

УДК 550.34

© 1995 г. ГУСЕВ А. А., ПЕТУХИН А. Г.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Описан первый вариант алгоритма для оценки параметров возможных сильных колебаний грунта при землетрясениях, ориентированный на инженерно-сейсмологические задачи. Алгоритм имеет следующие особенности: 1) свойства очагов конкретной сейсмической зоны задаются одним из трех способов: первый — используя спектр ускорений Фурье (либо спектр реакции) типового (опорного) землетрясения, зарегистрированного или ожидаемого на опорном расстоянии от очага опорной магнитуды; второй — с помощью региональной модели спектра Фурье ускорений, заданной таблично (для набора магнитуд на одном опорном расстоянии); третий — используя аналитическую спектральную модель; 2) для вычисления уровней спектра и других параметров при произвольных расстояниях и магнитудах использованы законы масштабирования параметров очага и спектральных уровней, а также параметры затухания и рассеивания в среде; 3) грунтовые условия учтены через набор поправок к спектру Фурье для грунтов категорий 2 и 3 относительно грунта категории 1. Приведена структурная схема алгоритма и описания модулей. Приведены примеры расчета спектра Фурье, спектра реакции, максимального ускорения и длительности в зависимости от магнитуды и/или расстояния.

AN ALGORITHM FOR PREDICTING EARTHQUAKE GROUND MOTIONS PARAMETERS, by Gusev A. A. and Petukhin A. G. The first version of algorithm for estimation of earthquake ground strong motions parameters for seismic zoning/engineering application is described. The algorithm has the following features: 1) source properties of a specific seismic zone are specified by one of the three methods: first — using Fourier acceleration spectrum (or response spectrum) of a typical (reference) earthquake, registered or expected at a reference distance from the source of a reference magnitude, second — by means of a regional model of acceleration Fourier spectrum in a tabular form: several magnitudes at the same reference distance, third — using an analytical spectral scaling model; 2) the scaling laws of source parameters and spectral levels, and parameters of attenuation and scattering in the medium are used to find spectral levels and other parameters at arbitrary distances and magnitudes; 3) the ground conditions are accounted for using a tabulated of Fourier spectrum corrections for medium and soft ground categories with respect to rock. The general flowchart, and descriptions of modules are given. The examples include estimated Fourier spectrum, response spectrum, peak acceleration and duration trends magnitude and/or distance.

(Received January 10, 1995)

Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

Прогнозирование параметров сейсмических колебаний грунта при заданных параметрах очага, трассы распространения волн и площадки строительства — одна из важнейших задач в общей проблематике сейсмического районирования. Ее корректное решение затрудняется, среди прочего, отсутствием взаимной согласованности имеющихся эмпирических регрессионных формул для разных параметров колебаний, противоречиями между структурой формул и простейшей теорией формирования колебаний. Ситуация часто усложняется частичным или полным отсутствием эмпирических данных в малоизученных регионах или в регионах со слабой сейсмичностью. В настоящей работе описан первый практический вариант алгоритма с целью прогноза параметров сильных сейсмических

колебаний грунта для конкретного региона с возможностью настройки на регион. В идеале такой прогноз должен был бы учитывать детальные характеристики очага и среды, включая трассу распространения волн и конкретную площадку строительства. Однако достаточно обычным упрощением в инженерной сейсмологии является описание очага через магнитуду, трассы — через гипоцентрального расстояние и площадки — через один из трех типов грунта. В настоящей работе описан вариант такого упрощенного подхода, отличающийся следующими особенностями: 1) свойства очагов конкретной сейсмической зоны задаются через спектр Фурье FS горизонтальных ускорений от условного или реального типового (опорного) землетрясения опорной магнитуды $M_{и0}$, зарегистрированного на скальном грунте на опорном расстоянии r_0 , 2) для перехода к другим значениям r и M_w задаются и используются законы масштабирования очаговых параметров и спектров, параметры поглощения и рассеяния в среде; 3) вариации грунтовых условий учитываются с помощью амплитудно-независимых поправок к спектру за категорию грунта, влияние грунтовых условий на длительность не учитывается.

Для повышения гибкости алгоритма предусмотрены также возможности задать опорный спектр Фурье на основе теоретической модели Бруна или пересчитать его из опорного спектра реакции. На выходе алгоритма могут быть получены все основные параметры колебаний: максимальные скорость и ускорение, длительность, спектры Фурье, реакции, мощности.

