

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34.013

О ВОЗМОЖНОСТИ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ДИНАМИКОЙ СОСТОЯНИЯ
СЕЙСМОГЕННОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ p -ПАРАМЕТРА

В.И. Щеглов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Предлагается энергетическая модель очага землетрясения, позволившая создать методику массового определения таких количественных параметров очага, как скачок напряжений $\Delta\sigma$, величина подвижки D , длина L и ширина W очага. Все эти величины определяются через интегральный очаговый параметр p :

$$p = 2(4/\pi) (V_S/C_L) \sqrt[3]{E_c/M_0}; M_0 = \mu k p W^3;$$

$$E_c = (\pi/4) \mu k^2 p^4 W^3 = \mu k^2 p^5 V; W = \sqrt[3]{M_0/\mu k p};$$

$$V = (\pi/4) L W^2 \text{ — объем очага};$$

$$\Delta\sigma = \mu k p^2; \Delta\varepsilon = k p^2; D = W k p^2;$$

$$k = (1/8) (\pi/4)^2 (C_L/V_S)^3; f_0 = \frac{1}{2} \frac{V_S}{W} \sqrt[3]{p}.$$

Здесь E_c — сейсмическая энергия, M_0 — сейсмический момент, f_0 — угловая частота спектра излучения, C_L — скорость распространения фронта дислокации в очаге, V_S — скорость поперечных волн, $\Delta\varepsilon$ — скачок упругих деформаций.

С физической точки зрения параметр p является интегральным параметром сейсмогенной среды, характеризующим отклик очаговой среды на воздействие (скорость деформирования). Ввиду неединственности решения обратной задачи очага невозможно определить истинные значения p -параметра и других динамических параметров. В этом и нет необходимости, поскольку новую полезную информацию можно получить только при исследовании пространственно-временных вариаций p -параметра и других очаговых характеристик. Это позволит более конструктивно решать проблемы прогноза сейсмической активности и сейсродинамического районирования.

Приведены результаты массового определения очаговых параметров. Показано, что параметр p для одних и тех же энергетических классов меняется в зависимости от изменения потока энергии, поступающего в сейсмогенную среду (например, изменение уровня воды в Нурекском водохранилище). Обсуждается возможность определения места и времени будущего землетрясения на основе изучения пространственно-временных вариаций p -параметра.

Сейсмогенная среда, воздействие—отклик, очаговые параметры, пространственно-временные вариации, прогноз сейсмической активности.

POSSIBILITY TO MONITOR THE STATE OF SEISMOGENIC MEDIA USING p PARAMETER

V.I. Scheglov

The paper presents an energy model of an earthquake source as a basis for estimating quantitative source parameters. Stress change ($\Delta\sigma$), slip (D), and the source length (L) and width (W) are found using the integral source parameter p as

$$p = 2(4/\pi) (V_S/C_L) \sqrt[3]{E_s/M_0}; M_0 = \mu k p W^3;$$

$$E_s = (\pi/4) \mu k^2 p^4 W^3 = \mu k^2 p^5 V; W = \sqrt[3]{M_0/\mu k p};$$

$$V = (\pi/4) L W^2 \text{ — source volume};$$

$$\Delta\sigma = \mu kp^2; \quad \Delta\varepsilon = kp^2; \quad D = Wkp^2;$$

$$k = (1/8) (\pi/4)^2 (C_L/V_S)^3; \quad f_0 = \frac{1}{2} \frac{V_S}{W} \sqrt[3]{p},$$

where E_S is the seismic energy, M_0 is the seismic moment, f_0 is the angular frequency, C_L is the velocity of deformation front in the source, V_S is the shear velocity, and $\Delta\varepsilon$ is the strain change.

In terms of physics, the parameter p is an integral parameter of a seismogenic medium which characterizes its response to propagating deformation. The true values of the p parameter, as well as of other dynamic parameters, are impossible to estimate the solution of the inverse source problem being ambiguous. Yet, there is no need in true values as the necessary information comes from space-time variations of p and other source parameters. This approach may allow more efficient solutions to the problems of earthquake prediction and seismic zoning.

Results of mass measurements of the p parameter show that it varies in earthquakes of the same energy class as a function of energy flux to the seismogenic medium (e.g., the water level in the Nurek water reservoir). Space-time variations in the p parameter can be used as diagnostic of the location and time of future events.

Seismogenic medium, effect–response, source parameters, space-time variations, earthquake prediction

Одной из важных проблем современной сейсмологии является прогноз сейсмической активности и, по возможности, сильных землетрясений. Для этого, в первую очередь, необходимо построение количественной классификации землетрясений с использованием не только каталоговых данных, но и дополнительной информации о физико-механических параметрах очаговой среды. Получение необходимой дополнительной информации связано с решением задачи определения таких динамических (количественных) параметров очага, как его геометрические размеры (объем, длина, ширина), величина подвижки, сброшенное напряжение. Идея решения такой обратной задачи заключается в том, чтобы на основании определенной математической модели очага землетрясения рассчитать теоретические сейсмограммы и спектры излучения и путем подбора параметров излучателя и упругих характеристик окружающей среды достичь максимального соответствия теоретических и наблюдаемых сейсмограмм и спектров излучения, получить формулы, связывающие характеристики излучения с очаговыми параметрами. Таким способом можно было бы давать количественные оценки очаговых параметров для отдельных землетрясений, но без уверенности в их надежности, поскольку решение обратной задачи неединственно.

История развития идей в математическом моделировании происходящего землетрясения от точечных и дислокационных источников до динамических моделей очага подробно обсуждена в работах [1—3], там же приведена обширная библиография, посвященная этому наиболее развитому направлению в теоретической сейсмологии. Все задачи математического моделирования очага могут быть разделены на кинематические и динамические. Они формально описывают один и тот же процесс — разрушение среды по некоторой поверхности разрыва, но разными способами. Кинематическое описание заключается в задании скачка смещения как функции координат и времени, т. е. траекторией относительного движения всех частиц среды, соседствовавших до возникновения разрыва — „дислокационные модели“. Динамические задачи описывают разрыв как трещину, когда на поверхности разрыва задается распределение напряжений перед его образованием, закон взаимодействия берегов и формулируются некоторые физические законы, управляющие распространением края разрыва. В результате решения должно быть найдено распределение скачка смещения на разрыве, после чего возможно определять, как и в кинематических задачах, поле упругих смещений в любой точке среды. Общий недостаток как кинематического, так и динамического подхода заключается в том, что при постановке этих задач существует произвол в выборе свободных параметров. Если в кинематической постановке произвольно задается скачок смещения (постоянный или зависящий от времени), не связанный с характеристиками напряженного состояния, то в динамике для отыскания распределения скачка смещений по разрыву произвольными являются распределение в пространстве начальных напряжений и прочность среды. Присутствие такой неопределенности при постановке прямых задач, вообще говоря, исключает возможность строгого решения обратной задачи.

