

РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ В СЛОИСТО-ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ СРЕДЕ

Павлов В.М.

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

Введение

В работе демонстрируются возможности программы расчета полных синтетических сейсмограмм, разработанной на основе оригинального алгоритма [7, 3].

Алгоритм предназначен для расчета полных синтетических сейсмограмм в плоскопараллельной среде, состоящей из однородных упругих изотропных слоев. При решении этой задачи в частотной области часто используется представление смещений в виде разложения по горизонтальным волновым функциям, включающее интегралы по волновому числу. Это представление является следствием разделения переменных в цилиндрической системе координат. Аналогичное представление справедливо для напряжения на горизонтальной площадке. Неизвестные функции глубины (вертикальные функции), входящие в указанные представления, зависят от частоты и волнового числа как параметров. Из этих функций составляется вектор, который принято называть вектором движения-напряжения; первая половина компонент этого вектора – вектор движения – относится к представлению для смещений, вторая половина – вектор напряжения – к представлению для напряжений. Вертикальные функции удовлетворяют системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и подлежат определению на основе определенных граничных условий.

Традиционный метод решения этой системы – метод матричного пропагатора – обладает известным недостатком, связанным с наличием экспонент с большими положительными показателями, что приводит к неустойчивости численного решения. Было предложено несколько методов преодоления этого недостатка. В данной работе предлагается новый метод расчета вертикальных функций, который полностью лишен недостатков метода матричного пропагатора, т. к. не содержит экспонент, абсолютные величины которых больше единицы.

Предлагаемый метод расчета вертикальных функций является развитием метода Фатьянова [4], в основе которого лежит использование потенциалов смещений волн и так называемых, вспомогательных функций. Метод Фатьянова был модифицирован автором [7, 3] за счет отказа от использования потенциалов. Вспомогательные функции (импедансы) были введены непосредственно для векторов движения-напряжения; импеданс – это матрица, на которую нужно умножить вектор движения, чтобы получить вектор напряжения. Это, с одной стороны, упростило логическую структуру алгоритма, а с другой улучшило его численную эффективность.

После того как введен импеданс, система дифференциальных уравнений для вектора движения-напряжения преобразуется в два (векторных) уравнения: нелинейное уравнение для импеданса и линейное уравнение для вектора движения; коэффициенты этого уравнения выражаются через компоненты импеданса. Сначала рассчитывается матричный импеданс, а затем с его помощью строится пропагатор для вектора движения, который и решает задачу расчета вектора движения. Вектор напряжения, если он нужен, получается умножением импеданса на вектор движения. Импеданс полностью определяется средой, граничными условиями и глубиной источника, но не его типом (сила, диполь).

Расчет сейсмограмм включает: (для каждой частоты) вычисление векторов движения для набора волновых чисел; вычисление интегралов по волновому числу; вычисление спектра для данной частоты в соответствии с представлением для смещения; переход во временную область с помощью дискретного преобразования Фурье.

Для вычисления интегралов по волновому числу применяется известная схема, впервые предложенная в работе [1] для случая вертикальной силы, а также в работе [5] для общего случая. В основе указанной схемы – замена исходной задачи на задачу с удаленной цилиндрической границей. Решения обеих задач совпадают до тех пор, пока не приходят отражения от этой границы. Введение цилиндрической границы позволяет перейти от интегралов к рядам по дискретным волновым числам, связанным с корнями функций Бесселя нулевого и первого порядка.

При проведении расчетов для частоты вводится мнимая добавка. Это позволяет обойти сингулярности, связанные с полюсами вертикальных функций. Мнимая добавка вносит искажения в сейсмограмму, которые корректируются во временной области. При этом эффективно подавляются

отражения от цилиндрической границы (при достаточном большом до нее расстоянии), попадающие на сейсмограмму вследствие дискретности преобразования Фурье (наложение времен).

Ниже приводятся примеры расчетов и результаты сравнения с а) фундаментальными модами поверхностных волн (рис. 1) и б) расчетом по методу суммирования мод поверхностных волн (рис. 2). Дается иллюстративный пример расчета в ближней зоне, демонстрирующий головную волну и остаточное (статическое) смещение (рис. 3). Кроме того, для Карымского землетрясения приводится сравнение расчета сейсмограмм по линейной модели (механизм – по геодезическим данным) с широкополосными сейсмограммами, записанными на станции IRIS «Петропавловск» (рис. 4).

