

УДК 550.34

## К МЕТОДИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ СИГНАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ (НА ПРИМЕРЕ Г. ИРКУТСКА)

Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: dzhurik@crust.irk.ru

Для региона, включающего г. Иркутск, проанализированы сейсмогеологические, сейсмотектонические и сейсмологические данные и обоснованы параметры вероятных сильных землетрясений, а также предложены методические подходы к формированию сигнала, соответствующего исходной сейсмичности района, при использовании записей местных относительно сильных сейсмических событий ( $K > 12$ ) за последние годы из различных вероятных очаговых зон (ВОЗ). Они позволяют на данном этапе исследований использовать их как исходные для расчетов необходимых параметров сейсмических воздействий для различных грунтовых условий. Конечной целью количественного обоснования условий строительства в сейсмоопасных регионах является предсказание воздействия вероятного сильного землетрясения на грунтовые слои, служащие основаниями сооружений. В этом отношении на завершающем этапе наших исследований показана возможность районирования конкретных территорий по вероятностным инженерно-сейсмологическим моделям, для которых обоснованы на принятом вероятностном уровне расчетные параметры сейсмических воздействий. Каждая модель представляется в форме акселерограмм, их спектров и частотных характеристик рыхлых слоев, с соответствующими периодами, длительностью колебаний и другими характеристиками, учитывающими параметры зон ВОЗ. Эти данные необходимы для проектирования сейсмостойких зданий и сооружений на территории города.

**Ключевые слова:** Иркутск, сейсмические воздействия, спектры, частотная характеристика, амплитуда, резонансные частоты, исходный сигнал

## ON TECHNIQUE OF FORMATION OF INITIAL SIGNALS FOR PREDICTING MAXIMUM SEISMIC EFFECTS (BY THE EXAMPLE OF IRKUTSK CITY)

Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V., Eskin A.Y.

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, e-mail: dzhurik@crust.irk.ru

For the region comprising the Irkutsk city, an analysis of the seismogeological, seismotectonic and seismological data has been made, substantiation of potentially large earthquake parameters has been performed, and methodic approach has been proposed for the formation of a signal corresponding to the initial regional seismicity using the records of relatively large local seismic events ( $K > 12$ ) occurred in different source zones over the past years. At the current stage of research, they can be used to calculate the required parameters of seismic effects for different ground conditions. The final objective of quantitative substantiation of building conditions in earthquake-prone regions is the prediction of a potentially large earthquake effect on ground layers underlying the foundations. In this context, our research at final stage has shown the possibility of applying the microzonation method to certain areas in accordance with probable engineering-seismological modeling for which the calculated parameters of seismic effects are substantiated at the accepted probability level. Each model is presented as accelerograms, their spectra and frequency characteristics of loose environment, with the corresponding periods, duration of motions and other characteristics taking into account the parameters of source zones. These data are required for seismic design of building structures in the Irkutsk city area.

**Keywords:** Irkutsk, seismic effects, spectra, frequency characteristic, amplitude, resonant frequencies, initial signal

Безопасность строительства в сейсмоактивных районах обеспечивается прогнозом сейсмических воздействий сильных землетрясений с определенной вероятностью. Эти сведения необходимы для проведения обоснованного планирования сейсмостойкого строительства и сводятся к получению сейсмических характеристик (акселерограмм, спектров и частотно-зависимых функций) и их параметров (максимальных ускорений колебаний почвы, преобладающих периодов сильных землетрясений, резонансных частот рыхлой толщи, затухания и другим показателям сейсмических воздействий) [3]. К настоящему времени получение таких данных проблематично для лю-

бых в сейсмическом отношении активных районов из-за недостаточной статистики записей сильных землетрясений на грунтах различного состава и состояния, и, как следствие, отсутствуют обоснованные методические подходы к решению таких задач.

На примере г. Иркутска прогноз сейсмических воздействий сильных землетрясений для его территории в рамках решения поставленных задач сводится к оценке движения грунта, в указанных выше параметрах, на прогнозируемую исходную сейсмичность, и в первую очередь это касается задания сейсмических сигналов для «эталонных» грунтовых моделей, отвечающих по своим параметрам обоснованной

исходной сейсмичности исследуемой территории. Последняя, для территории города, оценивается в 8, 9 и 9 баллов [4], при этом карта ОСР-97А (8 баллов) соответствует 500-летнему, карта ОСР-97В (9 баллов) – 1000-летнему, а карта ОСР-97С (9 баллов) – 5000-летнему периоду повторяемости таких сотрясений соответственно. Масштаб этих карт 1:8000000, что говорит о необходимости более детального изучения сейсмической ситуации таких районов.

