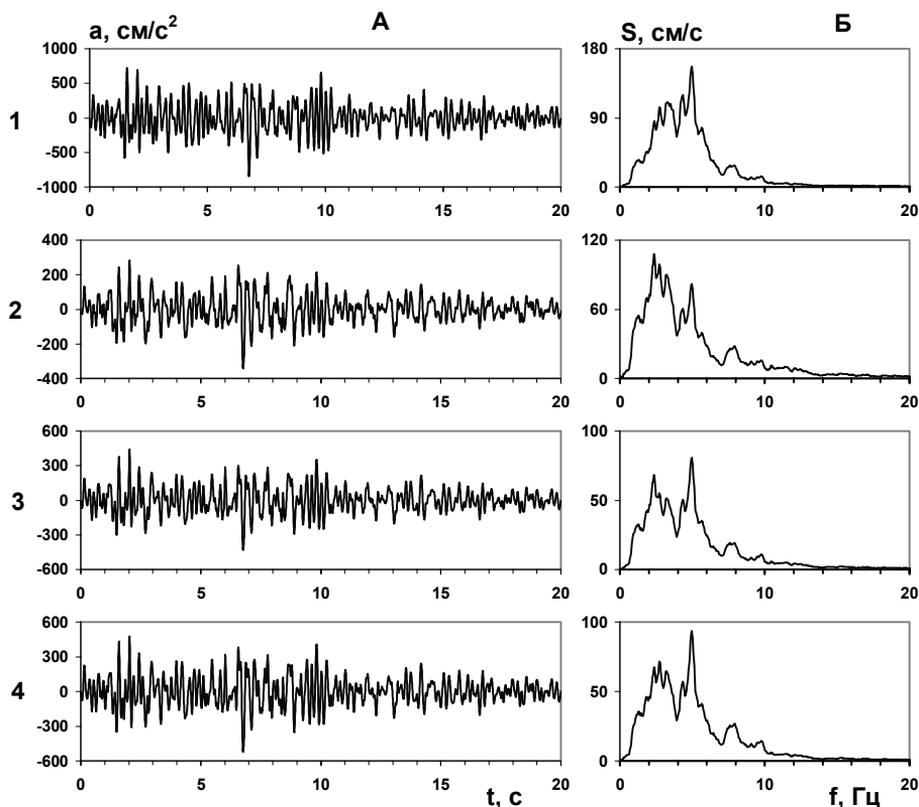


Рис. 9. Акселерограммы (А) и соответствующие им спектры (Б), рассчитанные при использовании исходного сигнала (см. рис. 5, обозначение 3) и экспериментальных частотных характеристик (см. рис. 8)

Для данного варианта расчетов водонасыщенные рыхлые грунты мощностью 8–12 м являются худшими в сейсмическом отношении, а остальные три участка, несмотря на некоторые различия в составе и состоянии грунтов, объединяются в одну группу по сейсмической опасности, равной 9 баллам, хотя и несколько различаются по максимальным ускорениям (от 340 до 522 см/с<sup>2</sup>) и частотному составу максимальных ускорений (см. табл. 2). Следует отметить, что эта группа объединяет рыхлые грунты мощностью от 3 до 7 м, а ниже идут водонасыщенные полускальные разрушенные и сильнотрещиноватые их разновидности.