В работе [4] решена прямая кинематическая задача для излучающего очага, при постановке которой учитывалась связь реализованной подвижки (скачка смещения) с напряженно-деформированным состоянием очаговой среды [5—7]. Рассматривался очаг землетрясения в виде вытянутого в направлении оси Z цилиндра с диаметром основания W , равным диаметру упругопластической зоны на конце трещины продольного сдвига при антиплоской деформации (рис. 1).

Предполагается, что весь подготовленный к разрушению объем заполнен эквивалентными точечными источниками. Задача сводится к плоской, и в дальнейшем при решении прямой кинематической задачи рассматривается излучающая площадка длиной L и шириной W с распределенными на ней эквивалентными точечными источниками. Величина подвижки, как упоминалось выше, задавалась не произвольно, она связана с напряженно-деформированным состоянием среды [5—7] $D = W \Delta\varepsilon$, где

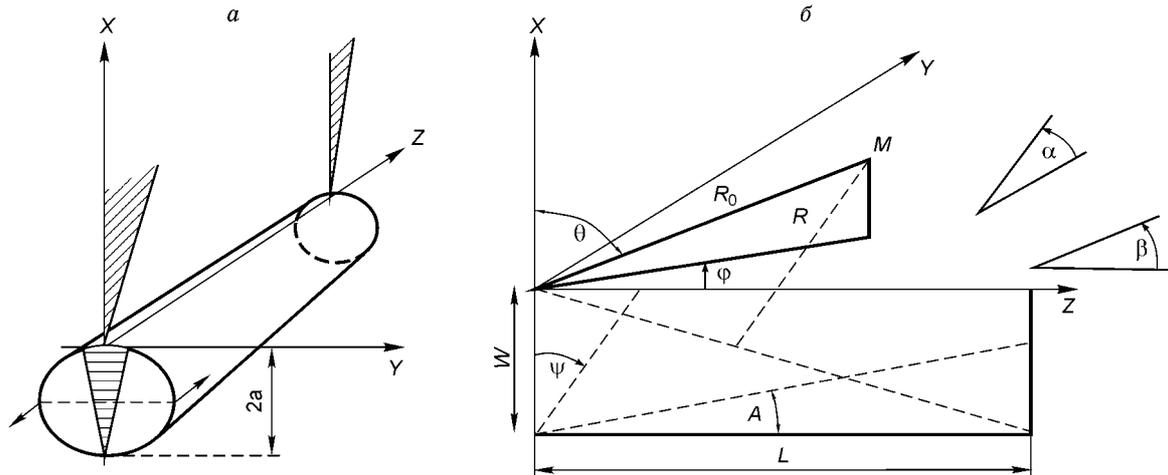


Рис. 1. Модель очага землетрясения (а) и геометрия площадки разрыва (б).

$2a - W$ — диаметр упругопластической зоны на конце трещины продольного сдвига; φ, α, β — углы поворота осей; θ — угол между нормалью к поверхности и гипоцентральной расстоянием R_0 ; R — бегущее расстояние от элементов излучающей площадки до точки наблюдения.

$\Delta \varepsilon$ — скачок упругой деформации в результате подвижки по плоскости разрыва. Принимается, что реализованная подвижка равномерно распределена по плоскости разрыва, т. е. это усредненная величина. Такие же оценки величины подвижки даны в [6, 8].

В [4] приведены выражения для модулей амплитудных спектров объемных волн:

$$\begin{aligned} |\hat{u}_P(R_1, \varphi, \theta, \omega)| &= \frac{M_0}{4\pi\rho V_P^2} \frac{\sin \theta}{2\pi(1 + \omega^2\tau_0^2)} \frac{\sin \omega\tau_0/2}{\omega\tau_0/2} x \left[1 - \frac{\sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta \sin^2 2\varphi}}{R_1^2} + \frac{\sin \theta \sin 2\varphi}{2R_1 V_P} \right], \\ |\hat{u}_S(R_1, \varphi, \theta, \omega)| &= \frac{M_0}{4\pi\rho V_S^2} \frac{\sin \theta}{2\pi(1 + \omega^2\tau_0^2)} \frac{\sin \omega\tau_2/2}{\omega\tau_0/2} x \left[\frac{1}{\omega} \frac{\sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi}}{R_1^2} + \frac{\sin \varphi \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}}{R_1 V_S} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Выражения (1) записаны для случая $\alpha = \beta = A = 0$ и $C_W \rightarrow \infty$, но при расчете модулей теоретических спектров учитывались все исходные параметры, которые, по мере необходимости, могли принимать и экстремальные значения. Здесь $R_1 = 0,5(2R_0 - L \sin \theta \cos \varphi + W \cos \theta)$ — расстояние до приемника; $\tau_0 = L/V_{PS} (V_{PS}/C_L - \sin \theta \cos \varphi + (W/L) \cos \theta)$ — время разрыва; C_L, C_W — скорости разрыва по длине L и ширине W площадки соответственно, A — угол внутреннего трения, $\text{tg } \psi = C_L/C_W$.

Были построены теоретические спектры излучения и показано, что частотный состав землетрясений и динамические параметры очага существенно зависят от геометрии излучающей площадки (соотношения $p = (W/L)$) и механизма очага [9, 10]. Из результатов, полученных в [4, 9, 10], следует, что применение модели Брюна [11] (мгновенно распространяющаяся круговая площадка разрыва R) для определения параметров очага порождает непредсказуемые ошибки при вычислении этих параметров, поскольку не учитывается не только конечность скоростей разрыва, но и, что очень важно, неизометричность излучающей площадки [9, 10].