Исследования выполнялись в пределах юго-западной части активизированной окраины Байкальской сейсмической зоны (БСЗ), включающей и северо-восточную часть Монголии, где высокий сейсмический потенциал территории обусловлен основными разрывными нарушениями (рис. 1). Отметим параметры только некоторых из них, которые оказывают наибольшее влияние на уровень исходной сейсмичности территории г. Иркутска. Главный Саянский 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 магнитудой (M) сейсмических событий до 8,0, он является основой Восточно-Саянской зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) с магнитудой  $M = 8,0$  [1].

Вторым наиболее крупным в регионе разрывным нарушением является Примор-

ский 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 [1]. Другие разломы и связанные с ними зоны ВОЗ (рис. 1) также играют существенную роль при обосновании исходной сейсмичности г. Иркутска [4]. Зарегистрированные относительно сильные землетрясения из этих зон ВОЗ использовались нами для статистического обоснования при формировании исходного «эталонного» сигнала.

Средняя повторяемость землетрясений различной балльности в Иркутске за последние три столетия оценивалась следующим образом [1]. Семибалльные сотрясения происходили реже, чем через полвека, семибалльные и восьмибалльные совместно – напротив, несколько чаще, чем через полвека; средний интервал времени для землетрясений с 6-го балла и выше составил – 15 лет, с 5-го балла и выше – 6,5 лет, с 4-го балла и выше – 2 года.

Использованный нами материал для обоснования полученных результатов основывается на 12 сильных землетрясениях [1], макросейсмические эффекты от которых в пределах города оценивались в 6–7 баллов и данные записей (акселерограмм) ускорений

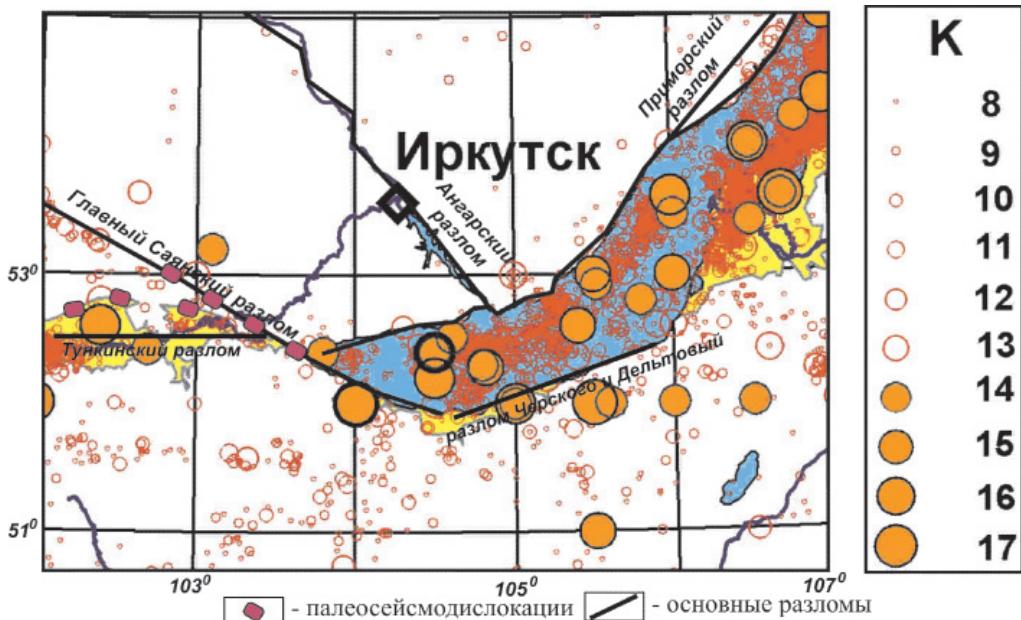


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений, схема разломов и палеосейсмодислокаций юго-западной части активизированной окраины БСЗ (K – энергетический класс землетрясений)

относительно сильных землетрясений больше 12-го энергетического класса, вынесенные на карту (рис. 1). Методы исследований включали регистрацию землетрясений, регистрацию микросейсм, мало- и среднеглубинную сейсмо- и электроразведку. Данные этих методов использовались для обоснования сейсмических свойств различных по составу и состоянию грунтов и построения сейсмогрунтовых моделей. Завершающим этапом исследований является восстановление воздействий обоснованного исходного сигнала для сформированных сейсмогрунтовых моделей изучаемой территории [5].