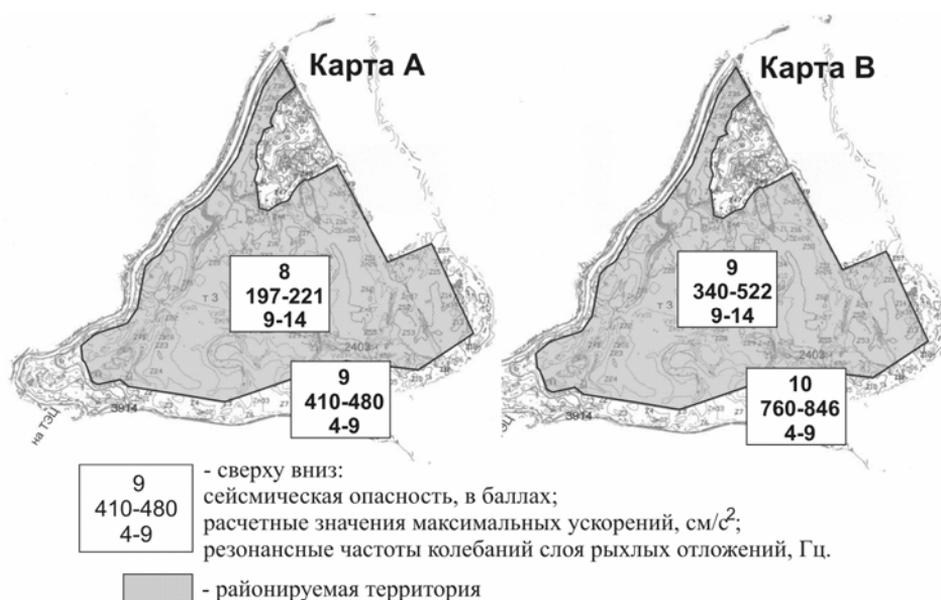
Таблица 2

Параметры сейсмических воздействий для представительных участков комплекса «Зазеркалье»

№ (соотв. рис. 9)	Ускорение $a_{\max}$ (см/с <sup>2</sup> )	Значение основного максимума спектра $S_{\max}$ (см/с)	Частота основного максимума спектра $f$ (Гц)	Интервал частот с уровнем спектра, превышающим значение $0,7 \cdot S_{\max}$ $f$ (Гц)	Расчетная сейсмическая опасность I (баллы)
1	846	157,0	4,98	3,22–5,22	10
2	340	108,0	2,34	2,14–5,13	9
3	442	80,8	4,98	2,19–5,22	9
4	522	93,5	4,98	2,34–5,22	9

В итоге мы приходим к возможности представления экспериментальных и расчетных данных для участка «Зазеркалье» в виде карт сейсмического микрорайонирования для исходной сейсмичности 8 (карта А) и 9 (карта В) баллов (рис. 10).

Таким образом, для исходной сейсмической опасности г. Иркутска, равной 9 баллам (см. рис. 1, карта В), получено (см. рис. 9), что ускорение колебаний в случае сильных землетрясений для исследуемого участка меняется от 340 до 846 см/с<sup>2</sup>, основные максимумы спектров ускорений находятся в пределах от 80,8 до 157 см/с и лежат на частотах 2,34–3,98 Гц. Уровень спектров, превышающий значение 0,7 от максимума, находится в интервале частот 2,14–5,22 Гц. Сейсмическая опасность в баллах по инструментальным методам (микросейсм и сейсмических жесткостей) оценивается в 9 и 10 баллов. Резонансные частоты на схеме сейсмического микрорайонирования (см. рис. 10) рассчитаны при использовании скоростных разрезов до коренных «эталонных» пород и метода тонкослоистых сред. Тем самым получены необходимые параметры сейсмических воздействий для проектирования сейсмостойких сооружений участка «Зазеркалье».



*Рис. 10.* Карты сейсмического микрорайонирования комплекса «Зазеркалье» (слева – для принятой исходной сейсмичности, равной 8 баллам (карта А); справа – для принятой исходной сейсмичности, равной 9 баллам (карта В))

При выборе исходной сейсмичности по карте А (массовое строительство) обоснованные выше параметры сейсмических воздействий (максимальные ускорения и связанные с ними параметры) уменьшаются в два раза (см. рис. 10). Резонансные частоты колебаний пачки верхних рыхлых слоев остаются в пределах инженерного диапазона частот неизменными.

Таким образом, в соответствии с принятой исходной сейсмичностью для г. Иркутска указанные на карте А (см. рис. 10) параметры расчетных сейсмических воздействий для строительного комплекса «Зазеркалье», могут быть превышены с 10 %-ной вероятностью (или не превышены с 90 %-ной вероятностью) в течение 50 лет.

Указанные на карте В (см. рис. 10) расчетные сейсмические воздействия могут быть превышены с 5 %-ной вероятностью (или не превышены с 95 %-ной вероятностью) в течение 50 лет.

## Заключение

Представленные исследования являются начальным этапом инженерно-сейсмологического обоснования условий строительства на территории г. Иркутска, выполненного на основе вероятностной оценки его сейсмической опасности. В статье затронуты вопросы поставленной сложной проблемы: от изучения особенностей очагов землетрясений и их затухания на трассе до задания исходного сигнала, построения вероятных сейсмических

моделей и расчета параметров сейсмических воздействий для типичных грунтовых условий города.

Известно, что конечной целью количественной оценки сейсмической опасности для территории города является предсказание воздействия вероятного сильного землетрясения на грунтовые слои, служащие основаниями сооружений. Это предъявляет особые требования к изучению их физических, упругих и деформационных свойств и вызывает необходимость искать новые подходы к их изучению применительно к задачам инженерно-сейсмологической оценки территории города.