Общая структура алгоритма. Назначение модулей. Структурная схема алгоритма (рис. 1) иллюстрирует основные связи между входными, промежуточными и конечными величинами расчета: M_w и r для конкретного очага, параметрами среды и грунтовых условий, характеристиками сигнала в очаге и на расстояниях r_0 и r , параметрами колебаний. В качестве основной входной характеристики для настройки алгоритма на конкретный регион или эпицентральной зону сочтено целесообразным использовать параметры, описывающие спектр Фурье ускорения FS для конкретных фиксированных значений магнитуды $M_w = M_{и0}$ и расстояния $r = r_0$. Эти величины считаются непосредственно известными из наблюдений в данном или другом аналогичном регионе или определяются при неформализованном обобщении данных, или рассчитываются по аналитической модели. Возможен также расчет спектра Фурье по спектру реакции при фиксированных $M_{и0}$ и r_0 .

Далее для заданных входных величин M_w и расстояния до центра очага r рассчитывают поправки к FS на поглощение в среде и на геометрическое расхождение с учетом протяженности источника. Вычисляют поправки к уровню FS , учитывающие различие магнитуд M_w и $M_{и0}$, и отличие грунтовых условий от условий скального грунта. При этом использованы следующие параметры, характеризующие среду: c_s — скорость поперечных волн, Q_0 — добротность среды при $f = 1$ Гц, γ_Q — показатель степени для зависимости добротности от частоты. Для характеристики грунтовых условий использован параметр g — категория грунта.

Существенную роль в расчете играют оценки длительности и протяженности очага. Их оценивают по магнитуде на основе идеи подобия очагов. Конкретный используемый вариант получен в работе [5] на основе обобщения эмпирических данных. Параметры опорного спектра Фурье и поправки использованы для расчета основной характеристики колебаний для заданных M_w и r — спектра Фурье ускорений.

Расчет второй основной характеристики — длительности акселерограммы — проведен на основе предварительно рассчитанных очаговой длительности и компоненты длительности, определяемой средой. Эффект среды в расчете учитывают с помощью параметра τ_{100} , описывающего длительность волнового пакета S -волн от мгновенного источника («импульсную реакцию среды») на гипоцентрального расстоянии 100 км. На основе известного спектра Фурье и длительности далее проводят расчет остальных параметров колебаний.