### Результаты исследования и их обсуждение

Формирование исходного сейсмического сигнала выполнено при использовании записей акселерограмм землетрясений начиная с 1999 года, ощущимых на территории г. Иркутска с интенсивностью сотрясений 2–6 баллов по шкале MSK-64 и  $M \geq 4$  в очаге. Очаги землетрясений располагались на глубине от 10 до 20 км [1]. Акселерограммы регистрировались сейсмостанцией «Иркутск» цифровыми каналами, имеющими столообразные ча-

стотные характеристики на уровне 0,7 от максимального значения усиления ( $U_{\max}$ ) в диапазоне частот 0,05–10 Гц. Их спектры рассчитывались для трех компонент на участке записи длительностью 20 с, от вступления S-волн, методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Затем спектры ускорений приводились к грунтам первой категории путем деления на частотную характеристику верхней зоны разреза [2].

Поскольку землетрясения, относящиеся к одной зоне ВОЗ, имели разные эпицентрические расстояния и магнитуды, нами были получены частотно зависимые функции, учитывающие изменения спектров с эпицентрическим расстоянием и магнитудой для рассматриваемого региона.

Наиболее простым способом определения функции затухания является представление ее в виде зависимости  $r^{-n\phi(f)}$ , где  $r$  – эпицентрическое расстояние, а показатель степени  $n_{\phi}(f)$  зависит от частоты. Отметим, что формы этих зависимостей были получены ранее [2]. Для приведения спектра к нужной магнитуде  $M$  определена скорость изменения уровня спектра с магнитудой  $\beta_M(f) = \Delta \lg S(f) / \Delta M(S(f))$  – значение спектра на  $i$ -частоте).

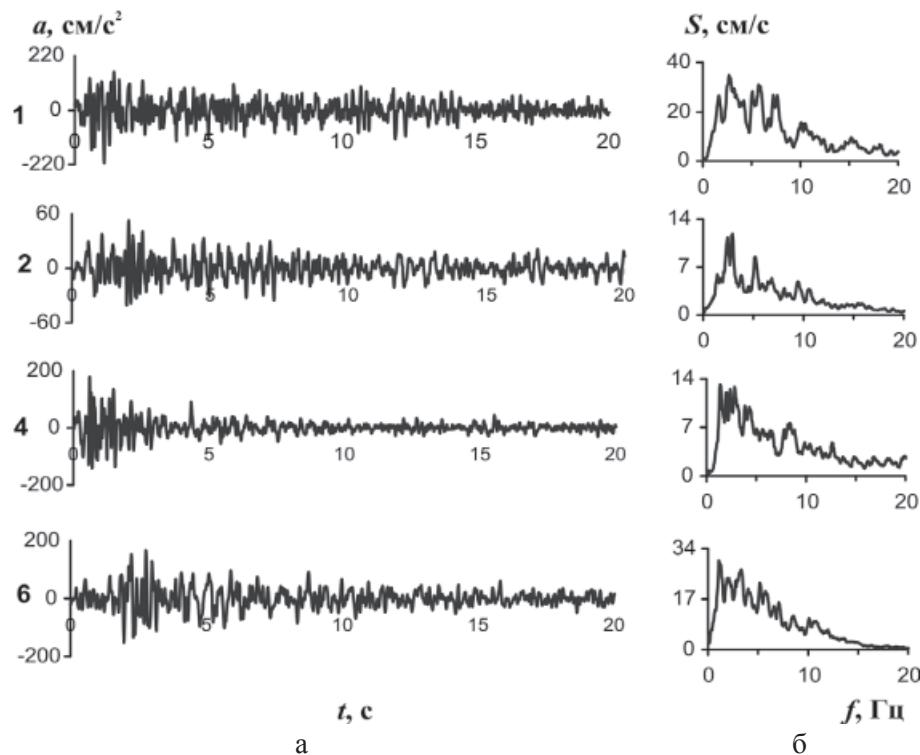


Рис. 2. Прогнозные акселерограммы (А) и соответствующие им амплитудные спектры (Б) для рассматриваемых зон ВОЗ:

1 – Восточно-Саянская (Главный Саянский разлом); 2 – Тункинская (Тункинский разлом);  
4 – Приморская (Приморский разлом); 6 – Южно-Байкальская (разлом Черского и Дельтовый)

После приведения спектров акселерограмм к эпицентральному расстоянию и магнитуде, характерным для каждой зоны ВОЗ, находились средние спектры ускорений. Эти средние спектры и принимались нами за основу при получении искомых акселерограмм, характеризующих данную зону ВОЗ (рис. 2). Нахождение акселерограмм сводилось к обратному преобразованию Фурье [5] средних амплитудных спектров и фазовой характеристики записи наиболее сильного землетрясения из выбранных зон ВОЗ.

В конечном итоге были сформированы акселерограммы для каждой зоны ВОЗ, землетрясения из которых могут быть опасными для сооружений, расположенных на территории г. Иркутска. Они могут быть использованы, как исходные, для дальнейших расчетов сейсмических воздействий при проведении районирования сейсмической опасности.

Для территории г. Иркутска необходимо создание одного исходного сигнала, но с тем условием, чтобы он учитывал особенности спектрального состава колебаний из каждой выбранной зоны ВОЗ. Для этого спектры колебаний были нормированы, затем они усреднялись, рассчитывалась фазовая характеристика одной из записей землетрясений и обратным преобразованием Фурье проводился расчет нормированной акселерограммы (рис. 3, а). Амплитудный спектр (рис. 3, б) этого сигнала, в свою очередь, отражает все частотные особенности акселерограмм, которые спрогнозированы для отдельных зон ВОЗ (рис. 1). Его уровень, превышающий значение 0,7 от максимального ( $0,7S_{max}$ ), лежит в интервале частот 0,97–5,22 Гц. Основной максимум приходится на частоту 2,88 Гц, спектральная плотность достигает значения 0,165 см/с.

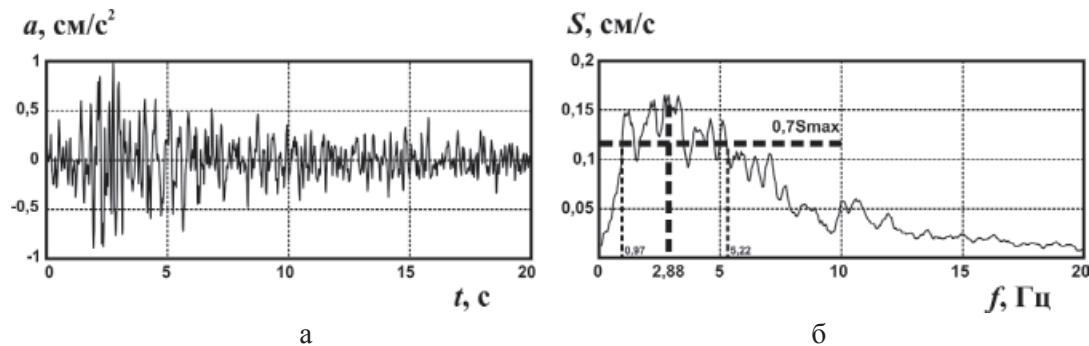


Рис. 3. Исходная нормированная акселерограмма (а) и ее амплитудный спектр (б)

Параметры сейсмических моделей для обобщенных типовых разрезов г. Иркутска

Номер модели	$h$ (м)	$V_p$ (м/с)	$V_s$ (м/с)	$\rho$ ( $\text{т}/\text{м}^3$ )	$\sigma$	$h$ (м)	$V_p$ (м/с)	$V_s$ (м/с)	$\rho$ ( $\text{т}/\text{м}^3$ )	$\sigma$
	Модели для неводонасыщенного состояния грунтов						Модели для водонасыщенного состояния грунтов			
M-1	10	600	300	1,9	0,312	10	1600	400	1,9	0,085
	10	2200	1200	2,5	0,056	10	2200	1200	2,5	0,056
	10	2600	1450	2,6	0,045	10	2600	1450	2,6	0,045
	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037
M-2	20	600	300	2,0	0,312	20	1600	400	1,9	0,085
	10	2200	1200	2,5	0,056	10	2200	1200	2,5	0,056
	10	2600	1450	2,6	0,045	10	2600	1450	2,6	0,045
	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037
M-3	40	600	300	2,0	0,312	40	1600	400	1,9	0,085
	10	2200	1200	2,5	0,056	10	2200	1200	2,5	0,056
	10	2600	1450	2,6	0,045	10	2600	1450	2,6	0,045
	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037
M-4	80	600	300	2,0	0,312	80	1600	400	1,9	0,085
	10	2200	1200	2,5	0,056	10	2200	1200	2,5	0,056
	10	2600	1450	2,6	0,045	10	2600	1450	2,6	0,045
	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037	$\infty$	3000	1760	2,7	0,037

