

## СРАВНЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ И РЕАЛЬНЫХ СЕЙСМОГРАММ ОТ СИЛЬНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

*Павлов В.М., Абубакиров И.Р.*

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,  
pvm@emsd.ru, air@emsd.ru*

### Введение

В более ранней работе авторов [1] было показано, что в полосе периодов 60–150 секунд можно добиться приемлемого согласия реальных и синтетических сейсмограмм от сильных землетрясений с моментными магнитудами  $M_w$  около 8, используя модель точечного источника с подходящей временной функцией. В работе [1] эта модель использовалась для расчета синтетических сейсмограмм в «ближней» зоне очага. Под «ближней» зоной мы понимаем территорию, для которой эпицентральные расстояния не превышают 3000 км. Мы полагаем, что в этом диапазоне расстояний допустимой моделью среды является модель слоистого полупространства, для которой и производился расчет синтетических сейсмограмм. Форма временной функции источника (ВФИ) принималась известной, а варьировалась только длительность. Выяснилось, что наилучшего согласия реальных и синтетических сейсмограмм удастся достичь, подбирая разные значения длительности ВФИ для разных волновых групп и станций. Такое поведение функции качества подгонки реальных сейсмограмм с помощью синтетических сейсмограмм является проявлением эффекта Доплера, который заключается в том, что излучение от протяженного очага сильного землетрясения для разных направлений и типов волн имеет различную длительность. Этот эффект не может быть строго промоделирован в рамках модели точечного источника. Простейшая модель, которая позволяет аккуратно учесть эффекты направленности излучения – это модель линейного источника.

В данной работе мы используем модель линейного источника, размещенного в слоистом полупространстве, для расчета синтетических сейсмограмм от сильных землетрясений в «ближней» зоне очага. Мы моделируем эффект Доплера для двух сильных землетрясений: Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. ( $M_w=7.8$ ; индекс – Кг\_1997) и Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. ( $M_w=8.3$ ; Sm\_2006). Значения параметров линейного источника определяются путем перебора. Перебор не является исчерпывающим, а результаты имеют иллюстративный характер. Их цель продемонстрировать осмысленность постановки обратной задачи для очага сильного землетрясения с использованием модели линейного источника. Такая постановка может включать требования одновременной оценки тензора сейсмического момента (ТСМ) и параметров протяженности очага.

### Модель очага

Предполагаем, что очаг – прямоугольная площадка длины  $L$  и ширины  $W$  ( $W < L$ ), вдоль которой распространяется разрыв. Длинная сторона площадки параллельна свободной поверхности. Ориентация площадки задается углами:  $\theta_s$  (азимут простираения) и  $\delta_s$  (угол падения). В данной работе мы пренебрегаем влиянием ширины очага на сейсмограммы, и будем говорить об очаге как об отрезке длины  $L$  находящемся на глубине  $h$ . Гипоцентр делит отрезок очага на две части (плеча): длинное  $L_1$  и короткое  $L_2$ ; азимут очага относится к длинному плечу. Разрыв распространяется от гипоцентра к краям отрезка с постоянной скоростью  $V_r$  и характеризуется подвижкой – относительным смещением своих бортов. Подвижка  $\mathbf{V}(\xi, t)$  ( $\xi$  – координата в очаге) постоянный по направлению вектор; его величина не зависит от поперечной координаты на площадке очага:  $\mathbf{V}(\xi, t) = B(\xi, t)\mathbf{b}$ , где единичный вектор  $\mathbf{b}$  постоянного направления определяет направление подвижки. Величина подвижки  $B(\xi, t)$  монотонно нарастает со временем, достигая своего конечного (финального) значения  $B_0$ , которое постоянно. Ниже для скорости подвижки полагаем

$$\partial_t B(\xi, t) = B_0 f(t - t_0 - |\xi|/V_r), \quad (-L_2 \leq \xi \leq L_1)$$

где  $f(t) = (1 - \cos(2\pi t/\tau))/\tau$  – функция, которую будем называть временной функцией субисточника,  $\tau$  – время нарастания подвижки.