Исходные данные расчета. Спецификация исходного опор-

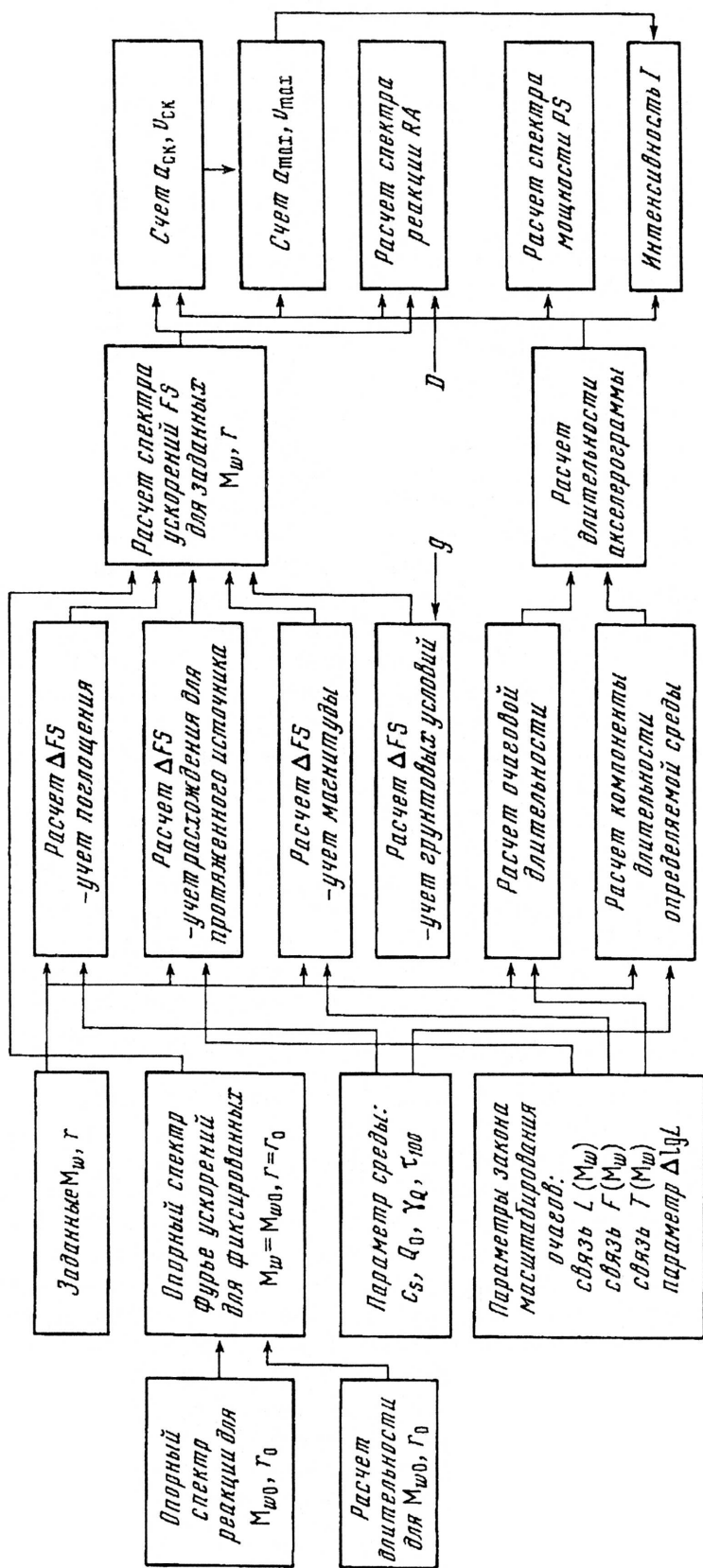


Рис. 1. Структурная схема алгоритма

ного спектра. В основном варианте расчета опорный спектр задается таблично на основе эмпирических данных для региона как фактически наблюдаемый или как прогнозная оценка на основе обобщения различных данных. Предусмотрена возможность расчета опорного спектра по спектру реакции, заданному таблично. В качестве опорного спектра также возможно использование региональной модели спектра, заданной таблично для ряда значений M_w на расстоянии r_0 .

Альтернативный вариант расчета использует аналитическое представление очагового спектра. Применяется известная модель Бруна в варианте Бура и Джойнера [7] с настраиваемыми параметрами: сейсмическим моментом M_0 , сброшенным напряжением $\Delta\sigma$, частотой среза высоких частот f_{max} .

Предусмотрена оценка M_w по M_{LI} на основе таблично заданной регрессионной связи.

С п е ц и ф и к а ц и я с в о й с т в с р е д ы. Считается, что среда представляет собой однородное слабопоглощающее упругое полупространство. Принято также, что среда является рассеивающей, причем энергия при рассеянии не теряется (рассеяние «вперед»), а роль рассеяния в том, что длительность записи от мгновенного источника нарастает с расстоянием. Фактически на частотах ~ 1 Гц эффекты рассеяния «вперед» и дисперсии неразделимы, в программе не учитываются суммарный эффект на эмпирической основе.

С п е ц и ф и к а ц и я з а к о н а м а с ш т а б и р о в а н и я с п е к т р о в и п а р а м е т р о в о ч а г а. В основном варианте при расчете поправок и при расчете полной длительности важнейшую роль играют используемые законы масштабирования спектров и параметров очага. Фактически используемый закон получен на основе обобщения эмпирических данных и с учетом гипотезы подобия очагов. Предполагается степенной рост размера и длительности очага от момента M_0 .

При расчете длины очага L (следуя работе [5]) в предположении о строгом подобии принимали

$$\lg L = 0,5M_w - 1,85 + a. \quad (1)$$

Здесь $a = \Delta \lg L$ — поправка, связанная с возможным отклонением сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ от среднего. Выражение (1) используется затем для расчета очаговой длительности в предположении, что

$$L = T_{ст}v. \quad (2)$$

Приняли $v = 3,5$ км/с, согласно работе [5].

Зависимость спектра Фурье ускорения короткопериодного излучения от магнитуды M_w задавали с учетом эмпирических данных о зависимости $FS(M_w)$. Такие данные есть двух типов — по ближней зоне и телесеismicкие. Хотя в принципе данные ближней зоны предпочтительнее, степень их надежности и обоснованности в области моментных магнитуд 7—9 низка даже для наилучшим образом изученных регионов — Калифорнии и Японии. В этой связи приняты решения: во-первых, принять форму спектра не зависящей от магнитуды; во-вторых, тренд спектра задать на основе телесеismicких данных [10] как

$$\lg(FS) = 0,6 M_w + const. \quad (3)$$

Напомним, что спектральная модель Бруна предсказывает на высоких частотах более медленный рост, с коэффициентом 0,5.

Данный элемент алгоритма имеет предварительный характер.

Расчет спектра Фурье ускорений. Учет поглощения. Неупругое поглощение в среде учитывается с помощью поправочного множителя к спектру, имеющего вид

$$K_Q(f) = \exp\left(-\frac{\pi f r}{Q(f) c_s}\right), \quad (4)$$

Поправки к спектру Фурье на грунтовые условия

Категория грунта	f, Гц								
	0,20	0,32	0,5	1	2	3,2	5	10	20
2	0,15	0,22	0,26	0,29	0,23	0,18	0,10	0	-0,10
3	0,27	0,40	0,48	0,55	0,43	0,27	0,11	-0,10	-0,30

в котором частотно-зависимая добротность задается формулой

$$Q(f) = \begin{cases} Q_0 & \text{при } f < f_0 = 1 \text{ Гц,} \\ Q_0 f^{\alpha} & \text{при } f \geq f_0 = 1 \text{ Гц.} \end{cases} \quad (5)$$