П р и м е ч а н и е .  $h$  – мощность слоя;  $V_p$  – скорости продольных волн;  $V_s$  – скорости поперечных волн;  $\rho$  – плотность;  $\sigma$  – декремент затухания.

Для того, чтобы использовать исходный сейсмический сигнал в дальнейших теоретических расчетах для различных грунтовых условий, необходимо привести его к эталонному грунту и построить расчетные модели. В таблице представлены параметры таких моделей, которые подстилаются коренными «эталонными» грунтами. Отметим, что составленные модели опираются на инженерно-геологические и геофизические данные, полученные нами на территории города Иркутска геофизическими методами.

Для реализации теоретических расчетов был выбран набор известных методов и программ [3; 5]. Расчеты проведены для максимальной принятой исходной сейсмичности района, равной 9 баллам (OCP-97С, соответствует 5000-летнему периоду повторяемости) [4]. Для этого исходный сигнал масштабировался на 8-балльные воздействия для «эталонных» коренных пород. Использовались и экспериментальные частотные характеристики [6]. Построенные модели соот-

ветствуют различной мощности неводонасыщенных и водонасыщенных рыхлых грунтов, которая увеличивается с 10 до 80 м. Подстилаются они породами с «эталонными» значениями скоростей.

Результаты расчетов представляются в графической форме для неводонасыщенного состояния рыхлых грунтов (рис. 4) и водонасыщенного их состояния (рис. 5). Краткая оценка расчетных данных, по основным параметрам сейсмических воздействий для принятой исходной сейсмичности в 9 баллов характеризуется следующим образом.

Резонансная частота для моделей, представляющих неводонасыщенные грунты (таблица, рис. 4), закономерно снижается с увеличением мощности рыхлой толщи с 7,71 до 0,83 Гц. Для водонасыщенных грунтов (таблица, рис. 5) уменьшение резонансной частоты не столь значительно (с 9,96 до 1,12 Гц), что связано с большей скоростью сейсмических волн по сравнению с неводонасыщенными. Максимальные ускорения для неводонасыщенного