Сейсмограммы на расстоянии 3000 км – сравнение с фундаментальными модами поверхностных волн

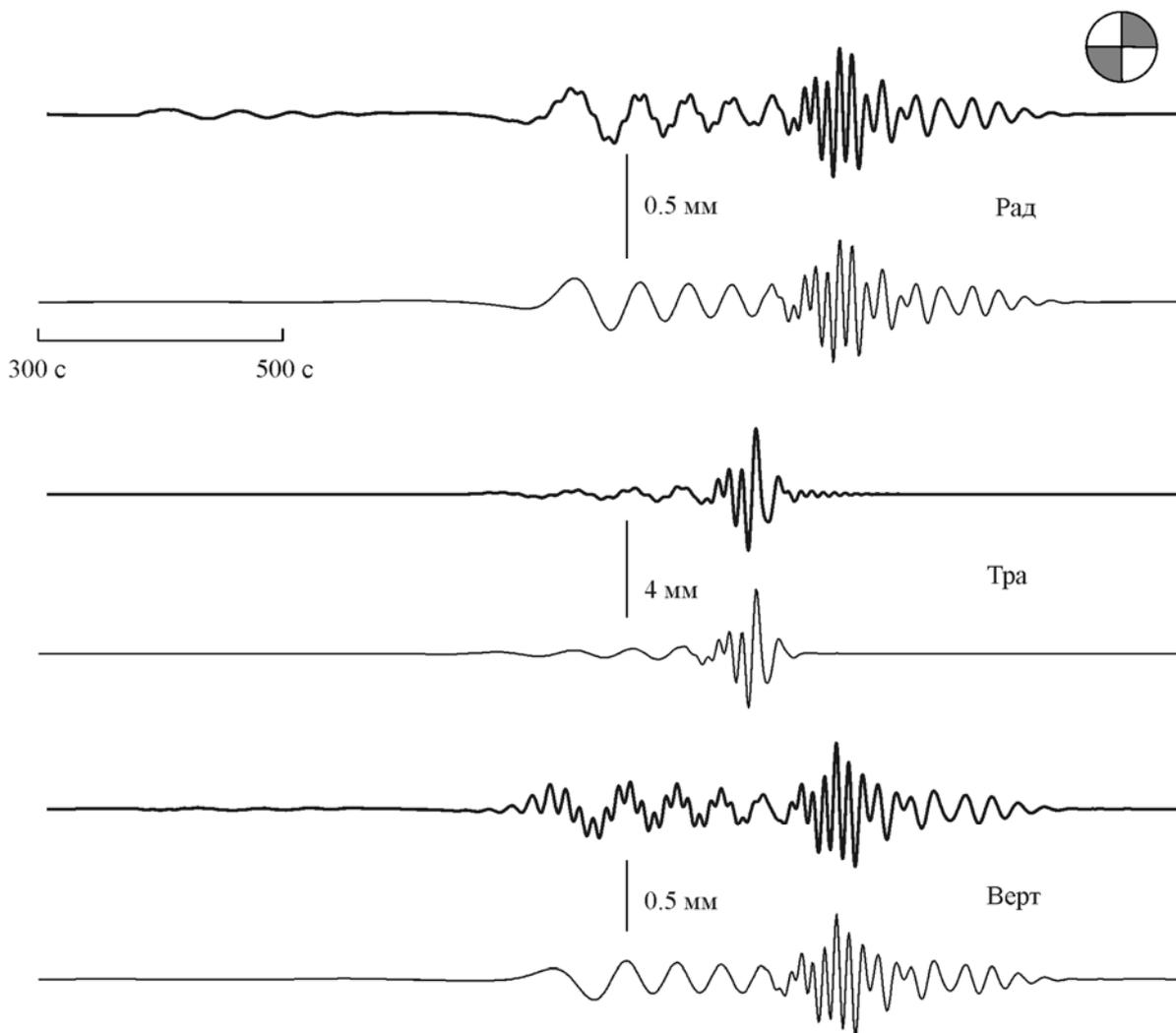


Рис. 1. Сравнение сейсмограмм смещений, рассчитанных по моей программе (толстые кривые), с сейсмограммами поверхностных волн, фундаментальные моды (тонкие кривые, расчет А.Л. Левшина). Среда: слой мощностью 35 км на полупространстве. Параметры слоя: плотность 2.7 г/см^3 , скорость Р-волны 6 км/с, скорость S-волны 3.5 км/с. Параметры полупространства: плотность 3.5 г/см^3 , скорость Р-волны 8 км/с, скорость S-волны 4.7 км/с. Сдвиговый источник на глубине 10 км, $M_w=6.6$.