Учет расхождения при протяженном очаге. Уровень спектра Фурье вблизи протяженного очага будет ниже, чем в предположении точечного источника, из-за уменьшения эффективной площади излучателя при приближении точки прisma к очагу. В работе [11] описано специальное исследование выбора оптимального варианта среди нескольких формул, описывающих поле излучения вблизи протяженного очага. Сравнивали четыре формулы:

— простейшую, которая описывает обычное насыщение уровня спектра Фурье вблизи очага:

$$K_r = (R_{\text{эф}}^2 + r^2)^{-1/2}, \quad (6)$$

и соответствует светотехнической модели — круговой площадке, излучающей по закону Ламберта;

— формулу Гусева из работы [3]:

$$K_r = \left[\frac{1}{R_{\text{эф}}^2} \ln \left(\frac{r^2 + R_{\text{эф}}^2}{r^2 + R_c^2} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

(здесь R_c — радиус когерентности источника, принято $R_c = 1$ км), отличающуюся от предыдущей использованием более реалистической изотропной диаграммы излучения элементарного излучателя; а также два модифицированных варианта этих формул. Результаты подгонки калифорнийской базы данных с использованием каждой из формул показали явные преимущества формулы (7). Именно она была затем применена как важный компонент рекомендуемых расчетных прогнозных формул для Калифорнии. Описанное исследование на основе наиболее богатой в мире региональной базы данных позволяет с уверенностью использовать в алгоритме формулу (7).

Для эффективного (по интенсивности излучения) радиуса очага $R_{\text{эф}}$, следуя работе [3], использована оценочная зависимость

$$R_{\text{эф}} = \frac{1}{2} (LW)^{1/2} \approx 0,4L. \quad (8)$$

Результат используется в формуле (7).

В другом, более аккуратном варианте расчета поправки на конечный размер источника используется программа численного расчета поля излучения от прямоугольного очага Гусева и Шумиловой. В этом случае принятая форма очага ближе к реальности.

Учет магнитуды. Для учета влияния магнитуды на уровень спектра из формулы (3) получаем

$$FS(M_w) = K_m FS(M_{w0}), \quad (9)$$

где

$$\lg K_m = 0,6 (M_w - M_{w0}). \quad (10)$$

Для диапазона частот 0,5—10 Гц выражение (3) приемлемо в пределах интервала

магнитуд $M_w = 6,5...9$. Параметры уравнения (3) могут быть изменены при настройке на определенный регион.

В альтернативном варианте расчета учет магнитуды производится автоматически в силу аналитического характера модели.

Учет грунтовых условий. Грунтовые условия учитываются с помощью поправок к $lgFS(r, M_w)$, вводимых при помощи таблицы. Согласно принятой классификации, грунтовые условия делятся по категориям грунта: категории 1—3 (соответственно скальные, средние и мягкие). Зависимость поправок от толщины слоя грунта и от уровня сейсмических воздействий не учитывается. Длительность колебаний для всех типов грунтов принимается равной длительности на скальном грунте. В качестве примера в таблице приведен рекомендованный для Камчатки вариант таких поправок, построенных в работе [4] с целью учета как усиления в низкоимпедансном слое, так и нелинейных эффектов при сильных ($a_{max} = 0,1...0,2 g$) колебаниях грунта.

Расчет спектра Фурье. Значение спектра Фурье для заданных V_w и r рассчитывают по одному из трех вариантов расчетной схемы: 1 — по значениям опорного спектра Фурье для фиксированных $M_w = M_{w0}$ и $r = r_0$; 2 — по региональной модели $FS(f, M_w)$ для фиксированного r_0 ; 3 — по очаговому спектру, полученному из аналитической модели.

В варианте 1 для заданных значений r и M_w уровень спектра Фурье определяется по формуле

$$FS(f|r, M_w) = FS(f|r_0, M_{w0}) K_m K_Q(f) K_r K_g, \quad (11)$$

где K_m , K_Q , K_r и K_g — поправочные коэффициенты, учитывающие магнитуду землетрясения, поглощение, расхождение и грунтовые условия согласно формулам (10), (4), (7) и приведенной таблице соответственно. Для иллюстрации данной расчетной схемы в программе принят усредненный спектр для сильных землетрясений Камчатки, полученный в работе [4; рис. 4] для $M_{w0} = 8,4$ и $r_0 = 80$ км.

В вариантах 2 и 3 уровень спектра Фурье определяется по аналогичной формуле, в которой значение $FS(f|r_0, M_{w0})$ определяется путем интерполяции табличных значений или рассчитывается аналитически соответственно.