Именно этим, вероятно, можно объяснить неудачи многих исследователей, возлагавших большие надежды на возможность изучения динамики очаговых параметров при помощи методики Брюна.

И все же, даже уменьшив произвол в постановке и решении прямой кинематической задачи [9, 10], не удастся избежать неоднозначности при определении параметров очага землетрясения. Можно предложить еще более сложные математические модели, теоретические спектры и спектральные характеристики которых будут как угодно мало отличаться от экспериментальных, но и это не повысит устойчивости определения динамических параметров очагов землетрясений, поскольку решение обратной задачи в принципе неединственно.

Выход из этого положения, как нам кажется, найден при рассмотрении „энергетической“ модели очага землетрясения. Понятно, что тектоническое землетрясение является результатом какого-то процесса, происходящего в земных недрах с выделением энергии в широком амплитудно-частотном диапазоне. Причиной выделения энергии при землетрясении является резкий переход некоторого объема вещества земных недр (очага излучения) из одного энергетического состояния в другое. Механизмы

такого перехода могут быть различны, в частности, это может быть и сдвиговое разрушение. В энергетической модели очага полагается, что энергия землетрясения является результатом изменения количества движения (импульса) некоторого инерционного объема [6, 9, 12] очаговой среды $V_{ин}$, сосредоточенного в зоне максимальных смещений в очаге за счет подвижки по площадке разрыва $S = LW$. Такой инерционный объем $V_{ин}$ можно записать как

$$V_{ин} = (W/2)^3 k_0, \quad (2)$$

где W — диаметр упругопластической зоны на конце трещины продольного сдвига при антиплоской деформации, k_0 — численный коэффициент.

Для описания одинакового количества выделенной очагом энергии при землетрясении в объемном и плоском случаях полагается, что изменение количества движения (импульса) инерционной массы m объема $V_{ин}$ должно быть равно изменению количества движения в результате подвижки по площадке — $\Delta p_m = \Delta p_{пл}$. Тогда можно записать

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= m C_L = \rho V_{ин} C_L = (1/8) W^3 k_0 (\mu / V_S^2) C_L, \\ \Delta p_{пл} &= \Delta F t_0 = \Delta \sigma L W (L / C_L), \end{aligned} \quad (3)$$

где ΔF — скачок сил на площадке, $\Delta \sigma$ — скачок напряжения в очаге в результате подвижки D по площадке, $t_0 \approx (L / C_L)$, где L — длина площадки, C_L — скорость распространения фронта дислокации, V_S — скорость S -волн.

Следовательно,

$$\mu \Delta \varepsilon L W (L / C_L) = (1/8) W^3 k_0 (\mu / V_S^2) C_L. \quad (4)$$

Отсюда

$$\Delta \varepsilon = 1/8 (C_L / V_S)^2 k_0 p^2, \quad (5)$$

где $p = W/L$. Энергия, выделенная в результате подвижки D по площадке,

$$E_c = \Delta F_0 D = \frac{\pi}{4} W^2 \Delta \sigma D \frac{LW}{LW} = \frac{\pi}{4} p \Delta \sigma D \cdot LW. \quad (6)$$

Здесь ΔF_0 — скачок усиления на торце цилиндра, обусловленный подвижкой D по площадке $S = LW$.

Учитывая, что $D = W \Delta \varepsilon$ [5, 9], запишем выражение для сейсмического момента M_0 [8, 13]

$$M_0 = \mu S D = \mu \Delta \varepsilon L W^2. \quad (7)$$

Из (6) и (7) определим $\Delta \varepsilon$

$$\Delta \varepsilon = (4/\pi) (1/p) (E_c / M_0). \quad (8)$$

Из (5) и (8) получим

$$p^3 = (8/k_0) (4/\pi) (V_S / C_L)^2 (E_c / M_0). \quad (9)$$

В работе [10] инерционная масса $m_{ин}$ инерционного объема $V_{ин}$, участвующего в движении, в очаге определяется как

$$m_{ин} = (1/8) (\pi/4)^2 (C_L / V_S) \rho W^3 = (1/8) W^3 (\pi/4)^2 (C_L / V_S) (\mu / V_S^2). \quad (10)$$

Сравнивая (3) и (10), определим численный коэффициент $k_0 = (\pi/4)^2 (C_L / V_S)$. Тогда

$$\Delta \varepsilon = (1/8) (C_L / V_S)^2 (\pi/4)^2 (C_L / V_S) p^2 = k p^2. \quad (11)$$

Теперь (9) запишем как

$$p^3 = (4/\pi)^3 (V_S / C_L)^3 8 (E_c / M_0); \quad W/L = p = 2(4/\pi) (V_S / C_L) \sqrt[3]{E_c / M_0}. \quad (12)$$

Из (7) и (11) определим W

$$W^3 = M_0 \rho / \mu \Delta \varepsilon = M_0 p / \mu k p^2; \quad W = \sqrt[3]{M_0 / \mu k p}. \quad (13)$$

Теперь можно записать окончательные выражения для динамических параметров очага и интегрального параметра очаговой среды p :

$$M_0 = \mu k p W^3; \quad E_c = (\pi/4) \mu k^2 p^4 W^3 = \mu k^2 p^5 V, \quad (14)$$

где $V = (\pi/4) L W^2$ — объем очага; $p = 2(4/\pi) (V_S / C_L) \sqrt[3]{E_c / M_0}$; $\Delta \sigma = \mu k p^2$; $\Delta \varepsilon = k p^2$; $D = W k p^2$; $k = (1/8) (\pi/4)^2 (C_L / V_S)^3$.

Следует заметить, что важны не столько сами значения параметров (поскольку их точные значения вычислить невозможно, ввиду неоднозначности решения обратной задачи), сколько их пространственно-временные вариации. Они связаны с изменением условий деформирования сейсмогенной среды при подготовке землетрясения и с динамикой афтершокового процесса.

Практически во всех многочисленных работах по определению динамических параметров очага полагается, что поток энергии, питающий сейсмогенную среду, постоянен и не зависит от условий нагружения [8, 13, 14]. Предлагаются корреляционные зависимости между геометрическими и энергетическими параметрами очага, усредненные величины размеров величины подвижки, скачка напряжений [8, 13, 14 и др.]. Это фактически означает признание постоянства отклика сейсмогенной среды на воздействие, что не позволяет изучать динамические особенности сейсмичности при различных условиях нагружения. Преимущества предлагаемого способа массового определения динамических параметров очагов землетрясений с учетом непостоянства потока энергии (условий деформирования) обсуждены ниже.