Принятая модель очага является вариантом модели Хаскелла [2]

Для иллюстрации зависимости излучения очага от направления (эффект Доплера) на рис. 1 приведены кажущиеся временные функции линейного источника (КВФИ) для  $P$ - и  $S$ -волн – волновые формы импульсов в дальней зоне очага для безграничной среды. В направлении распространения

фронта разрыва длительность  $\tau$  как  $P$ - так и  $S$ -импульса наименьшая; при этом  $\tau$  для  $S$ -волн меньше чем для  $P$  (площади импульсов нормированы на 1, поэтому амплитуда меняется обратно пропорционально длительности). В противоположном направлении длительность наибольшая, причем длительность для  $S$ -волн больше, чем длительность для  $P$ -волн. Импульсы для  $P$ - и  $S$ -волн одинаковы для направлений перпендикулярных линии очага.

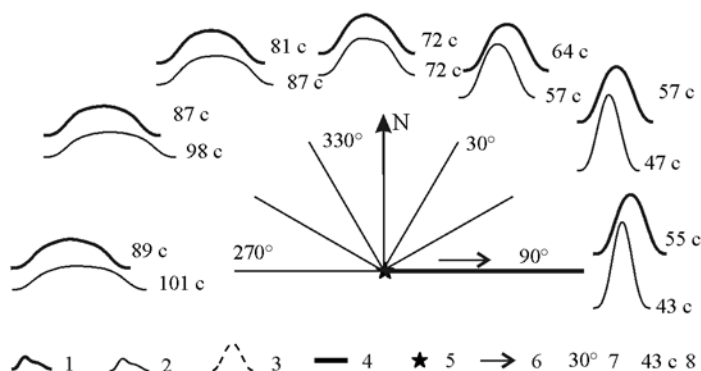


Рис. 1. КВФИ для линейного очага. 1 – для  $P$ -волн; 2 – для  $S$ -волн; 3 – временная функция субисточника (длительность  $\tau=27$  с); 4 – линейный сегмент очага; 5 – положение гипоцентра на линейном сегменте очага; 6 – направление распространения фронта разрыва; 7 – азимут; 8 – длительность. Длина очага 110 км, скорость вспарывания  $V_r=2.44$  км/с. Импульсы каждого вида одинаковы для направлений, линии которых симметричны относительно линии очага.

### Синтетические сейсмограммы и исходные данные

Смещения в точке среды  $\mathbf{x}$  от линейного очага выражаются по формуле (суммирование по повторяющимся индексам от 1 до 3)

$$U_i(\mathbf{x}, t) = M_0 M_{kl}^0 \int_{-L_2}^{L_1} d\xi G_{i,kl}(\mathbf{x}, t - t_0 - |\xi|/V_r; \xi) \otimes f(t), \quad (i=1,2,3)$$

где  $M_0$  – скалярный сейсмический момент;  $M_{kl}^0$  – тензор механизма;  $G_{i,kl}$  – функции влияния – производные функций Грина по координатам источника;  $\otimes$  – знак свертки.

Функции влияния рассчитывались по оригинальной программе [3, 5] для слоистого полупространства (Таблица 1). В расчетах линейный очаг представлялся как набор точечных субисточников. Исходные параметры очагов землетрясений приведены в Таблице 2.

На рис. 2 показаны положение эпицентров обработанных землетрясений и станции, записи которых были использованы.

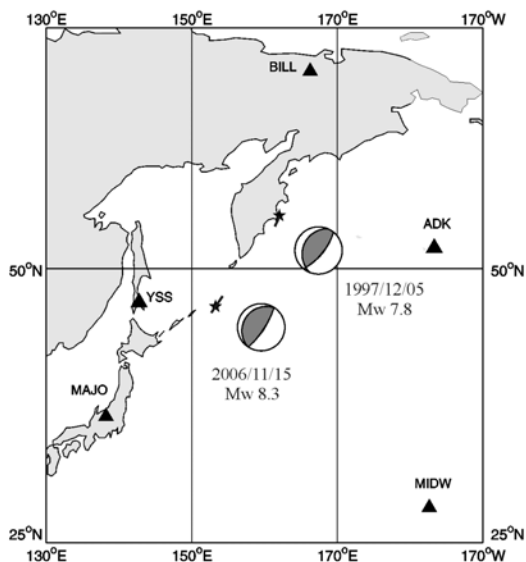


Таблица 1. Модель среды.