Расчет длительности. С удалением от разрыва очаговый импульс растягивается за счет рассеяния и дисперсии в среде. Простейшая теория указывает, что действие рассеивающей среды на некогерентный импульс может быть описано как свертка его квадрата огибающей с квадратом огибающей импульсной реакции среды (с «функцией Грина по мощности»). При этом квадрат среднеквадратической длительности их свертки будет равен сумме квадратов среднеквадратических длительностей огибающих (желание использовать этот полезный факт и является причиной введения нового параметра T_{ck}). Этот точный результат для некогерентных узкополосных квазистационарных сигналов можно применить как приближенный в пределах всей полосы 0,5—10 Гц.

Расчет очаговой длительности. Для модельного сигнала с прямоугольной огибающей и с полной длительностью T_m среднеквадратическая длительность T_{ck} связана с T_m соотношением

$$T_{ck} = T_m / \sqrt{12} \quad (12)$$

(это известный результат о дисперсии равномерного закона в теории вероятностей). Считая для источника $T_m = T_{ист}$ из формулы (2) и используя формулу (12), получим T_{ck} для источника, которую обозначим через $T_{ист,ck}$.

Расчет компоненты длительности, определяемой средой. Среднеквадратическая длительность импульсной реакции среды оценивается по эмпирической формуле

$$T_{cp} = \tau_{100} (r^n / 100), \quad (13)$$

в которой показатель степени n_m принят равным единице, а параметр τ_{100}

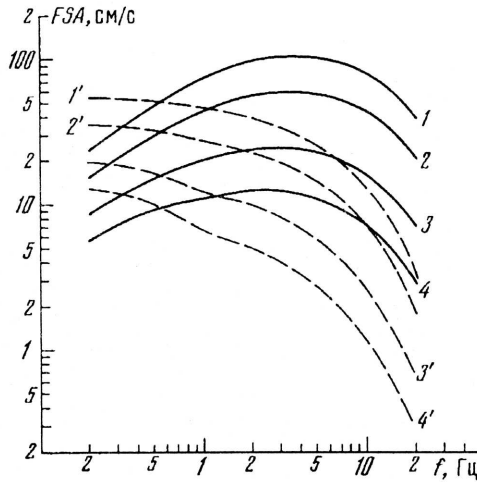


Рис. 2. Примеры расчета спектра Фурье ускорений $FSA(f)$ для $W_w = 8$ и $r = 25, 50, 100$ и 150 км ($1, 1' - 4, 4'$ соответственно). В качестве опоры использованы рекомендованный для Камчатки спектр [5] ($1-4$) и аналитическая модель Бруна ($1'-4'$)

(длительность при $r = 100$ км) является настраиваемым входным параметром алгоритма.

Расчет длительности акселерограммы. Полную среднеквадратическую длительность рассчитываем по формуле

$$T_{ск} = (T_{ист.ск}^2 + T_{сп}^2)^{1/2}. \quad (14)$$

При расчете пикового ускорения и спектра реакции в области максимальных амплитуд акселерограммы в качестве характеристики длительности удобно использовать «эффективную длительность» $T_{эф}$ — длительность эквивалентного по энергии сигнала с прямоугольной огибающей и среднеквадратической амплитудой, равной среднеквадратической амплитуде исходного сигнала в области максимума:

$$T_{эф} \approx 2T_{ск}. \quad (15)$$

Коэффициент 2 в формуле (15) предварительный и может потребовать некоторого уточнения.

Расчет параметров колебаний грунта. Счет спектра мощности. Спектр мощности $PS(f)$ рассчитывают по простой формуле

$$PS(f) = FS^2(f)/T_{эф}. \quad (16)$$

Расчет $a_{ск}$ и $v_{ск}$. Среднеквадратическое ускорение оценивается из известного равенства Парсеваля для энергий сигнала в частотной и временной области:

$$a_{ск}^2 T_{эф} = 2 \int_0^{\infty} FS^2(f) df. \quad (17)$$

Среднеквадратическую скорость $v_{ск}$ рассчитывают по аналогичной формуле, в которой $FS(f)$ заменяется на

$$FSV(f):FSV(f) = FS(f)/2\pi f. \quad (18)$$

Расчет a_{max} и v_{max} . Превышение максимального значения экстремума ускорения a_{max} над среднеквадратическим ускорением оценивают по формуле, справедливой для отрезка Гауссова процесса [2]:

$$a_{max}^2 = (\ln(n) + 0,577) a_{скз}^2, \quad (19)$$

где $n \approx 2f\hat{T}_{эф}$ — число экстремумов, a_{ck} — среднеквадратический экстремум. Через \hat{f} обозначена средняя частота, рассчитываемая как

$$\hat{f} = \int_0^{\infty} fFS^2 df / \int_0^{\infty} FS^2 df. \quad (20)$$

Для оценки a_{ck} считаем, что $a_{ck}^2 = 2a_{ck}^2$ (точный результат для математических ожиданий для широкого класса случайных процессов). Окончательная формула для расчета

$$a_{max} = a_{ck} [2 (\ln (2\hat{f}T_{эф}) + 0,577)]^{1/2}. \quad (21)$$

Гауссов закон для отсчетов акселерограммы принят по традиции и, возможно, нуждается в корректировке.