Уже на данном этапе возможна типизация инженерно-сейсмологических моделей и расчет для них вероятных сейсмических воздействий в форме акселерограмм, велосиграмм или в форме интегральных амплитуд с соответствующими периодами, длительностью колебаний и другими характеристиками, учитывающими параметры зон ВОЗ и которые необходимы для проектирования сейсмостойких зданий и сооружений на территории г. Иркутска. Решение указанного комплекса проблем возможно через реализацию сейсмического микрорайонирования территории города на новой вероятностной основе.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 12–05–98085 р\_сибирь\_a.*

#### Список литературы

1. Бат М. Спектральный анализ в геофизике / М. Бат. – М. : Недра, 1980. – 530 с.
2. Голенецкий С. И. Землетрясения в Иркутске / С. И. Голенецкий. – Иркутск : Изд-во «Имя», 1997. – 97 с.
3. Влияние верхней зоны разреза на амплитудно-частотный состав сейсмического сигнала на примере сейсмических станций Прибайкалья и Забайкалья / А. Ф. Дреннов, В. И. Джурик, С. П. Серебренников, Н. Н. Дреннова // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 48–58.
4. Джурик В. И. К прогнозу сейсмических воздействий для территории г. Иркутска / В. И. Джурик, А. Ф. Дреннов // Проблемы оценки и прогноза устойчивости геологической среды г. Иркутска : сб. тр. науч.-практ. конф. – Иркутск, 1997. – С. 120–125.
5. Карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. Масштаб 1:8 000000. – М.: Министерство науки и технологий РФ, ОИФЗ им. О. Ю. Шмидта, 1999. – 57 с.
6. Карта разломов юга Восточной Сибири / под ред. П. М. Хренова. – М. : Мингео СССР, 1988.
7. Литосфера Центральной Азии. – Новосибирск : Наука, 1996. – 238с.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / отв. ред. Н. В. Шебалин, Н. В. Кондорская. – М. : Наука, 1977. – 535 с.
9. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / В. И. Джурик [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 224 с.

10. 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.
11. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмичности: избранные труды / Ю. В. Ризниченко. – М. : Наука, 1985. – 408 с.
12. Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны / Е. Ф. Саваренский. – М. : Недра, 1972. – 290 с.
13. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности / под ред. А. Г. Назарова, Н. В. Шебалина. – М. : Наука, 1975. С. 234–239.
14. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / под ред. В. П. Солоненко. – Новосибирск : Наука, 1977. – 303 с.
15. Сироткин Л. А. Инженерно-геологические условия г. Иркутска и их изменение при строительстве и эксплуатации сооружений : автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук / Л. А. Сироткин. – Иркутск, 1965. – 21 с.
16. Чипизубов А. В. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома / А. В. Чипизубов, О. П. Смекалин // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40, № 6. – С. 936–937.
17. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface / Y. Nakamura // Quarterly report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – Vol. 30, N 1. – P. 25–33.

## Seismic hazard zoning of Irkutsk territory

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

**Annotation.** The paper gives the analysis of seismogeological data and probable large earthquakes parameters for the territory of Irkutsk. The suggested methods form the signal for original seismicity of the territory with using rather large local seismic events records ( $K > 13$ ). Original accelerograms obtained using this method despite of a number of restriction during forming are theoretically substantiated for the territory. They are allowed to use for calculations of seismic ground motions parameters with different ground conditions.

**Key words:** Irkutsk, seismic microzoning, original signal, maximal accelerations, resonance frequency, seismic hazard, accelerogram, frequency characteristics.

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

*Дреннов Александр Федорович*  
кандидат геолого-минералогических наук  
старший научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42–58–60

*Серебряников Сергей Петрович*  
кандидат геолого-минералогических наук  
старший научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42–58–60

*Брыжак Евгений Вадимович*  
аспирант  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42–58–60

*Усынин Леонид Андреевич*  
*младший научный сотрудник*  
*Институт земной коры СО РАН*  
*664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*  
*тел.: (3952) 42–58–60*  
*Ескин Александр Юрьевич*  
*кандидат геолого-минералогических наук*  
*главный специалист*  
*Институт земной коры СО РАН*  
*664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*  
*тел.: (3952) 42–58–60*

*Шагун Артем Николаевич*  
*младший научный сотрудник*  
*Институт земной коры СО РАН*  
*664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*  
*тел.: (3952) 42–58–60*