Приемник в азимуте 30° , на расстоянии 3000 км. Расстояние до цилиндрической границы 10 тысяч км. Использован косинусный фильтр: (1/200, 1/180, 1/10, 1/8). Записи начинаются на 300-й секунде от времени в очаге. Вертикальными отрезками указан масштаб амплитуд в миллиметрах. Приведены компоненты: Рад – радиальная, Тра – трансверсальная, Верт – вертикальная (положительное направление – вниз).

Сравнение с методом суммирования мод поверхностных волн

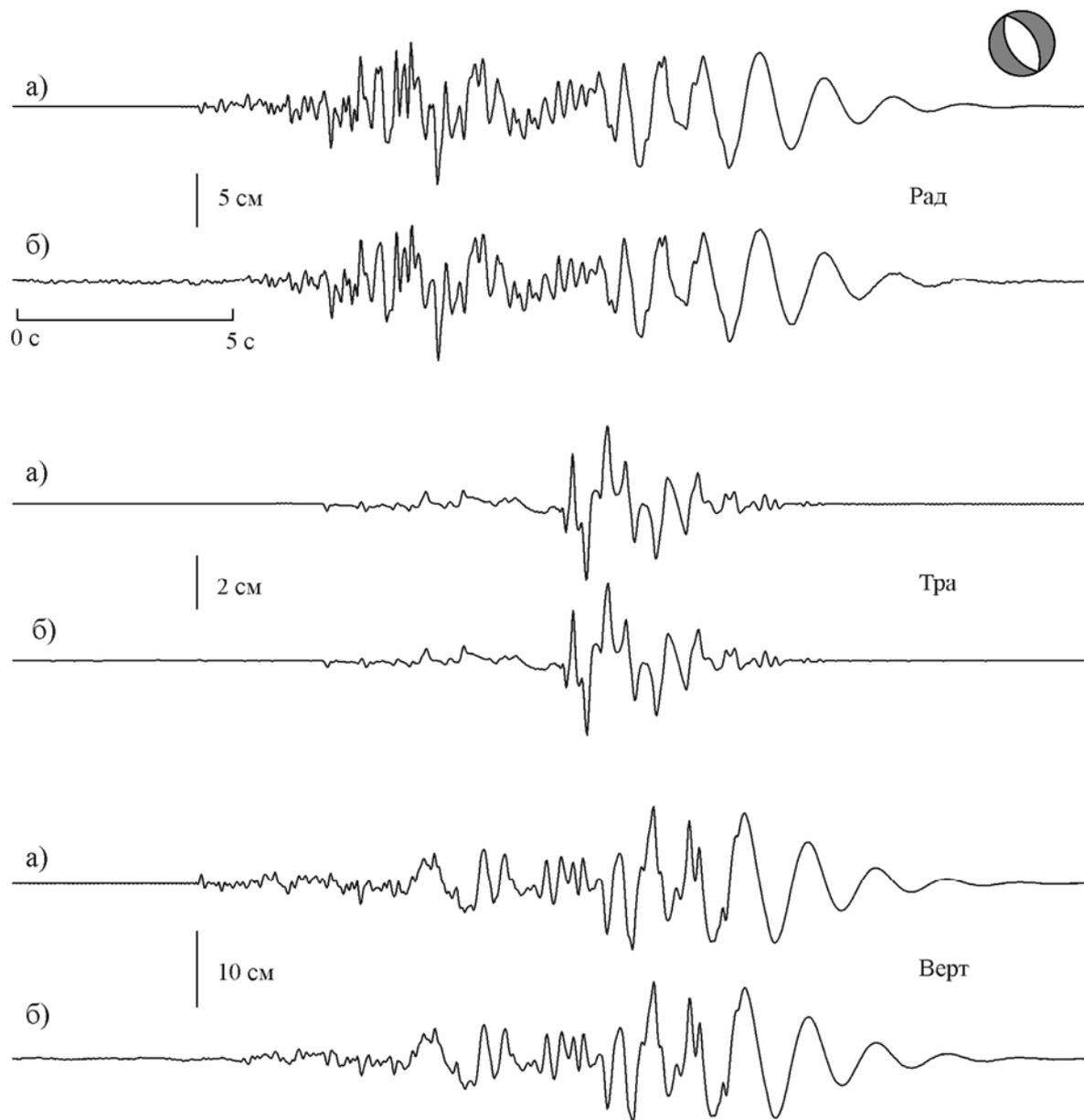


Рис. 2. Сейсмограммы смещений, рассчитанных предложенным методом (кривые а)) и методом суммирования мод поверхностных волн (кривые б)) [6]. Расчет методом суммирования мод проведен Ф. Вакари и Ф. Романелли по собственной программе. Источник - точечный двойной диполь на глубине 0.7 км, $M_w=5.1$. Сейсмограммы рассчитаны в точке на свободной поверхности: эпицентральное расстояние $r=18.09$ км, азимут 146° ; фильтрованы косинусным фильтром в полосе (0, 10 Гц). Параметры среды приведены в таблице 1. Как видно из рисунка совпадение сейсмограмм очень хорошее. Исключение составляет прямые продольные волны. Расхождение объясняется тем, что для этой части сейсмограммы метод суммирования поверхностных волн работает неудовлетворительно.

Таблица 1. Параметры среды в расчете синтетических сейсмограмм при сравнении с методом суммирования мод поверхностных волн

№ слоя	h , км	α , км/с	β , км/с	ρ , г/см ³	Q_α	Q_β
1	1	2,65	1,40	2,30	220	100
2	1,6	3,60	2,50	2,35	220	100
3	1,5	5,50	3,20	2,55	220	100
4	2	6,10	3,50	2,80	220	100
5	9	5,00	2,75	2,75	220	100
6	17	6,32	3,65	3,90	660	300
7	20	7,02	4,05	3,25	660	300
8	∞	8,23	4,75	3,25	660	300

Примечание: h – мощность слоя; α , β – скорости P- и S-волн; Q_α и Q_β – добротности.