Из (10)—(12) ясно видно, что динамические параметры очага землетрясения существенно зависят от параметра p , содержащего в себе информацию о физико-механических свойствах очаговой среды и условиях ее деформирования.

Из выражения $\Delta\epsilon_y$ ясен физический смысл параметра p . Поскольку вся деформация $\epsilon_{\text{выд}} = \Delta\epsilon_y + \epsilon_d$, где ϵ_d — диссипированная деформация, то $\Delta\epsilon_y = kp^2 = \epsilon_{\text{выд}} - \epsilon_d$.

Следовательно, чем больше потери в деформируемой среде, т. е. чем больше среда отличается от абсолютно упругого тела, тем меньше параметр p и наоборот, чем консолидированнее среда, тем больше p -параметр. Для среды без потерь (упругость) $p = 1$, $\epsilon_d = 0$, $\Delta\epsilon_y = \epsilon_{\text{выд}}$, а для слабой среды $p \rightarrow 0$, $\epsilon_d \rightarrow \epsilon_{\text{выд}}$, $\Delta\epsilon_y \rightarrow 0$. В работе [10] было показано, что при увеличении p спектр излучения становится более высокочастотным, а многочисленные эксперименты по деформированию и разрушению образцов показывают, что излучение для более прочных образцов высокочастотнее, чем для менее прочных. Таким образом, можно утверждать, что параметр p характеризует степень упругости среды или меру необратимых потерь в процессе выделения энергии очагом землетрясения, т. е. в нем заключается первичная информация о физико-механическом состоянии очаговой среды и ее изменениях в пространственно-временных координатах. Поэтому использование p -параметра для решения проблемы количественной классификации землетрясений по физико-механическим характеристикам сейсмогенной среды кажется вполне обоснованным и может дать новую информацию о природе сейсмического процесса и его динамике.

Можно показать, например, как изменятся динамические параметры для землетрясений одинаковой энергии, расположенных на одинаковом гипоцентральной расстоянии от приемника, но отличающихся по p -параметру — степени упругости очаговой среды. Итак, если $E_1 = E_2$ и $p_1 = np_2$, где $n > 1$, из (14) запишем $W_1^3 p_1^4 = W_2^3 p_2^4$.

После простых преобразований получим:

$$\frac{W_2}{W_1} = n \sqrt[3]{n}; \quad \frac{L_2}{L_1} = n^2 \sqrt[3]{n}; \quad \frac{V_2}{V_1} = n^5; \quad \frac{M_{02}}{M_{01}} = n^3;$$

$$\frac{t_{02}}{t_{01}} = n^2 \sqrt[3]{n} \quad (\text{при } C_{L1} = C_{L2}); \quad \frac{\Delta\epsilon_{y1}}{\Delta\epsilon_{y2}} = n^2; \quad \frac{D_1}{D_2} = n^{2/3}. \quad (15)$$

Из (15) видно, что при выделении одной и той же энергии более слабой средой размеры очага, объем и сейсмический момент больше, чем в более прочной среде. Частота колебаний $1/t_0$ и упругая часть общей деформации $\Delta\epsilon_y$ выше в более прочной среде, т. е. в такой среде, где диссипационные потери будут меньше и величина относительной подвижки будет несколько меньше. Эти результаты имеют ясный физический смысл и наглядно иллюстрируются экспериментальными данными расчетов динамических параметров очагов для большого количества ($N \sim 7000$) слабых землетрясений Таджикистана.

На рис. 2 показано изменение осредненного параметра p с глубиной и с увеличением энергии землетрясения. Поскольку с увеличением H (км) растет гидростатическое давление ρgH и, соответственно, прочность среды, параметр p , как и следовало ожидать, увеличивается примерно в 5 раз от глубин 0—5 до 30—35 км от значений $\sim 0,018$ ($1/p \sim 55$) до 0,09 ($1/p \sim 11$). Стрелки на графике показывают границы 95 %-го доверительного интервала распределения. Видно, что на кривой $p = f(H)$ выделяются 4 участка — 0—5 км, 5—10, 10—35 и >35 км. Возможно, что разный наклон кривой на первых двух участках может

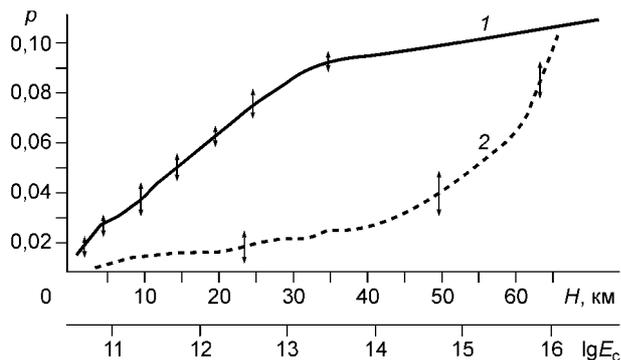


Рис. 2. Зависимость параметра p от глубины и энергии землетрясений.

1 — осредненная зависимость $p(H)$; 2 — характер увеличения p с ростом энергии землетрясения. Стрелки — границы 95-процентного интервала доверия.

80—130 км	$p = 0,18$
130—190 км	$p = 0,21$
190—230 км	$p = 0,24$
и при $H = 240$ км	$p = 0,26$

Отсюда следует, что и при дальнейшем увеличении глубин параметр p также будет расти, но меняется он уже существенно медленнее, чем для коровых землетрясений. Если для глубин от 0 до 35 км p -параметр увеличивается в 5 раз, то для глубин от 70 до 240 км — примерно в 1,7 раза для $K = 12$ (см. рис. 2, 3). Зная общую зависимость p -параметра от изменения глубины, мы рассмотрели как ведет себя p -параметр при изменении H в фиксированном узком интервале магнитуд (см. рис. 3). Мы видим, что для каждого энергетического класса p возрастает с увеличением регистрируемого интервала глубин. Это еще раз подтверждает интерпретацию p как параметра, являющегося неким функционалом прочности свойств среды.