Алгоритм расчета максимальной скорости не отличается от такового для ускорения, лишь $FS(f)$ заменено в счете f на $FSV(f)$ по формуле (18).

Расчет спектра реакции по ускорению RA . Оценка спектра реакции RA по спектру Фурье FS рассчитана с помощью компактной системы расчетных формул, полученной в работе [4]:

$$\begin{aligned} RA(f) &= 2\pi fRV(f), \\ RV(f) &= C_v |FS(f)|, \\ C_v &= \frac{A(q)}{2q} (1 - e^{-2q}), \end{aligned} \quad (22)$$

$$A(q) = \begin{cases} 1 & \text{при } q \leq 1, \\ \sum_{i=1}^n 1/i & \text{при } 1 < q < 16, \\ \ln(n) + 0,577 & \text{при } q \geq 16, \end{cases}$$

где $q = T_{эф}/T_{occ}$; $T_{occ} = 1/(2\pi fD)$ — характерное время переходного процесса в осцилляторе с собственной частотой f и затуханием D ; $n = (q-1)/\pi$ — число независимых экстремумов.

Заметим, что приведенные выше формулы приемлемы при $D \ll 1$. Типичным и фактически зафиксированным значением является $D = 0,05$.

Расчет балльности. Сейсмическая интенсивность (балльность) оценивается по известной формуле Аптикаева [1]

$$I = 3,3 (\lg a_{max} + 0,44 \lg T_{эф}) + C. \quad (23)$$

Значение константы принято $C = -0,45$, исходя из требования совпадения двух оценок интенсивности:

1) по формуле (23) со значениями a_{max} и $T_{эф}$, полученными в расчетной схеме при значениях $M_w = 6$ и $r = 50$ км;

2) по формуле Шебалина [6] с $M_{LH} = 6,0$ (соответствует $M_w = 6$) и $r = 50$ км.

Задача аккуратной подгонки соответствия между I и параметрами колебаний решается при настройке модели на конкретный регион.

Примеры расчета.

Приведенный алгоритм реализован в программе ССК. Для иллюстрации характера работы алгоритма и программы приведен расчет зависимостей параметров $FSA(f)$, $FSA(r)$, $T_{эф}(r)$, $a_{max}(r)$, $RV(f)$, $RA(f)$. При расчете пяти первых зависимостей за опору принимали рекомендованный для Камчатки спектр из работы [4] для $M_{w0} = 8,4$ и $r_0 = 80$ км. Расчет проводили в диапазоне расстояний от 20 до 200 км для значений магнитуд $M_w = 6,7$ и 8 со следующим основным набором параметров: $Q_0 = 180$, $\gamma_2 = 0,75$, $C_s = 3,5$ км/с, $\tau_{100} = 3,5$ с, $\Delta \lg L = 0$. Грунтовые условия (если не оговорено особо) принимались как для скального грунта.

Примеры расчета спектра Фурье. На рис. 2 приведены примеры расчета

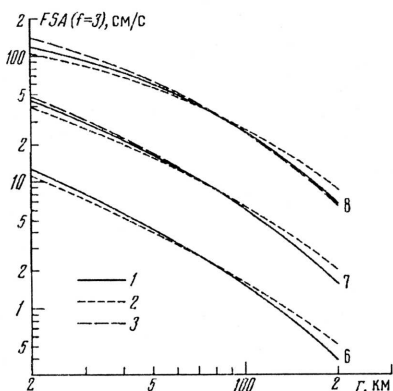


Рис. 3

Рис. 3. Пример расчета зависимости спектра Фурье ускорения $FSA(f=3)$ от расстояния r : 1 — расчет с основным набором параметров, 2 — при вариации $Q_0 = 270$, 3 — при вариации $\Delta \lg L = -0,17$. Цифры справа от кривых — магнитуда M_w

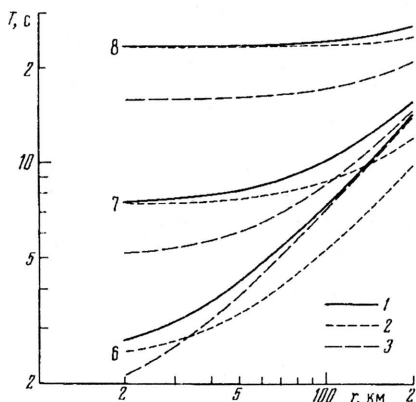


Рис. 4

Рис. 4. Пример расчета зависимости эффективной длительности $T_{эф}$ от расстояния: 1 — расчет с основным набором параметров, 2 — при вариации $\tau_{100} = 2,4$ с, 3 — при вариации $\Delta \lg L = -0,17$