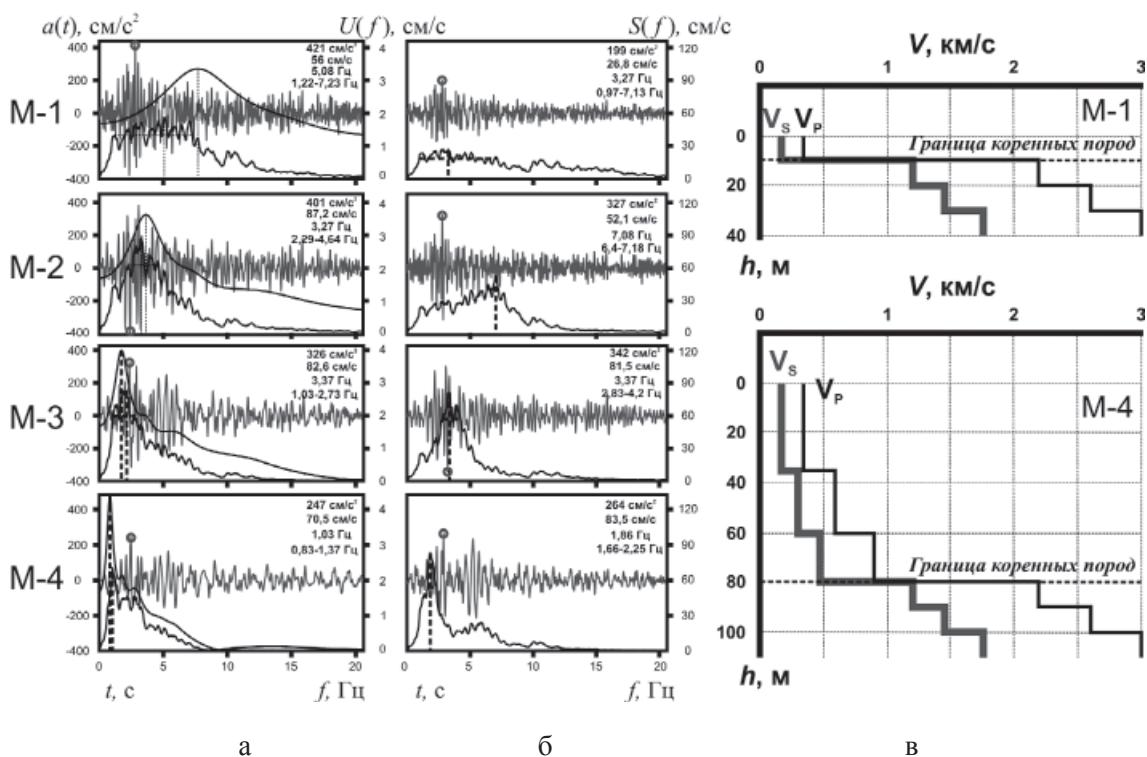


Рис. 4. Результаты теоретических расчетов для неводонасыщенного состояния грунтов.  
 Акселерограммы –  $a(t)$ , спектры –  $U(f)$  и частотные характеристики –  $S(f)$ .  
 а – для горизонтальной; б – для вертикальной компоненты. На графиках сверху вниз обозначены максимальное ускорение, максимальное значение спектра, частота основного максимума спектра, диапазон частот на уровне 0,7 $S_{max}$ , резонансная частота рыхлой толщи;  
 в – параметры моделей M-1 и M-4.

состояния грунтов (таблица, рис. 4) снижаются с 421 до 247 см/с<sup>2</sup>, а для водонасыщенного (таблица, рис. 5) в начале увеличиваются с 791 до 850 см/с<sup>2</sup> за счет резонансных явлений, а затем уменьшаются до 567 см/с<sup>2</sup>, в этом случае в связи с большой мощностью рыхлой грунтовой толщи на первый план выходит поглощение. Максимальное ускорение для модели М-1 (неводонасыщенные грунты, табл. 2, рис. 4) соответствует 9-балльному сейсмическому воздействию, а соответственно, и 9-балльной исходной сейсмичности. Модели М-2, М-3, М-4 характеризуют сейсмические воздействия в этой зоне в зависимости от мощности неводонасыщенных грунтовых слоев.

Максимальное ускорение для модели М-1 (водонасыщенное состояние, таблица, рис. 5) характеризует 10-балльное сейсмическое воздействие, что соответствует 9-балльной исходной сейсмичности. Таким образом, модели М-2, М-3 и М-4 позволяют в первом приближении оценить сейсмические воздействия в 9-балльной зоне для водонасыщенных грунтов и их изменения в связи с вариа-

циями мощности грунтовой толщи. Все параметры сейсмических воздействий отражены на рис. 4 и 5 (обозначения на рис. 4). Они могут использоваться, при планировании строительства различных объектов, для районирования территории города по сейсмогрунтовым моделям и соответствующими им расчетным величинам сейсмических воздействий.

### Заключение

Рассмотрена сейсмическая опасность г. Иркутска из различных зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ). Получены средние амплитудные спектры ускорений для каждой зоны. Проведена коррекция спектров по эпицентральному расстоянию и возможной магнитуде. В результате обосновано в первом приближении задание единого исходного сейсмического сигнала для территории города с учетом вероятных сильных землетрясений из выделенных зон ВОЗ. Проведено математическое моделирование сейсмических воздействий на контрастные грунтовые основания по их составу и состоянию, с последующим их сравнением с имеющимися и полученными

