© В.В. Иванов, В.А. Хямяляйнен, Д.Ю. Сирота, Р.В. Бузук, 2008

УДК 622.235(088.8): 519.21

В.В. Иванов, В.А. Хямяляйнен, Д.Ю. Сирота, Р.В. Бузук

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВОЗМУЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ РАЗЛОМОВ

Семинар № 3

При низких температурах и давлениях горные породы в литосфере являются достаточно хрупкими и при высоких напряжениях разрушаются. Со смещениями по крупным разломам связана большая часть горно-тектонических ударов и землетрясений, происходящих в литосфере.

При возрастании напряжений в очаговой зоне будущего разрыва происходит множественное накопление микротрещин. С самого начала процесс их накопления носит рассеянный характер, однако при образовании более крупных трещин, процесс возникновения микротрещин локализуется в узкой области, представляющей собой зону прорастающего магистрального разрыва.

Когда напряжения в очаге достигают критического значения, формируются борта разлома, они проскальзывают друг относительно друга и происходит сейсмическое событие. При этом упругая энергия, запасенная в окружающих породах, частично переходит в тепло, а частично - в энергию распространяющихся сейсмических волн.

Именно вдоль разломов часто происходят относительные перемещения жестких литосферных плит. При этом разломы подразделяются на надвиги, когда максимальное значение тектонической составляющей напряжений является сжимающим; нормальные сбросы, в том случае, когда максимальная компонента напряжений - растягивающая; и разломы со смещением по простиранию (сдвиги).

Поиск краткосрочных предвестников крупных сейсмических событий в земной коре, таких как возмущения атмосферного электрического поля, часто порождает противоречивые суждения о возможных механизмах электризации горных пород в очагах разрушения [1].

Впервые значительные изменения атмосферного электричества были зарегистрированы Чернявским (1924 г.) примерно за два часа до Джелалабадского землетрясения [2]. Вместе с тем, последующие исследования показали, что перед землетрясением силой до 4-х баллов по шкале Рихтера, значительных изменений атмосферного электричества не наблюдается.

Перед разрушительным Ташкентским землетрясением 1968 года в ночное время наблюдалось свечение атмосферы в виде вспышек и столбов света.

Поскольку все горные породы являются сравнительно хорошо проводящими материалами (время релаксации возникающих в них зарядов колеблется от 10^{-5} с. до 10^{-16} с.), то для объяснения длительного существования зарядового

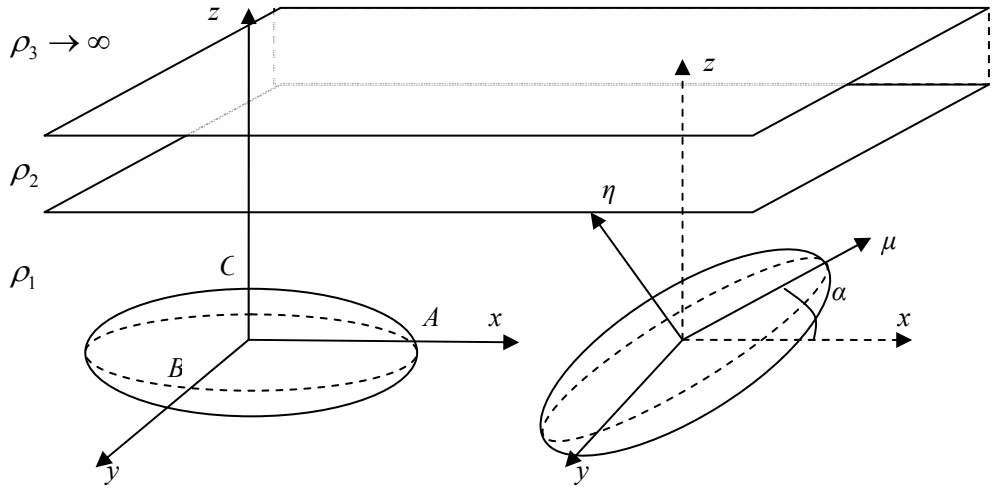


Рис. 1. К расчету электромагнитного возмущения в атмосфере

состояния в горных породах необходимо рассматривать динамический механизм электризации, который способен непрерывно возобновлять быстро релаксирующие заряды. Впервые такой механизм, обусловленный рождением и быстрым распространением микротрещин, рассмотрен в работе [1]. При этом каждая микротрещина в процессе распространения несет в своей вершине заряд одного знака [1].