Интересный результат был получен при изучении временного хода количества землетрясений N — отдельно для высокочастотных (ВЧ) и низкочастотных (НЧ) событий. Разделение на ВЧ и НЧ события достаточно условное и проводилось по сводным ЧИСС-спектрам. Землетрясения, максимум спектра которых ниже 5 Гц, относились к НЧ событиям, выше 5 Гц — к ВЧ. Рассматривалась сейсмичность Нурекского водохранилища с 1971 до 1979 г., и весь район наблюдений условно был разбит на три зоны (рис. 4).

На рис. 5 видно, что в одной и той же зоне В частотный состав землетрясений в 1972 и 1976 годах резко отличен. Если до 1974 г. соотношение ВЧ и НЧ событий 85 и 15 %, то для второго максимума НЧ — 18 % и ВЧ — 82 %.

Если среднее значение первого максимума $p \approx 0,012$, то для второго — $p \approx 0,020$. Причем энергетический состав сейсмичности практически остался неизменным — землетрясений с $K = 6 - 7$ и в том, и в другом случае примерно поровну: 42 % до 1974 г. и 40 % для второго максимума. Естественным было связать этот результат с процессом изменения условий деформирования сейсмогенной среды в процессе заполнения водохранилища и проследить за временным ходом параметра p .

Изменение этого параметра в различных условиях деформирования показано на рис. 6. Обращает на себя внимание уменьшение p -параметра при увеличении нагрузки (верхняя кривая — уровень заполнения водохранилища ($H, м$)). Физический смысл этого результата можно объяснить следующим образом.

Поскольку энергетический состав землетрясений временного хода меняется мало, то можно воспользоваться соотношениями (14) и утверждать, что p умень-

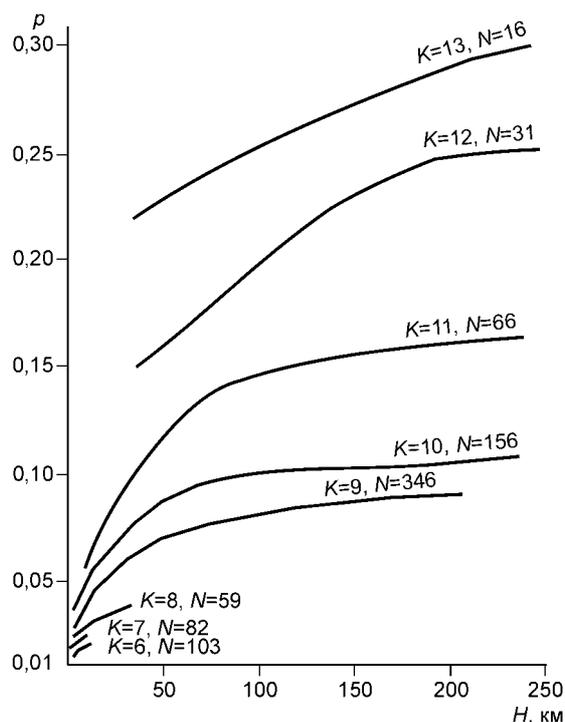
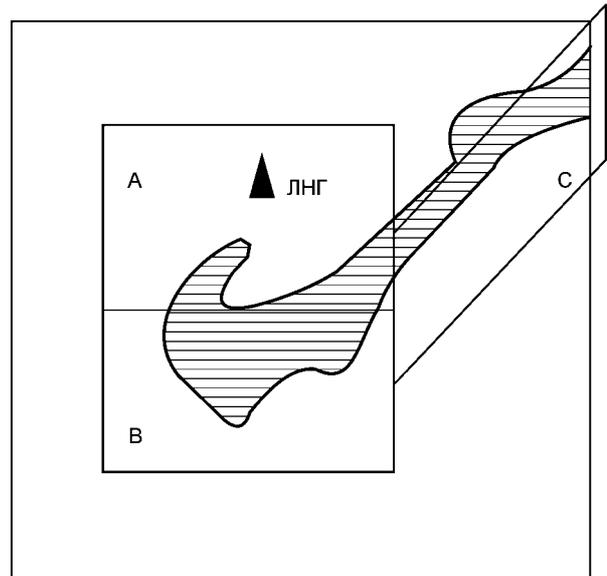


Рис. 3. Изменение p -параметра в зависимости от глубины для различных энергетических классов сейсмичности.

Рис. 4. Схема района наблюдений (Нурекское водохранилище).

ЛНГ — сейсмостанция Лангар (ЧИСС). А, В, С — условные зоны.



шается при увеличении ϵ_d (потери на диссипацию) в результате увеличения подвижки, когда нагрузка растет. При наложении графиков $N(t)$ и $p(t)$ для зоны В отчетливо видно, что при изменении режима деформирования (увеличения уровня воды H , м) параметр p уменьшается, а количество землетрясений растет. Причем средний уровень p в НЧ зоне при росте H , как и следует ожидать, ниже, чем в ВЧ зоне исследуемого района.

Изучался также вопрос о зависимости динамических параметров очага от энергетического уровня землетрясений. На рис. 7 показаны зависимости $N(p)$ для различных энергетических диапазонов.

Видно, что максимумы распределения $N(p)$ имеют устойчивую тенденцию в сторону увеличения параметра p с ростом энергии. Кроме того, на рис. 7 отчетливо выделяется второй максимум распределения для всех энергетических классов с меньшим значением параметра p . Поскольку район наблюдений связан с нурекской сейсмичностью, оказалось, что эти „малые“ максимумы связаны с изменением условий деформирования района (повышение уровня воды — H , уменьшение — p). Понятны, конечно, трудности надежного определения энергии из наблюдений (в частности K), но мы считаем, что для слабых землетрясений различие в затухании внутри 10-километровой референц-сферы несущественно.

Полученные результаты позволяют предположить определенную стратегию изучения пространственно-временных вариаций очаговых параметров и количественной их классификации. Зная „фоновые“ значения параметра p для исследуемых регионов, можно строить прогноз сейсмичности по значимым изменениям этого параметра в пространственно-временных координатах.