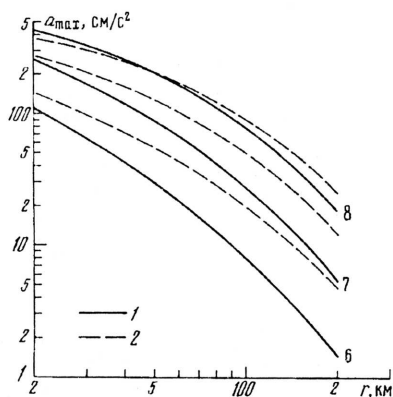


Рис. 5

Рис. 5. Пример расчета зависимости a_{max} от r для магнитуд $M_w = 6, 7$ и 8 (1). Для сравнения даны $a_{max}(r)$ по данным работы [9] для тех же магнитуд (2)

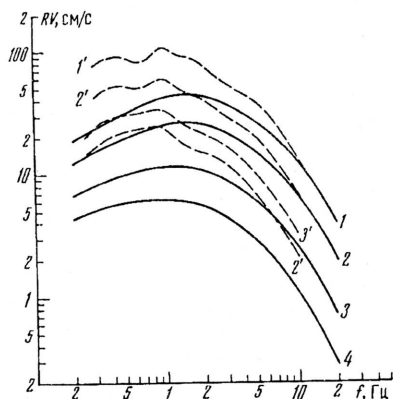


Рис. 6

Рис. 6. Пример расчета спектра реакции по скорости $RV(f)$ для $M_w = 8$, $r = 25, 50, 100$ и 150 км (1—4 соответственно), средний грунт (1—4). Для сравнения даны спектры реакции $RV(f)$ по данным работы [8] для тех же M_w и r (1'—4')

спектра Фурье ускорений в диапазоне частот 0,2—20 Гц для $M_w = 8$ и расстояний $r = 25, 50, 100$ и 150 км. В качестве опоры использованы рекомендованный для Камчатки спектр [4] и аналитическая спектральная модель Бруна [7]. При расчете по модели Бруна использованы параметры, типичные для зон субдукции: сброшенное напряжение $\Delta\sigma = 50$ бар, $C_s = 3,5$ км/с, частота среза высоких частот $f_{max} = 10$ Гц. Уровень спектра Бруна на высоких частотах заметно ниже уровня камчатского спектра. Это известная характерная особенность модели Бруна, не учитывающей разницы между глобальным и локальным сброшенными напряжениями.

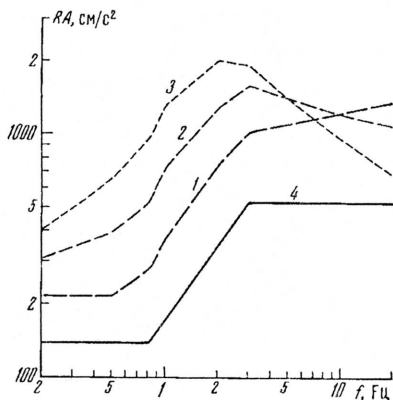


Рис. 7

Рис. 7. Пример расчета спектра реакции по ускорению $RA(f)$ для разных категорий 1—3 грунта при $M_w = 7,4$ и $r = 30$ км (1—3 соответственно); 4 — опорный спектр реакции по СНиП II-7-81 для $M_w = 8$ и $r = 100$ км

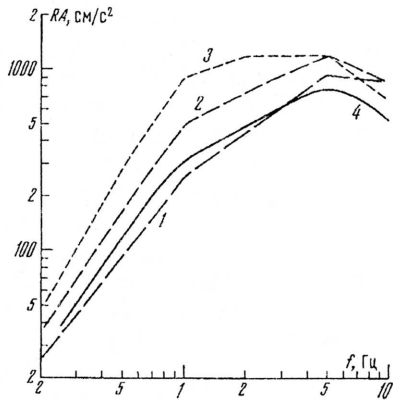


Рис. 8

Рис. 8. Пример расчета спектра реакции по ускорению $RA(f)$ для $M_w = 7,4$ и $r = 30$ км: 1—3 — грунты категории 1—3 соответственно; 4 — опорный спектр реакции из работы [8] для тех же M_w и r