Головная волна и статическое смещение

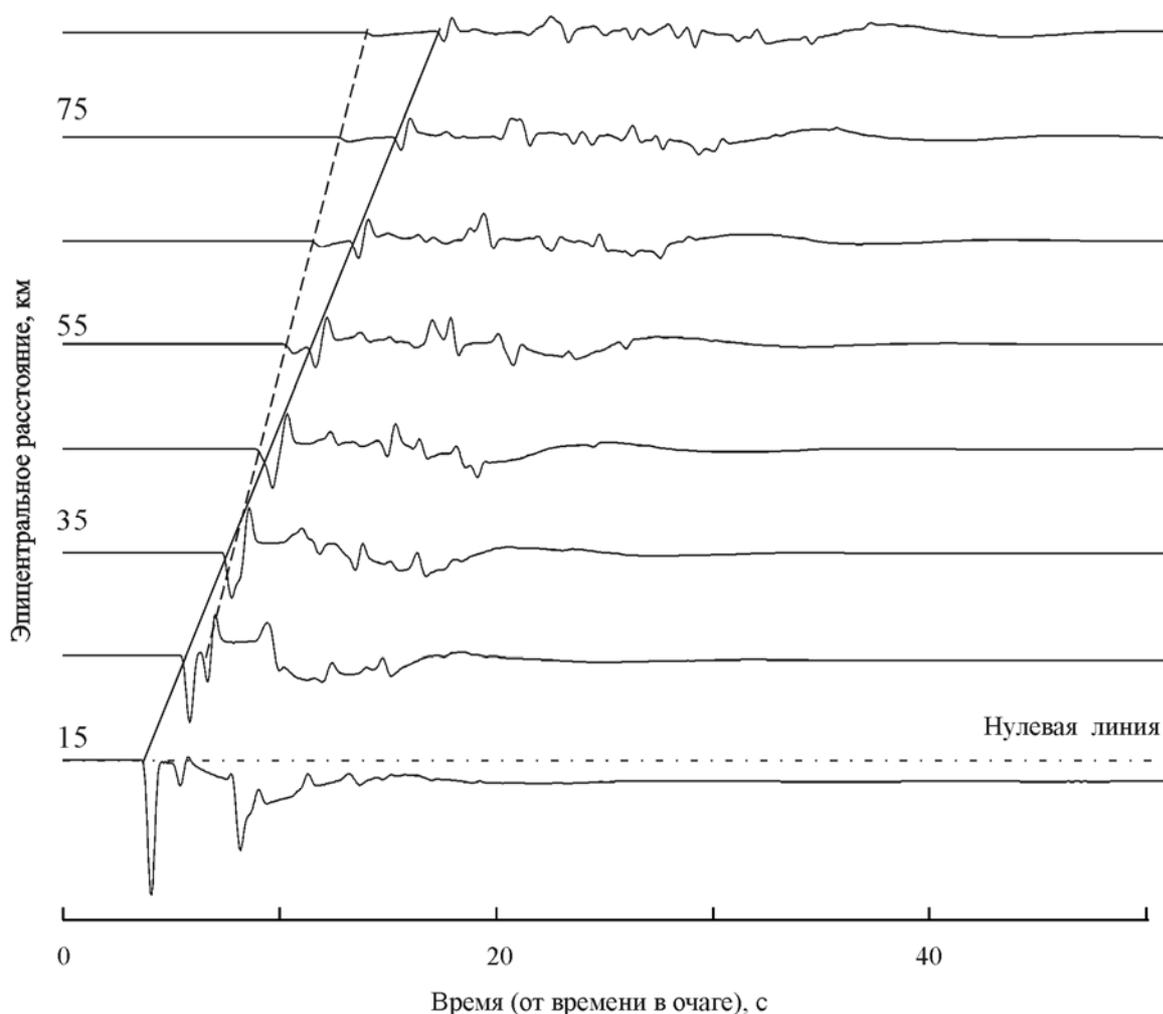


Рис. 3. Синтетические сейсмограммы смещений (вертикальная компонента) от центра расширения на глубине 10 км в слоистой среде (слой мощности 15 км на полупространстве). Параметры среды: плотность 2.8 и 3.1 г/см³, скорости P-волн 5 и 8 км/с, скорости S-волн 2.9 и 4.5 км/с. Косая сплошная линия - вступление P-волны, косая пунктирная линия – вступление головной волны. Наблюдается статическое смещение, наиболее выраженное на ближайшем расстоянии 15 километров.