h, км	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\alpha$ , км/с	$\beta$ , км/с
0-20	2.72	5.80	3.36
20-35	2.92	6.50	3.75
35-120	3.35	8.04	4.47
120-∞	3.40	8.18	4.51

Примечание.  $\rho$  – плотность;  $\alpha$ ,  $\beta$  – скорости  $P$ -,  $S$ -волн

Рис. 2 – Карта с эпицентрами использованных землетрясений и сейсмическими станциями. Для каждого из использованных землетрясений приведены СМТ механизмы в стереографической проекции нижней полусферы. Для Кроноцкого землетрясения использовали станции BILL, YSS и MAJO, для Симуширского землетрясения – MIDW, YSS и MAJO.

Таблица 2. Параметры очагов землетрясений

Индекс	Дата/Время*	Гипоцентр*			Механизм**			$M_0^{**}$ 10 <sup>20</sup> Нм	$M_w$
		$\varphi$ (°)	$\lambda$ (°)	$h$ (км)	strike (°)	dip (°)	slip (°)		
Kr_1997	05.12.1997/11:26:54.6	54.84N	162.04E	33	202 / 39	23 / 68	74 / 97	5.32	7.8
Sm_2006	15.11.2006/11:14:13.5	46.59 N	153.27E	10	215 / 33	15 / 75	92 / 89	35.1	8.3

Примечание. \* каталог PDE NEIC; \*\* каталог СМТ: <http://www.globalcmt.org>

Использовались широкополосные сейсмограммы ВНЛ каналов (1 отсчет в секунду). По исходным сейсмограммам определялись смещения (деконволюция). По горизонтальным компонентам определялись радиальная и трансверсальная компоненты.

### Сравнение наблюдаемых и синтетических сейсмограмм

Наблюдаемые и синтетические сейсмограммы фильтровались в полосе 60–150 с. Использовался фильтр Баттерворта 3-го порядка. Перед сравнением синтетические сейсмограммы сдвигались по оси времени до наилучшего совпадения. Величина сдвига находилась с помощью функции взаимной корреляции. При этом трансверсальная компонента рассматривалась отдельно. Радиальные и вертикальные компоненты ставились «встык», после чего для них находился единый сдвиг.

Степень близости сейсмограмм при использовании модели линейного источника оценивалась по значению величины (суммарная невязка)

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^N \left( V_i^{(o)} - V_i^{(c)} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left( V_i^{(o)} \right)^2} \times 100\%$$

где  $V_i^{(o)}$  ( $V_i^{(c)}$ ) –  $i$ -тый отсчет ряда наблюдаемых (рассчитанных) значений сейсмограмм; здесь ряд – это множество всех значений для использованных станций и компонент ( $N$  – полное число отсчетов).

Для того, чтобы минимизировать  $\varepsilon$  варьировались параметры линейного очага. При этом в качестве независимых были выбраны параметры:  $\kappa = (L_1 - L_2)/L$  – степень односторонности очага,  $T_r$  – время распространения разрыва и длительность временной функции субисточника  $\tau$ . Остальные параметры выражаются через указанные:

$$L_1 = (1 + \kappa) * L / 2; L_2 = L - L_1; V_r = L_1 / T_r; T_s = T_r + \tau; Mach = V_r / \beta$$

где  $T_s$  – полная длительность;  $Mach$  – число Маха;  $\beta$  – скорость поперечных волн на глубине очага. Полная длина очага  $L$  определялась по значению моментной магнитуды с помощью корреляционной зависимости  $\lg(L) = 0.5M_w - 1.85$  [2]. Азимут простираения очага принимался совпадающим с азимутом одной из плоскостей механизма.

Результаты приведены в таблице 4 и на рис. 3-5.