Рассмотрим очаговую зону сейсмического события в форме эллипсоида с полуосями A > B > C (рис. 1.)

Из геодинамики и сейсмологии известно [3], что землетрясения связаны с разломами типа надвига, сброса и сдвига по простиранию. Образование крупных разломов в земной коре обусловлено множественным накоплением микротрещин в очаговой зоне, их объединением и формированием крупных трещин (форшоки), соединение которых происходит путем разрыва перемычек между ними (собственно землетрясение), а также со скачкообразным смещением бортов разрыва, называемым прерывистым скольжением [3]. Наиболее широко распространенным механизмом электризации быстрых трещин в горных породах является пьезоэффект [1, 2].

В работе [1] дана теоретическая и экспериментальная оценка величины заряда в вершинах возникающих микротрещин в различных минералах и горных породах литосферы.

Рассмотрим сначала поле точечного источника в трехслойной среде (рис. 1), причем начало системы координат Oxyz совпадает с источником тока, который расположен в 1–м слое.

Как показано в работе [1], решение этой задачи для потенциала точечного источника в атмосфере (3-й слой) имеет вид:

$$\varphi_3 = \frac{\rho_2 I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{(1-K_1)e^{-mz} J_0(mr)}{1+K_1 e^{-2mh}} dm, \qquad (1)$$

где ρ_2 – удельное электросопротивление второго слоя (Ом*м); $K_1 = \dfrac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ – коэффициент отражения второго слоя; $J_0(mr)$ – функция Бесселя нулевого порядка; I – ток точечного источника; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – полярный радиус; h – толщина второго слоя.

Обозначая через $div\vec{j}$ объемную плотность токов в очаге разрушения и интегрируя (1) по объему эллипсоида с полуосями A, B, C (см. [1]), получаем для потенциала очаговой зоны в атмосфере следующее выражение:

$$\Phi_3 = \frac{\rho_2 \mathrm{div}\vec{j}}{2\pi} \iiint\limits_{V_p} \left[\int\limits_0^\infty \frac{(1 - K_1)e^{-mz} J_0(mr)}{1 + K_1 e^{-2mh}} dm \right] dx_p dy_p dz_p, \tag{2}$$

где $r = \sqrt{(x_M - x_p)^2 + (y_M - y_p)^2}$, $z = z_M - z_p$, V_p – эллипсоид с центром в начале координат (рис. 1); x_p, y_p, z_p – координаты точки P внутри очаговой зоны, по которым в (2) ведется внешнее интегрирование; x_M, y_M, z_M – координаты точки наблюдения в атмосфере.

Приведем в (2) интегралы к безразмерному виду, вводя обозначения $x_M / A = \bar{x}_M$ $x_p / A = \bar{x}_p$, $y_M / A = \bar{y}_M$, $y_p / A = \bar{y}_p$, $z_M / A = \bar{z}_M$, $z_p / A = \bar{z}_p$. Здесь и далее будем считать величины с чертой приведенными величинами с размерным коэффициентом $1/A$. Тогда $dx_p dy_p dz_p = A^3 d\bar{x}_p d\bar{y}_p d\bar{z}_p$, а уравнение эллипсоида примет вид: $\dfrac{\bar{x}_p^2}{1} + \dfrac{\bar{y}_p^2}{\bar{B}^2} + \dfrac{\bar{z}_p^2}{\bar{C}^2} = 1$. Выражение (2) преобразуется к виду:

$$\Phi_3 = \frac{\rho_2 A^3 \mathrm{div}\vec{j}}{2\pi} \iiint\limits_{\bar{V}_p} \left[\int\limits_0^\infty \frac{(1 - K_1)e^{-mA\bar{z}} J_0(mA\bar{r})}{1 + K_1 e^{-2mh}} dm \right] d\bar{x}_p d\bar{y}_p d\bar{z}_p, \tag{3}$$

где $\bar{r} = \sqrt{(\bar{x}_M - \bar{x}_p)^2 + (\bar{y}_M - \bar{y}_p)}$, $\bar{z} = \bar{z}_M - \bar{z}_p$.