Так, например, увеличение скорости деформирования среды $\dot{\epsilon}$ должно приводить к понижению p -параметра и увеличению доли низкочастотных колебаний в спектре для сравнимых энергетических классов фоновой сейсмичности. При подготовке сильного землетрясения следует ожидать пространственной локализации деформаций, увеличения $\dot{\epsilon}_{оч}$ в районе очага будущего события и, следовательно, упрочнения, консолидации окружающей среды ($\dot{\epsilon}_{сп} < \dot{\epsilon}_{оч}$). Следовательно, в районе будущего очага $\dot{\epsilon}_{оч} \uparrow$, $p \downarrow$, частота колебаний $f \downarrow$; в окружающей среде $\dot{\epsilon}_{сп} \downarrow$, $p \uparrow$ и $f \uparrow$ по отношению к фоновым значениям этих параметров. В ретроспективном прогнозе М.С. Хайдарова [17] ПВР (пространственно-временное распределение) значений угловой частоты Фурье-спектра смещений в объемных волнах \tilde{f}_0 (отклонения от f_0 фоновых) имеет именно такое распределение, подтверждающее предполагаемую физическую интерпретацию явления.

Была исследована связь между параметром p и частотным составом сильных землетрясений, для которых угловая частота определялась из очагового спектра скорости, построенного с применением метода „коды“ [18]. Как известно, угловая частота очагового спектра в объемных волнах связана с характерным размером очага. У Дж. Брюна [11] эта связь выражена формулой

$$R = \frac{2,34 V_S}{2\pi f_0}, \quad (16)$$

где R — размер круговой площадки разрыва. Сейсмический момент M_0 связан с размером очага следующим образом [11]:

$$M_0 = \frac{16}{7} R^3 \Delta \sigma. \quad (17)$$

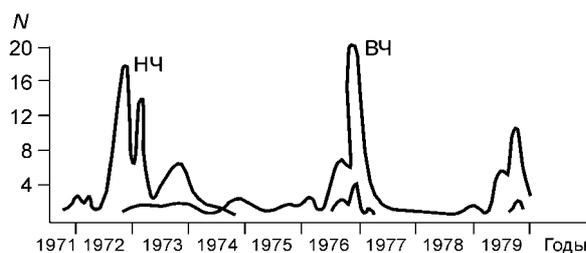


Рис. 5. Временной ход количества землетрясений в зоне В разного частотного состава.

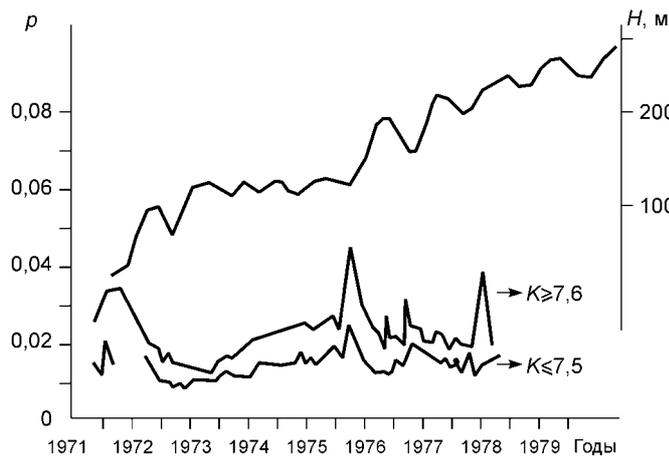


Рис. 6. Изменение параметра p при заполнении водохранилища.

Верхняя кривая — уровень заполнения водохранилища (H , м).

Для нашего случая протяженного очага формулу (17) можно записать в виде

$$M_0 = \Delta\sigma L W^2 = \Delta\sigma \frac{W^3}{p}; \quad p = \frac{W}{L}, \quad (18)$$

где L — длина, W — средняя ширина очагового объема.

Из (16) — (18) можно записать

$$R = 0,76 \frac{W}{\sqrt[3]{p}}, \quad (19)$$

$$f_0 = 0,5 \frac{V_S}{W} \sqrt[3]{p}. \quad (20)$$

Из формулы (20) видно, что угловая частота спектра прямо пропорциональна параметру p — растет с увеличением p и падает с его уменьшением.

Также было рассмотрено распределение землетрясений разного частотного состава по глубинам и энергиям. Все исследуемые события были разбиты по частотному составу на три группы: 0—2, 2—3 и 3 Гц (рис. 8). Мы видим, что если низкочастотные землетрясения в большинстве своем коровые и имеют невысокий энергетический уровень (8—10 классы), то высокочастотные — глубокие и их энергетические классы от 11 до 14. При дальнейшем накоплении материала эти зависимости будут изучаться более