Моделирование записи Карымского землетрясения 1.01.1996

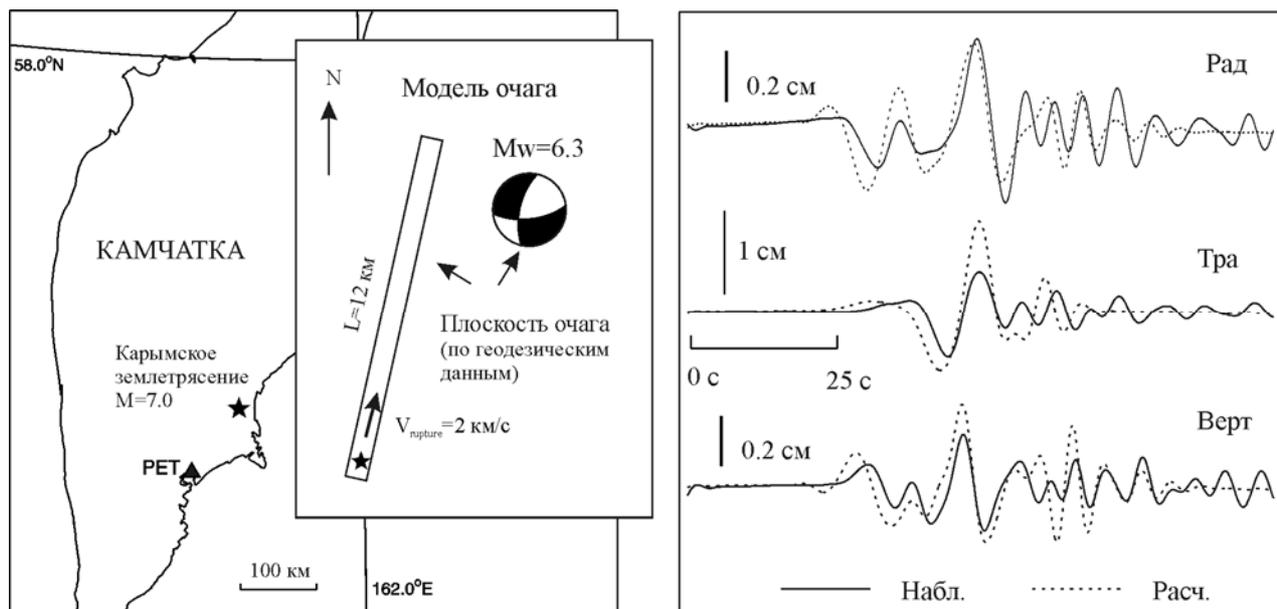


Рис. 4. Сравнение (справа) зарегистрированных на станции РЕТ широкополосных сейсмограмм смещений с модельными сейсмограммами для линейного источника, рассчитанными для стандартной модели среды Камчатки. Сейсмограммы профильтрованы в полосе частот 1/100-1/3 Гц. В качестве модели очага принят линейный источник (слева). Линейный источник имеет длину 12 км и расположен на глубине 4 км. Его направление согласовано с длинной стороной площадки очага (ширина площадки 6 км), определенной по геодезическим данным [8, 2]. При моделировании источник по длине разбивается на 24 точечных субисточника, с одинаковым скалярным сейсмическим моментом $M_0/24$ ($M_0=3.2 \times 10^{18}$ Нм, $M_w=6.3$). Предполагается, что разрыв распространяется с юга на север с постоянной скоростью 2 км/с. Временная функция субисточника – скорость подвижки – сглаженный симметричный треугольник длительностью 1 секунда. Нодальные плоскости механизма и направление подвижки характеризуются значениями углов $\varphi=192.5^\circ/83.8^\circ$ (азимут простираения), $\delta=60^\circ/61^\circ$ (угол падения), $\lambda=-146^\circ/-34^\circ$ (угол скольжения). Первые значения – для истинной плоскости. Величина подвижки 3.6 м. Оценка длительности процесса в очаге 7 секунд.

Выводы

1. Алгоритм позволяет рассчитывать полные синтетические сейсмограммы в широкой полосе частот, включающей, как нулевую частоту (статическое смещение), так и достаточно большие частоты, представляющие интерес.
2. Алгоритм позволяет рассчитывать полные теоретические сейсмограммы, как для близких расстояний, так и для расстояний порядка 3 тысяч километров.

Список литературы

1. Алексеев А.С., Михайленко Б.Г. Метод расчета теоретических сейсмограмм для сложнопостроенных моделей сред // Доклады АН СССР. 1978. Т. 240. № 5. С. 1062-1065.
2. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф., Павлов В.М., Титков В.Н. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 54-67.
3. Павлов В.М. Матричный импеданс в задаче расчета синтетических сейсмограмм в слоисто-однородной изотропной упругой среде // Физика Земли. 2009. № 10. С. 14-24.
4. Фатьянов А.Г. Полуаналитический метод решения прямых динамических задач в слоистых средах // Доклады АН СССР. 1990. Т. 310. № 2. С. 323-327.
5. Olson A.H., Orcutt J.A., Frazier G.A. The discrete wavenumber/finite element method for synthetic seismograms // Geophys. J. R. astr. Soc. 1984. V. 77. P. 421-460.
6. Panza, G.F., Romanelli, F. and Vaccari, F. Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to seismic zonation. Advances in Geophysics. 2001. V. 43. P. 1-95.
7. 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.
8. Pavlov V.M., Levin V.E., Maguskin M.A., Kasahara M. Volcano-seismic crisis of January 1-2, 1996, in Karimsky volcanic center (Kamchatka): elastic modeling of geodetic observations. XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Sapporo, Japan, 2003, Abstracts, p. A555.