Вводя последовательно замены $mA = p$ и $h = \bar{h}A$, преобразуем (3) к виду:

$$\Phi_3 = \frac{\rho_2 A^2 \mathrm{div}\vec{j}}{2\pi} \iiint\limits_{\bar{V}_p} \left[\int\limits_0^\infty \frac{(1 - K_1)e^{-p\bar{z}} J_0(p\bar{r})}{1 + K_1 e^{-2p\bar{h}}} dp \right] d\bar{x}_p d\bar{y}_p d\bar{z}_p. \tag{4}$$

Так как $|K_1| < 1$, выражение $\dfrac{e^{-p(\bar{z}_M - \bar{z}_p)}}{1 + K_1 e^{-2p\bar{h}}}$ можно разложить в ряд $\sum\limits_{n=0}^{\infty} (-K_1)^n e^{-p(2n\bar{h} + \bar{z}_M - \bar{z}_p)}$.

Тогда, используя формулу Вебера

$\int_0^\infty J_0(mr)e^{-mz}dm = \frac{1}{\sqrt{r^2+z^2}}$, несобственный интеграл в (4) можно будет представить в виде:

$$\int_0^\infty \frac{(1-K_1)e^{-p(\bar{z}_M-\bar{z}_p)}J_0(p\bar{r})}{1+K_1e^{-2p\bar{h}}}dp = (1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-K_1)^n}{\sqrt{\bar{r}^2+(2n\bar{h}+\bar{z}_M-\bar{z}_p)^2}}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) и меняя порядок суммирования и интегрирования, получим:

$$\Phi_3 = \frac{\rho_2 A^2 \mathrm{div}\vec{j}}{2\pi}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}\iiint_{\bar{V}_p}\frac{(-K_1)^n d\bar{x}_p d\bar{y}_p d\bar{z}_p}{\sqrt{\bar{r}^2+(2n\bar{h}+\bar{z}_M-\bar{z}_p)^2}}. \quad (6)$$

Используя соотношения из [4], запишем тройной интеграл (6) в виде:

$$\iiint_{\bar{V}_p}\frac{d\bar{x}_p d\bar{y}_p d\bar{z}_p}{\sqrt{\bar{r}^2+(2n\bar{h}+\bar{z}_M-\bar{z}_p)^2}} = 2\pi\left[M_{000}-(\bar{x}_M)^2M_{100}-(\bar{y}_M)^2M_{010}-(2n\bar{h}+\bar{z}_M)^2M_{001}\right]. \quad (7)$$

Здесь M_{000}, M_{100}, M_{010}, M_{001} – эллиптические интегралы

$$M_{000} = \frac{\bar{B}\bar{C}}{2}\int_\xi^\infty \frac{du}{Q(u)}, \quad M_{100} = \frac{\bar{B}\bar{C}}{2}\int_\xi^\infty \frac{du}{(1+u)Q(u)}, \quad M_{010} = \frac{\bar{B}\bar{C}}{2}\int_\xi^\infty \frac{du}{(\bar{B}+u)Q(u)},$$

$$M_{001} = \frac{\bar{B}\bar{C}}{2}\int_\xi^\infty \frac{du}{(\bar{C}+u)Q(u)},$$

где $Q(u) = \sqrt{(1+u)(\bar{B}^2+u)(\bar{C}^2+u)}$, а ξ – наибольший положительный корень уравнения

$$\frac{(\bar{x}_M)^2}{1+\xi} + \frac{(\bar{y}_M)^2}{\bar{B}^2+\xi} + \frac{(2n\bar{h}+\bar{z}_M)^2}{\bar{C}^2+\xi} = 1 \quad (8)$$

Окончательно, потенциал поля в атмосфере можно вычислить по следующей формуле:

$$\Phi_3 = \rho_2 A^2 \mathrm{div}\vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n\left[M_{000}-(\bar{x}_M)^2M_{100}-(\bar{y}_M)^2M_{010}-(2n\bar{h}+\bar{z}_M)^2M_{001}\right].$$

(9)

В безразмерном виде потенциал Φ_3 выглядит следующим образом:

$$\overline{\Phi}_3 = (1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n\left[M_{000}-(\bar{x}_M)^2M_{100}-(\bar{y}_M)^2M_{010}-(2n\bar{h}+\bar{z}_M)^2M_{001}\right],,$$