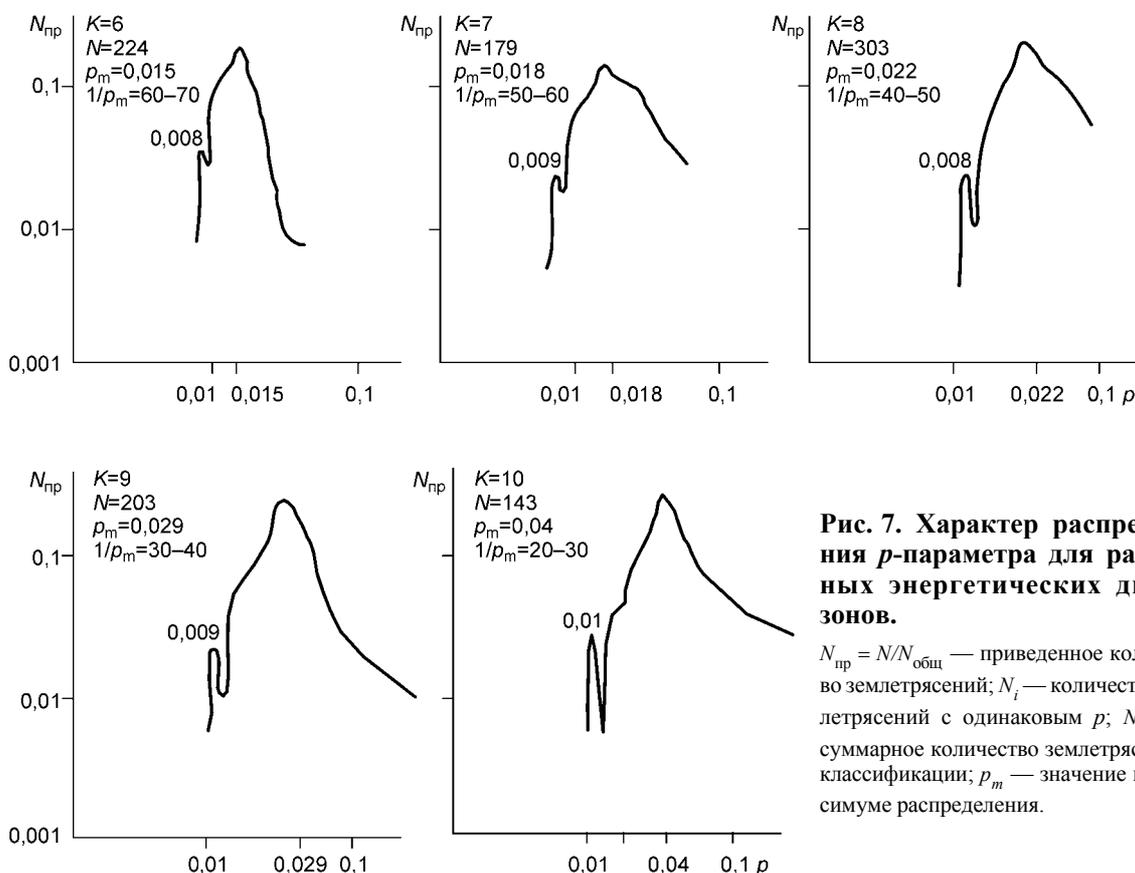


Рис. 7. Характер распределения p -параметра для различных энергетических диапазонов.

$N_{пр} = N/N_{общ}$ — приведенное количество землетрясений; N_i — количество землетрясений с одинаковым p ; $N_{общ}$ — суммарное количество землетрясений в классификации; p_m — значение на максимуме распределения.

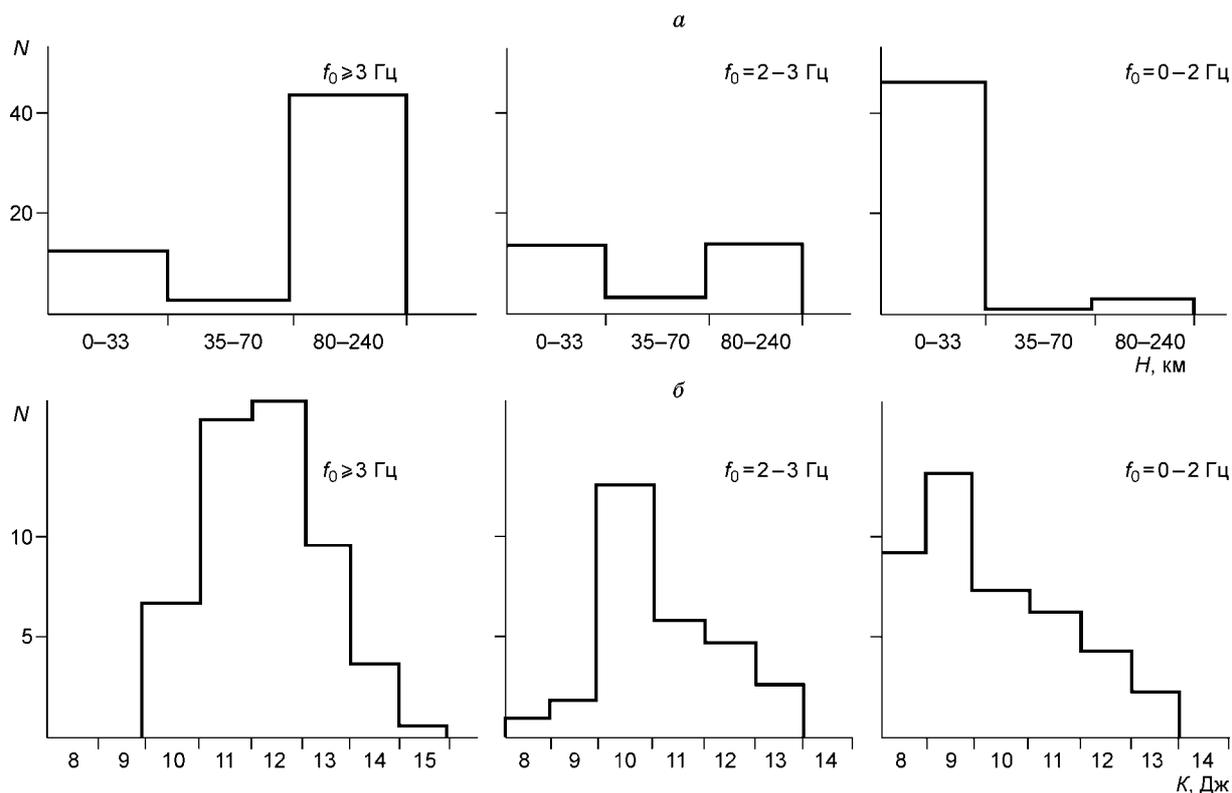


Рис. 8. Распределение землетрясений разного частотного состава:

a — по глубине, *б* — по энергии.

подробно. Видимо, высокочастотный характер глубоких землетрясений можно объяснить, с нашей точки зрения, тем, что с увеличением глубины растут прочностные характеристики среды и, следовательно, увеличивается параметр p , что приводит к увеличению доли высокочастотных колебаний в спектре объемных волн. Из графиков (см. рис. 8) видно, насколько значительно влияние глубины очага на частотный состав излучения.

При изучении пространственно-временных вариаций p -параметра до и после Джергитальского землетрясения было отмечено, что в период подготовки главного землетрясения фоновые значения p -параметра уменьшались вблизи очаговой зоны и увеличивались вдали от нее, т. е. сейсмогенная среда разупрочняется в районе будущего очага и упрочняется вдали от него. Меняются условия деформирования (воздействия) и меняется отклик — в районе будущего очага (по отношению к фоновым значениям) землетрясения одного и того же энергетического класса более низкочастотны, а вдали — более высокочастотны. Имеет место структуризация сейсмического процесса, что позволяет на материале ретро-прогноза в различных сейсмоопасных регионах выработать стратегию прогноза крупных землетрясений. Поскольку раньше не было возможности отслеживать динамику количественных параметров сейсмичности, принималось, что поток энергии (скорость деформирования сейсмогенной среды) постоянен и в решении задач сейсморайонирования различных масштабов для определения балльности сейсмической опасности пользовались среднестатистическими оценками.