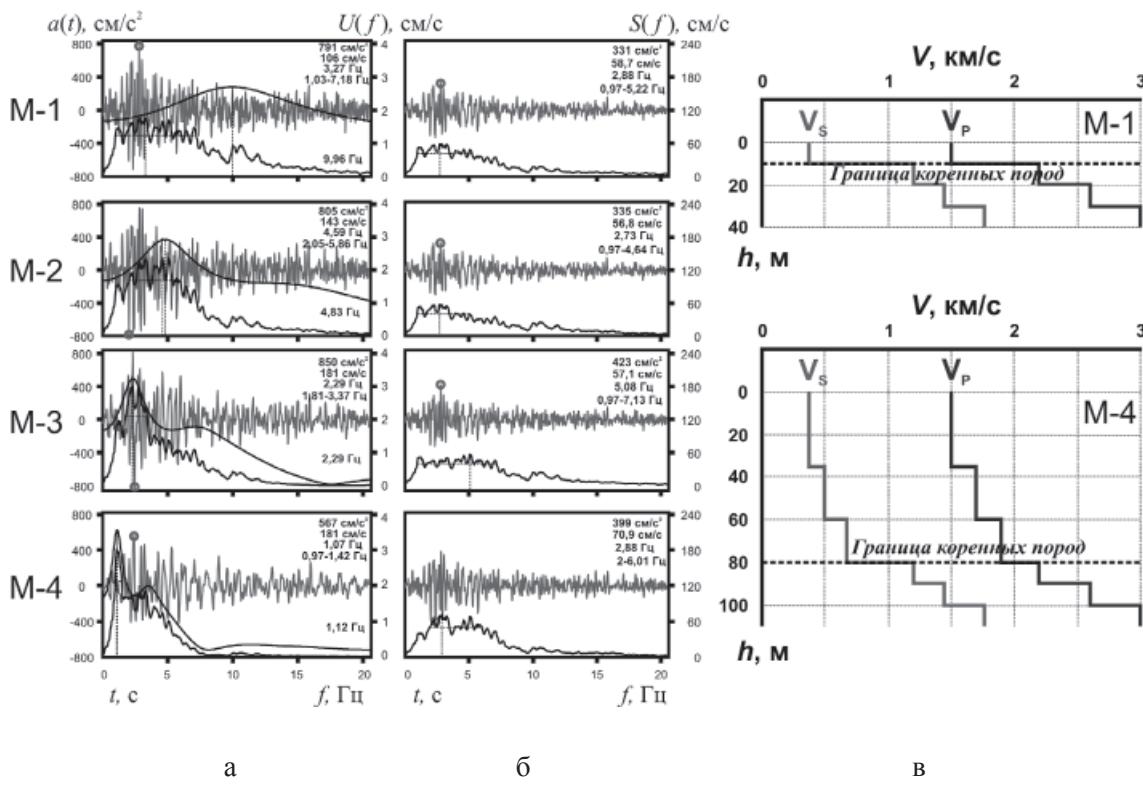


Рис. 5. Теоретические расчеты для водонасыщенного состояния грунтов.  
Обозначения те же, что и на рис. 4

в натурных условиях данными регистрации землетрясений и макросейсмикой. Для реализации предложенной методики прогноза сейсмических воздействий на случай сильных землетрясений построены физико-геологические модели, характеризующие наиболее вероятные типы приповерхностных и глубинных (до возможного залегания коренных «эталонных» пород) неоднородностей территории города и показана количественная оценка их влияния на обоснованный исходный сигнал, так же в параметрах основных сейсмических воздействий.

Несмотря на полученные нами конкретные данные по прогнозу сейсмических воздействий сильных землетрясений на грунтовые основания зданий и сооружений исследуемой территории, они могут служить начальным этапом создания инженерно-сейсмологической службы для мониторинга их поведения, как при слабых, так и при сильных землетрясениях. Это приведет к уточнению вероятностного прогноза сейсмических воздействий для исследуемой террито-

рии на основе задания исходного сигнала, построения набора сейсмических моделей и расчета параметров сейсмических воздействий для типичных грунтовых условий.

### Список литературы

1. Голенецкий С.И. Землетрясения в Иркутске. – Иркутск: Изд-во «Имя», 1997 – 97с.
2. Джурин В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю. Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // Вулканология и сейсмология. – 2015. – № 5. – С. 1–11.
3. Дреннов А.Ф., Джурин В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Дреннова Н.Н. Основные параметры спектров ускорений при землетрясениях с  $M > 5$  для Байкальской Рифтовой Зоны // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 5. – С. 984–994.
4. Комплект карт ОСР-97 / гл. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов. – М.: Министерство науки и технологий РФ, ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта, 1999. – 57 с.
5. Марпп С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. Dzhurik V.I., Tubanov Ts.A., Serebrennikov S.P., Drennov A.F., Bryzhak E.V., Eskin A.Y. An overview of the technique for seismicity microzonation mapping of the Ulan-Ude city territory / Geodynamics & Tectonophysics. – 2015. – Vol. 6, Issue 3 – P. 365–386.