Таблица 4. Оценки параметров протяженности очагов землетрясений

Индекс	$\kappa$ %	$L_1$ Км	$L_2$ км	$Mach$ %	$V_r$ км/с	$T_s$ с	$T_r$ с	$\tau$ с	$E$ %
КГ_1997 $L=110$ км $\theta=202^\circ$	33.3	73	37	65 56-65	2.44 2.09-2.44	65 55-74	30 30-35	35 20-44	22.0 <22.6
	50	83	27	73 51-73	2.75 1.92-2.75	67 47-80	30 30-43	37 10-50	20.7 <22.6
	60	88	22	78 67-94	2.93 2.51-3.52	68 49-81	30 25-35	38 14-54	<b>20.6</b> <22.6
	75	96	14	86 64-86	3.21 2.41-3.21	70 50-82	30 30-40	40 10-52	<b>20.6</b> <22.6
	100	110	0	100 73-100	3.75 2.75-3.75	71 55-84	30 30-40	41 15-53	20.9 <22.6
Sm_2006 $L=206$ км $\theta=35^\circ$	20	124	82	39 37-41	1.30 1.24-1.37	149 137-157	95 90-100	54 37-67	19.7 <20.5
	25	129	77	38 36-43	1.29 1.23-1.43	155 137-170	100 90-105	55 33-74	<b>18.6</b> <20.5
	33.3	137	69	41 39-43	1.37 1.31-1.45	169 161-172	100 95-105	69 61-77	20.0 <20.5

Примечания.  $L=L_1+L_2$  – полная длина;  $\theta$  – азимут вспарывания. Для значений параметров указан диапазон, для которого невязка превышает минимум (выделен) не более чем на 10%.

Для Кроноцкого землетрясения при минимальной невязке 20.6% ( $\kappa=0.6-0.75$ ) получены оценки:  $L_1=88-96$  км;  $L_2=22-14$  км;  $Mach=0.78-0.86$ ; полная длительность  $T_s=68-70$  с; время пробега фронта  $T_f=30$  с. Крайние значения параметров, при которых невязка не превышает минимум увеличенный на 10% таковы:  $L_1=73-110$  км;  $L_2=37-0$  км;  $Mach=0.51-1.0$ ; полная длительность  $T_s=47-84$  с; время пробега фронта  $T_f=25-40$  с. Результаты не противоречат как одностороннему очагу, так и частично двустороннему; в последнем случае максимальное отношение  $L_2:L_1$  равно 1:3. Число Маха превышает 0.5. Для точечного очага наилучшее согласие достигается при длительности ВФИ  $\tau_p=70$  с; невязка равна 34%.