Как мы убедились, отклик среды может меняться как за счет вариаций внешнего параметра (поток энергии), так и за счет изменения упругих характеристик (λ , μ , ρ) среды, что, при использовании среднестатистических оценок, может приводить к ошибкам в сейсмическом районировании и оценкам сейсмоопасности региона. Пример — Газлийские землетрясения ($M(\text{УКРАС}) = 7,1$ и $M = 7,1$), последовавшие друг за другом (апрель—май 1976 г.) в одной очаговой зоне в районе газовых месторождений. Вполне возможно, что откачка газа изменила упругие характеристики сейсмогенной среды и поэтому отклик на внешнее воздействие оказался гораздо более сильным, чем определялось осредненным сейсморайонированием.

Изучение отклика сейсмогенной среды на меняющиеся во времени условия деформирования показало, что в ней возникают пространственно-временные структуры с характерными размерами и частотами излучения и динамика этих структур является определяющим фактором в решении задач сейсмодина-

мического районирования, динамической балльности и прогноза землетрясений. Более подробно эти вопросы будут рассмотрены в отдельной работе.

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель очага тектонического землетрясения, основанная на общезначимых представлениях об излучающем источнике, входными параметрами которой являются интегральные характеристики процесса — сейсмическая энергия E_c и сейсмический момент M_0 .

2. Приведен способ определения динамических параметров очага через безразмерную величину $p = 2(4/\pi) (V_S/C_L) \sqrt[3]{E_c/M_0}$, $p = \frac{W}{L}$, где W — ширина, L — длина очага землетрясения.

3. Обсуждена физическая интерпретация безразмерного p -параметра, который зависит от λ , μ , ρ очаговой среды и скорости ее деформирования и является интегральным носителем первичной информации о физико-механических характеристиках очага. Это позволяет использовать пространственно-временные вариации p -параметра для исследования динамики сейсмогенной среды.

4. Показано, что параметр p растет с увеличением глубины очага землетрясения, что связано с увеличением прочностных свойств среды. С ростом энергии землетрясения p -параметр также растет. Приведена зависимость спектральной характеристики f_0 (угловая частота спектра излучения) с параметром

$$p: f_0 = \frac{1}{2} \frac{V_S}{W} \sqrt[3]{p}.$$

5. Рекомендовано использование p -параметра для мониторинга геофизической среды как по сейсмограммам от землетрясений, так и по сейсмическим записям от промышленных взрывов.

6. Приведены результаты массового определения динамических параметров очага по предлагаемой методике; получены и обсуждены новые экспериментальные закономерности динамики сейсмического процесса.

Автор выражает благодарность бывшему начальнику Опытной-методической сейсмологической экспедиции ТИССС (г. Душанбе) канд. физ.-мат. наук. В.Л. Голубятникову за предоставленный экспериментальный материал по землетрясениям Таджикистана (в частности, по сейсмической активности в районе Нурекской ГЭС от начала и до конца заполнения водохранилища).

Хочу отметить неоценимый вклад бывшего руководителя группы обработки А.Н. Павловой в работу по массовому определению очаговых параметров и их пространственно-временных вариаций, а также полезное участие Г.Я. Филимонова.

Считаю своим долгом выразить искреннюю благодарность академику С.В. Гольдину за внимательное отношение к работе и конструктивные замечания, приведшие к более убедительному формулированию основных положений энергетической модели очага землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. М., Мир, 1983, 880 с.
2. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М., Наука, 1975, 174 с.
3. Райс Дж. Механика очага землетрясения. М., Мир, 1982, 217 с.
4. Щеглов В.И. К определению параметров сдвигового источника сейсмического излучения // ФТПРПИ, 1978, № 5, с. 18—27.
5. Шемякин Е.И. Напряженно-деформированное состояние в вершине разреза при антиплоской деформации горных пород // ФТПРПИ, 1973, № 1, с. 3—11.
6. Ohnaka M. A physical basis for earthquakes based on the elastic rebound model // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1976, v. 66, p. 433—451.
7. Das Sh. Three-dimensional spontaneous rupture propagations for the earthquake source mechanism // Geophys. J. R. Soc., 1981, v. 67, p. 375—393.
8. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии: Избр. труды. М., Наука, 1985, 408 с.
9. Щеглов В.И. Метод определения параметров очага излучения // Геология и геофизика, 1983 (1), с. 95—103.
10. Щеглов В.И., Исюк С.И. Определение параметров излучающего очага по амплитудным спектрам объемных волн // Геология и геофизика, 1983 (10), с. 102—106.
11. Brune J. Tectonic stress and spectra of seismic waves from earthquakes // J. Geophys. Res., 1970, v. 75, p. 4997—5009.
12. Ohnaka M. A physical understanding of the earthquake source mechanism // J. Phys. Earth, 1973, v. 21, № 1, p. 39—59.

13. **Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И. и др.** Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений // Вулканология и сейсмология, 1989, № 2, с. 66—79.
14. **Потапов В.А.** Параметры и энергия очагов землетрясений в структурно-неоднородной земной коре // Вулканология и сейсмология, 2001, № 3, с. 53—62.
15. **Шемякин ЕИ., Щеглов В.И.** К изучению механизма движения при коровых землетрясениях // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1974, № 12, с. 22—31.
16. **Щеглов В.И.** Некоторые аспекты проблемы очага землетрясения: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Алма-Ата, Ин-т сейсмологии АН КазССР, 1978, 16 с.
17. **Хайдаров М.С.** Очаговые спектры землетрясений Северного Тянь-Шаня и пространственно-временные вариации угловой частоты: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., Ин-т физики Земли, 1986, 24 с.
18. **Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С. и др.** Экспериментальные исследования сейсмической коды. М., Наука, 1981, 141 с.

*Рекомендована к печати 20 июля 2005 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию 2 декабря 2004 г.,
после доработки — 27 мая 2005 г.*