где $\overline{\Phi}_3 = \Phi_3 \Big/ \rho_2 A^2 div\vec{j}$

Для определения напряженности поля в атмосфере перепишем безразмерный интеграл (7) в виде, приведенном в работе [4]:

$$I = \iiint\limits_{\overline{V}_p} \frac{d\overline{x}_p d\overline{y}_p d\overline{z}_p}{\sqrt{\overline{r}^2 + (2n\overline{h} + \overline{z}_M - \overline{z}_p)^2}} = \pi\overline{B}\overline{C}\left\{\int\limits_{\xi}^{\infty}\left[1 - \frac{(\overline{x}_M)^2}{1+u} - \frac{(\overline{y}_M)^2}{\overline{B}^2 + u} - \frac{(2n\overline{h} + \overline{z}_M)^2}{\overline{C}^2 + u}\right]\frac{du}{\sqrt{f(u)}}\right\},$$

где $f(u) = (1+u)(\overline{B}^2 + u)(\overline{C}^2 + u)$.

Продифференцируем функцию I по координате $\overline{x}_M$, учитывая, что $I = I(\overline{x}_M, \xi)$ и ξ зависит от $\overline{x}_M$ (см. формулу (8)). Согласно правилу дифференцирования сложной функции, имеем $\dfrac{\partial I}{\partial \overline{x}_M} = \dfrac{\partial I}{\partial \overline{x}_M} + \dfrac{\partial I}{\partial \xi} \cdot \dfrac{\partial \xi}{\partial \overline{x}_M}$.

$\dfrac{\partial I}{\partial \xi} = -\left[1 - \dfrac{\overline{x}_M^2}{1+\xi} - \dfrac{\overline{y}_M^2}{\overline{B}^2 + \xi} - \dfrac{(2n\overline{h} + \overline{z}_M)^2}{\overline{C}^2 + \xi}\right]\dfrac{1}{\sqrt{f(\xi)}} = 0,$ т. к. ξ является корнем уравнения (8).

Таким образом,

$$\frac{\partial I}{\partial \overline{x}_M} = \pi\overline{B}\overline{C}\int\limits_{\xi}^{\infty}\frac{-2\overline{x}_M du}{(1+u)f(u)} = -4\overline{x}_M \pi M_{100} \tag{10}$$

в силу обозначений в формуле (7).

Аналогичным образом вычисляются производные по $\overline{y}_M, \overline{z}_M$.

Дифференцируя (9) по x_M, y_M, z_M, и учитывая (10), получим компоненты напряженности поля в атмосфере:

$$E_{x_M} = -\frac{\partial \Phi_3}{\partial x_M} = -\frac{\partial \Phi_3}{\partial \overline{x}_M}\frac{\partial \overline{x}_M}{\partial x_M} = -\frac{1}{A}\frac{\partial \Phi_3}{\partial \overline{x}_M} = 2\overline{x}_M \rho_2 A div\vec{j}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n M_{100},$$

$$E_{y_M} = 2\overline{y}_M \rho_2 A div\vec{j}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n M_{010},$$

$$E_{z_M} = 2\rho_2 A div\vec{j}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n (2n\overline{h} + \overline{z}_M) M_{001}. \tag{11}$$

Коэффициенты ослабления поля в атмосфере за счет высокопроводящего слоя 2 осадочных пород могут быть найдены из выражения:

$$K_{осл} = |E| \Big/ |E|_{h=0}. \tag{12}$$

Поскольку надвиги в земной коре, как правило, образуются под углами к земной поверхности $23^0 < \alpha < 45^0$, а сбросы – $45^0 < \alpha < 65^0$ соответственно [3], будем считать, что очаговая зона представляет собой эллипсоид, который повернут относительно оси Оу на угол α (рис. 1).

Введем новую систему координат (μ, y, η) (см. рис. 1), тогда формулы прямого и обратного преобразования координат в матричной форме можно будет записать следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mu \\ y \\ \eta \end{pmatrix}. \tag{13}$$

$$\begin{pmatrix} \mu \\ y \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \tag{14}$$

Потенциал точечного источника (1) в атмосфере после разложения подынтегрального выражения в ряд по степеням K_1 в старых координатах x, y, z запишется как

$$\varphi_3 = \frac{\rho_2 I}{2\pi}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n \int_0^{\infty} e^{-m(2nh+z)} J_0(mr)dm, \tag{15}$$

Или после вычисления несобственного интеграла:

$$\varphi_3 = \frac{\rho_2 I}{2\pi}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-K_1)^n}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nh + z)^2}}. \tag{16}$$