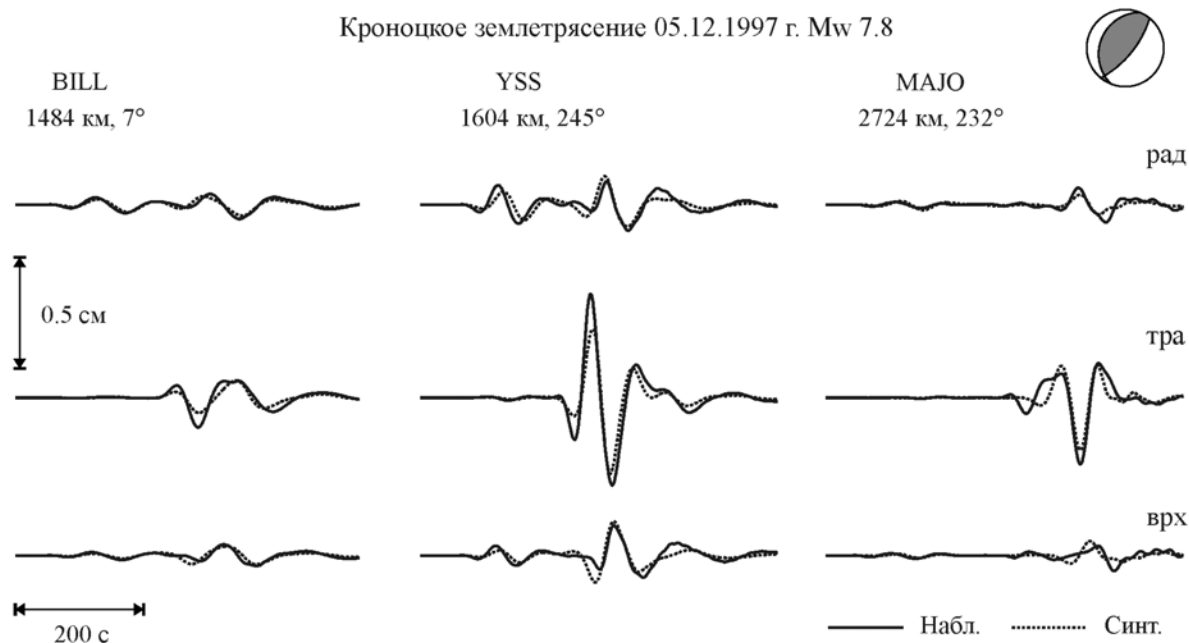


Рис. 3. Наблюденные и синтетические (от линейного очага) сейсмограммы смещения на станциях BILL, YSS и MAJO от Кроноцкого землетрясения 1997 г. (СМТ механизм – в правом верхнем углу). Компоненты: рад – радиальная, тра – трансверсальная и врх – вертикальная. Невязка  $\varepsilon=20.6\%$ ;  $\kappa=0.75$  ( $L_2:L_1=1:7$ );  $Mach=0.65$ ;  $T_s=70$  с.

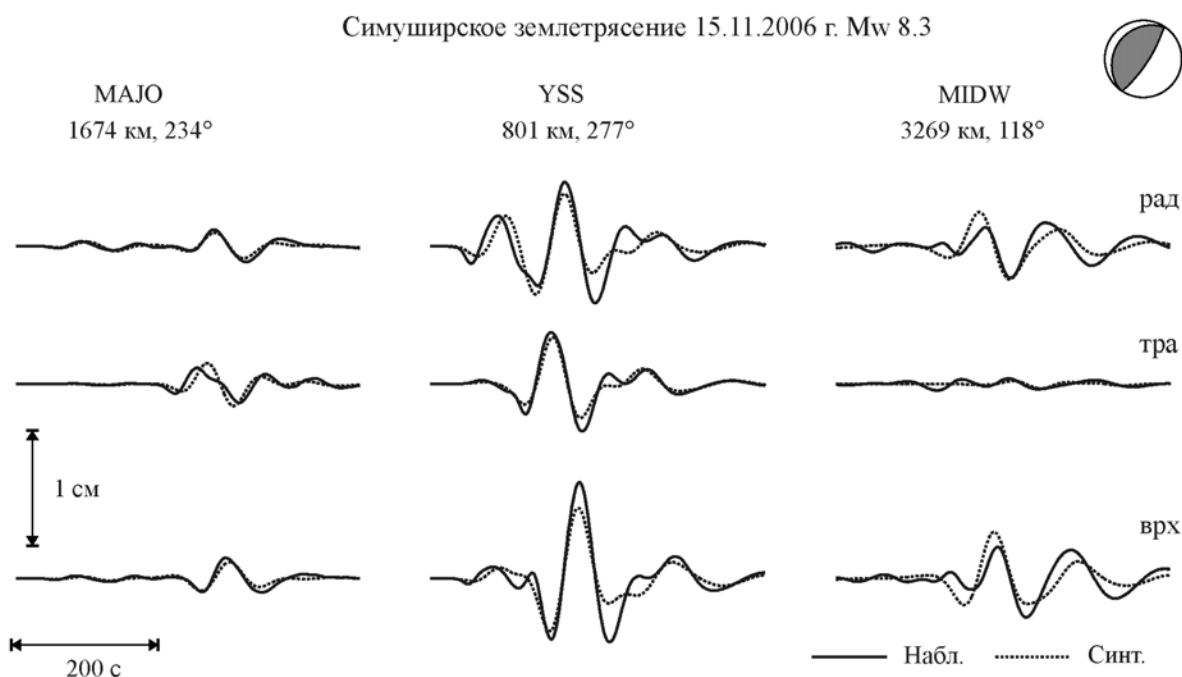
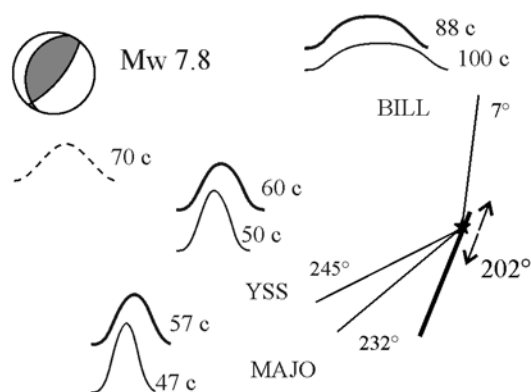


Рис. 4. Наблюденные и синтетические (от линейного очага) сейсмограммы смещения на станциях MAJO, YSS и MIDW от Симуширского землетрясения 2006 г. Невязка  $\varepsilon=18.6\%$ ;  $\kappa=0.25$  ( $L_2:L_1=3:5$ );  $M_a=0.40$ ;  $T_s=155$  с.

а) Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г.



б) Симуширское землетрясение 15.11.2006 г.

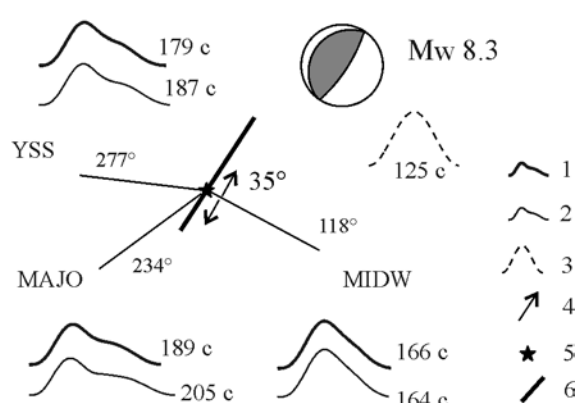


Рис. 5. КВФИ линейного (1, 2) и точечного (3) очага. а) для Кроноцкого землетрясения (сейсмограммы на рис.3); б) для Симуширского землетрясения (рис.4). Указана длительность  $\tau$ . 1 – для Р-волн; 2 – для S-волн; 3 – временная функция точечного очага; 4 – направление распространения фронта разрыва, приведено значение азимута; 5 – положение гипоцентра на линейном сегменте протяженного очага; 6 – линейный сегмент протяженного очага. Числа при кривых – длительность импульсов; числа при линиях – азимуты станций.

Для Симуширского землетрясения при минимальной невязке 18.6% ( $\kappa=0.25$ ) получены оценки:  $L_1=129$  км;  $L_2=77$  км;  $Mach=0.38$ ; полная длительность  $T_s=155$  с; время пробега фронта  $T_r=100$  с. Крайние значения параметров, при которых невязка не превышает минимум увеличенный на 10% таковы:  $L_1=124-137$  км;  $L_2=82-69$  км;  $Mach=0.36-0.43$ ; полная длительность  $T_s=137-172$  с; время пробега фронта  $T_r=90-105$  с. Результаты указывают на двусторонний очаг; при этом отношение  $L_2:L_1$  находится между 1:3 и 2:3. Число Маха близко к 0.4 ( $\pm 0.03$ ). Для точечного очага наилучшее согласие достигается при  $\tau_p=125$  с; невязка равна 30%.

Оценки предварительные. Следует иметь в виду, что подвижка постоянна, а длина фиксирована.

### Выводы

1. Использование модели линейного источника приводит к заметному снижению невязки.
2. Модель линейного источника дает возможность оценить параметры протяженности очага и, в частности, значение числа Маха, которое имеет отношение к оценке цунамигенности землетрясения.
3. Подгонка линейным источником открывает перспективу оценки параметров протяженного источника в рамках принятого подхода.

### Список литературы

- Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Моделирование сейсмограмм от сильных землетрясений Дальнего Востока России на удалениях до 3000 километров // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика» 22-27 сентября 2009 г. Петропавловск-Камчатский. 2009. Т. 2. С. 653-655.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулк. и сейсмол. 1990. № 6. С. 55-63.
- Павлов В.М. Матричный импеданс в задаче расчета синтетических сейсмограмм в слоисто-однородной изотропной упругой среде // Физика Земли. 2009. № 10. С. 14-24.
- Haskell N.A. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults // Bull. seim. Soc. Am. 1964. V. 54. P. 1811-1841.
- Pavlov V.M. A convenient technique for calculating synthetic seismograms in a layered half-space // Proceedings of the Intern. Conf. "Problems of Geocosmos" / St. Petersburg: 2002. P. 320-323.