Зависимости $FSA(r)$ и $T_{эф}(r)$. Вариации основных параметров. Для иллюстрации влияния значений параметров алгоритма на основные характеристики акселерограммы (спектр Фурье и длительность) расчет зависимостей $FSA(r)$ и $T_{эф}(r)$ выполнен как для основного набора параметров, так и при измененных в 1,5 раза значениях Q_0 , τ_{100} и $\Delta \lg L$. Зависимость $FSA(r)$ рассчитывали в области максимума спектра при $f = 3$ Гц. Результаты показаны на рис. 3 и 4. Опишем характерные особенности кривых. Во-первых, зависимость от расстояния имеет область насыщения вблизи очага (ближняя зона, характерный размер которой соответствует размеру очага. Во-вторых, зависимость FSA (а также a_{max}) от магнитуды M_w вблизи очага слабее, чем зависимость от M_w в дальней зоне, что соответствует гипотезе стабильности потока мощности с единицы площади очага. В-третьих, в дальней зоне длительность монотонно увеличивается из-за рассеяния импульса в среде. При анализе кривых 2 необходимо учесть, что уровень спектра на расстоянии r_0 фиксирован, поэтому кривые зависимостей при вариации параметров Q_0 и $\Delta \lg L$ имеют общую точку при принятом $r_0 = 80$ км.

Зависимость $a_{max}(r)$. Расчет зависимости $a_{max}(r)$ выполнен для значений магнитуд $M_w = 6, 7$ и 8. Результаты расчета приведены на рис. 5. При анализе зависимостей в условиях Камчатки следует исходить из следующего соответствия: ($M_w = 8$) → ($M_{LH} = 7,9$); ($M_w = 7$) → ($M_{LH} = 7,3$); ($M_w = 6$) → ($M_{LH} = 5,9$). Для сравнения приведены зависимости $a_{max}(r)$, полученные по эмпирическим данным в работе [9] для Японии при тех же значениях M_w .

Пример расчета $RV(f)$. Расчет спектра реакции по скорости $RV(f)$ выполнен для магнитуды $M_w = 8$, расстояний $r = 25, 100$ и 150 км и среднего грунта. Результаты приведены на рис. 6. Для сравнения даны результаты расчета для тех же магнитуды и расстояний, выполненного по эмпирическим формулам, полученным для Японии (Северный Хонсю) в работе [8].

Примеры расчета $RA(f)$. На рис. 7 приведен пример расчета спектра реакции по ускорению по схеме расчета со спектром реакции в качестве опорного. Опорным взят спектр реакции из СНиП II-7-81 при $a_{max} = 175$ см/с² (примерно соответствует $M_w = 8$, $r = 100$ км, скальный грунт). На рисунке приведен исходный спектр, а также спектры реакции, рассчитанные для трех типов грунтов при $M_w = 7,4$ на расстоянии $r = 30$ км.

При расчете спектров реакции по ускорению на рис. 8 в качестве опоры взят

спектр реакции по скорости из работы [8]. Приведены спектры реакции для трех типов грунтов при $M_w = 7,4$ и $r = 30$ км, а также спектр реакции, непосредственно рассчитанный по данным работы [8] для тех же магнитуды и расстояния.

Выводы. Описанные алгоритм и программа используют идеологию формулы (3) и на ее основе реализуют новую методику совместного прогноза полного набора параметров сильных сейсмических колебаний грунта. Методика обладает рядом существенных преимуществ над эмпирическими расчетными формулами, поскольку явно учитывает ряд сложных нелинейных взаимосвязей между параметрами колебаний и свойствами очага и среды, дает внутренне согласованные результаты по набору параметров. Для практического применения в условиях конкретного региона необходима соответствующая настройка программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антикаев Ф. Ф. Учет длительности колебаний при инструментальной оценке сейсмической интенсивности//Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1976. С. 234—239.
2. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
3. Гусев А. А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения//Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 3—22.
4. Гусев А. А. Предварительный вариант расчетных сейсмических нагрузок для Петропавловска-Камчатского//Вопр. инж. сейсмологии. 1990. Вып. 31. С. 67—85.
5. Гусев А. А., Мельникова В. Н. Связи между магнитудами среднемировые и для Камчатки//Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55—63.
6. Шебалин Н. В. Об оценке сейсмической интенсивности//Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1976. С. 87—109.
7. Boore D. M. Short-period P- and S-wave radiation from large earthquakes: implications for spectral scaling relations//BSSA. 1986. V. 76. № 1. P. 43—64.
8. Crouse C. B., Yogesh K. V., Bruce A. S. Ground motions from subduction-zone earthquakes//BSSA. 1988. V. 78. № 1. P. 1—25.
9. Fukushima Y., Tanaka T. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan//BSSA. 1990. V. 80. № 4. P. 757—783.
10. Gusev A. A. Intermagnitude relationships and asperity statistics//PAGEOPH. 1991. V. 136. P. 517—527.
11. Trifunac M. D., Lee V. W. Frequency dependent attenuation of strong earthquake ground motion//Soil Dyn. and Earthquake Eng. 1990. V. 9. № 1. P. 3—15.

Институт вулканической геологии
и геохимии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
10.01.1995