В новой системе координат данное выражение примет следующий вид:

$$\varphi_3 = \frac{\rho_2 I}{2\pi}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-K_1)^n}{\sqrt{(\mu\cos\alpha - \eta\sin\alpha)^2 + y^2 + (2nh + \mu\sin\alpha + \eta\cos\alpha)^2}} \tag{17}$$

Интегрируя по объему эллипсоида, получим потенциал атмосферного электрического поля в следующем виде:

$$\Phi_3 = \frac{\rho_2 \operatorname{div}\vec{j}}{2\pi}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}\iiint_{V_p}\frac{(-K_1)^n d\mu_p dy_p d\eta_p}{\sqrt{(\mu\cos\alpha - \eta\sin\alpha)^2 + y^2 + (2nh + \mu\sin\alpha + \eta\cos\alpha)^2}}, \tag{18}$$

Здесь и далее $\mu = \mu_M - \mu_p$, $y = y_M - y_p$, $\eta = \eta_M - \eta_p$.

Преобразовывая подкоренное выражение, получим:

$$\Phi_3 = \frac{\rho_2 div\vec{j}}{2\pi}(1 - K_1)\sum_{n=0}^{\infty}\iiint_{V_p}\frac{(-K_1)^n d\mu_p dy_p d\eta_p}{\sqrt{(\mu + 2nh\sin\alpha)^2 + y^2 + (\eta + 2nh\cos\alpha)^2}}.$$

Как видно, последний интеграл аналогичен интегралу в формуле (6). Введя безразмерные координаты по аналогии с формулой (7), имеем:

$$\Phi_3 = \frac{\rho_2 A^2 div\vec{j}}{2\pi}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}\int_{\overline{V}_p}\frac{(-K_1)^n d\overline{\mu}_p d\overline{y}_p d\overline{\eta}_p}{\sqrt{(\overline{\mu}+2n\overline{h}\sin\alpha)^2+\overline{y}^2+(\overline{\eta}+2n\overline{h}\cos\alpha)^2}}\cdot$$

По аналогии с (9) представим последнюю формулу в виде:

$$\Phi_3 = \rho_2 A^2 div\vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n\begin{bmatrix} M_{000}-(\overline{\mu}_M+2n\overline{h}\sin\alpha)^2 M_{100}- \\ -(\overline{y}_M)^2 M_{010}-(\overline{\eta}_M+2n\overline{h}\cos\alpha)^2 M_{001}\end{bmatrix}, \quad (19)$$

где в эллиптических интегралах параметр ξ – наибольший положительный корень уравнения

$$\frac{(\overline{\mu}_M+2n\overline{h}\sin\alpha)^2}{1+\xi}+\frac{\overline{y}_M^2}{\overline{B}^2+\xi}+\frac{(\overline{\eta}_M+2n\overline{h}\cos\alpha)^2}{\overline{C}^2+\xi}=1\cdot$$

Для нахождения возмущений атмосферного электрического поля вернемся в выражении (19) к старым координатам x, y, z:

$$\Phi_3 = \rho_2 A^2 div\vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n\begin{pmatrix} M_{000}-(A_M)^2 M_{100}- \\ -(\overline{y}_M)^2 M_{010}-(B_M)^2 M_{001}\end{pmatrix}, \quad (20)$$

где $A_M = \overline{x}_M\cos\alpha+\overline{z}_M\sin\alpha+2n\overline{h}\sin\alpha$, $B_M = -\overline{x}_M\sin\alpha+\overline{z}_M\cos\alpha+2n\overline{h}\cos\alpha$

Напряженность поля в атмосфере по аналогии с (11) запишется:

$$E_{x_M} = 2\rho_2 A div\vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n\left(A_M\cos\alpha M_{100}-B_M\sin\alpha M_{001}\right),$$

$$E_{y_M} = 2\overline{y}_M\rho_2 A div\vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n M_{010}, \quad (21)$$

$$E_{z_M} = 2\rho_2 A div\vec{j}(1-K_1)\sum_{n=0}^{\infty}(-K_1)^n\left(A_M\sin\alpha M_{100}+B_M\cos\alpha M_{001}\right)\cdot$$

Коэффициенты ослабления поля в атмосфере найдутся по аналогии с (12).

Численный эксперимент проводился для безразмерных параметров:

$$\overline{E}_{x_M,y_M,z_M} = E_{x_M,y_M,z_M}\Big/\rho_2 A div\vec{j};\ K_{осл} = E_{x_M,y_M,z_M}\Big/(E_{x_M,y_M,z_M})_{h=0}.$$

Объемная плотность токов в очаговой зоне может быть найдена в соответствии с [1] по формуле:

$$div\vec{j} = \frac{2\pi\lambda_1}{\varepsilon_0\varepsilon_1}LQc'\tau_p, \quad (22)$$

где L– линейный размер образующихся микротрещин, (м); c'– скорость микротрещинообразования, ($м^{-3}с^{-1}$); τ_p – время релаксации зарядов в вершине трещины, (с.); Q – линейная плотность заряда на единицу длины фронта трещины, ($Кл/м$); $\varepsilon_0\varepsilon_1$– абсолютная диэлектрическая проницаемость горных пород в слое 1, ($Ф/м$); λ_1 – удельная электрическая проводимость пород 1 слоя ($Ом^{-1}м^{-1}$).

Число накопленных к моменту землетрясения микротрещин в единице объема может быть определено из концентрационного критерия разрушения [1]:

$$(c^*)^{-\frac{1}{3}}/L \approx 3, \text{ откуда } c^* \approx 0.037L^{-3}. \quad (23)$$

Средняя скорость микротрещинообразования на первой наиболее длительной стадии подготовки землетрясения может быть определена по формуле:

$$c' = c^*/\tau,$$

где τ – время формирования очага разрушения в секундах (время между двумя последовательными событиями одного энергетического класса), которое определяется из сейсмологического закона повторяемости М.А. Садовского – К. Цубои [5]:

$$\lg\bar{\tau} = \frac{1}{3}\lg W - 3.5, \quad (24)$$

где $\bar{\tau}$ – время формирования очага разрушения в годах, W – выделяющаяся сейсмическая энергия, (Дж).

Согласно работе [3] связь энергии W с магнитудой M сейсмического события определяется по эмпирической формуле

$$\lg W = 1.44M + 5.24. \quad (25)$$

Таким образом, для средней скорости микротрещинообразования получаем оценку:

$$c' \approx 3.7 \cdot 10^{-6} W^{-1/3} L^{-3}. \quad (26)$$

Согласно эмпирическим закономерностям сейсмологии размер очага землетрясения связан с выделяющейся энергией следующим образом [5]:

$$A \approx 0.134 W^{1/3}. \quad (27)$$

Согласно работе [1] время релаксации зарядов на берегах микротрещин может быть определено по формуле

$$\tau_p \approx \frac{\varepsilon_0}{\lambda_1}\sqrt{\frac{\pi a_0}{0.8 a_p}}, \quad (28)$$

где $a_0 \approx 10^{-7}$ – стартовый размер образующихся микротрещин, (м); a_p – постоянная кристаллической решетки материала, (м); ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, ($\Phi/м$).

Используя (22)–(28) запишем размерный коэффициент в выражении напряженности поля (21):

$$K = \rho_2 A div\vec{j} = \frac{1.97 \cdot 10^{-4} \rho_2 Q}{\varepsilon_1 L^2}, \tag{29}$$

где ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость пород.

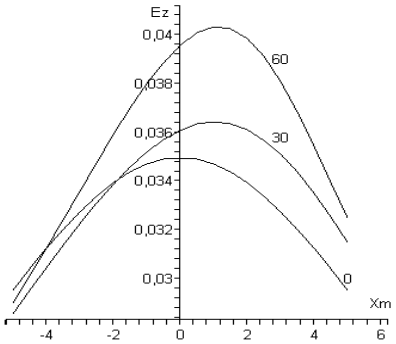
Таблица 1

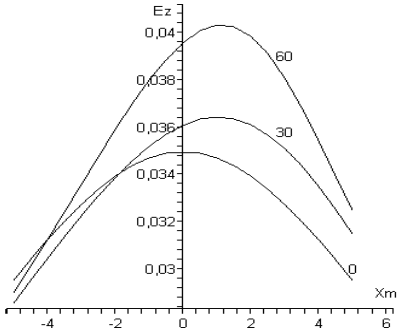
Значения размерного коэффициента k для разных горных пород на I стадии подготовки землетрясения

Порода	***Q*, Кл/м**	***L*, м**	**ε_1**	**ρ_2, Ом*м**	***K*, В/м**
Гранодиорит	$6{,}6 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-4}$	6	100	$5{,}4 \cdot 10^{-6}$
Порфирит	$7 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-4}$	5	100	$3 \cdot 10^{-6}$
Кварцевый диорит	$5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-4}$	6	100	$4 \cdot 10^{-6}$

а. $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0$, y_M =0, км

б. $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0$, y_M =0.02, км





в. $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0$, y_M =1, км

г. $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0$, x_M =0 км

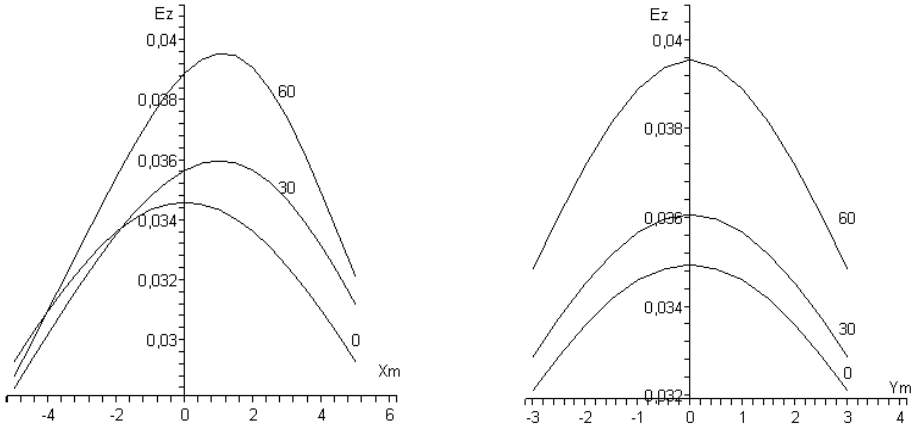


Рис. 2. Графики зависимости значений компоненты $\overline{E}_{z_M}$ ***от координат точки наблюдения*** и угла наклона эллипсоида: **а.** y_M =0, км.; **б.** y_M =0.02, км.; **в.** y_M =1, км.; **г.** x_M =0, км.; $\alpha = 0^0, 30^0, 60^0$

Вертикальная компонента безразмерной напряженности поля в атмосфере вычислялась по формуле, вытекающей из (21), в зависимости от координат x, y и при разных значениях угла α (см. рис. 1). При расчетах полагали, что h = 0.1, км; ρ_1 = 10^6, Ом*м; ρ_2 = 100, Ом*м; М=6; $z_M = z_1 + h$; $z_1 = 7$, км – расстояние от начала координат до границы между 1 и 2 слоями.

Результаты расчетов $\overline{E}_{z_M}$ представлены на рис. 2, *а–г.*

Как видно из полученных результатов, на первой наиболее длительной стадии подготовки крупного землетрясения с магнитудой М = 6, заметных возмущений атмосферного электромагнитного поля не наблюдается.

Наиболее резкий лавинно – неустойчивый рост числа микротрещин и образование крупных трещин наблюдается на последней, завершающей стадии подготовки землетрясения непосредственно перед формированием крупного разрыва типа надвига или сброса [6].

На этой стадии скорость микротрещинообразования может быть определена из кинетического уравнения [1]:

$$c' = \frac{c^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma\sigma_p - v_0}{kT}\right], \tag{30}$$

где τ_0 - период тепловых атомных колебаний, с.; γ – активационный объем, м^3; v_0 – энергия активационного разрушения, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/град; T – абсолютная температура пород, К^0; σ_p - напряжение, снимаемое при землетрясениях, Па.

Поэтому на данной стадии размерный коэффициент вычисляется следу-ющим образом:

$$K = \rho_2 A div\vec{j} = \frac{1.97 \cdot 10^{15} W^{1/3} Q}{\varepsilon_1 L^2} \exp\left[\frac{\gamma\sigma_p - v_0}{kT}\right]. \quad (31)$$

Значения размерного коэффициента К на последней стадии процесса подготовки землетрясения для некоторых горных пород приведены в табл. 2.

Таблица 2
Значения К для разных горных пород на конечной стадии подготовки крупного сейсмического события [1].

Порода	v_0, 10^{-19} Дж	γ, 10^{-27} м^3	*Q*, Кл/м	σ_p, МПа [3]	*L*, м	*K*, В/м
Гранодиорит	1,64	1,6	$6{,}6\cdot10^{-11}$	45	$2\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{6}$
Порфирит	1,52	1,23	$7\cdot10^{-11}$	49	$3\cdot10^{-4}$	$0{,}8\cdot10^{6}$
Кварцевый диорит	1,53	1,32	$5\cdot10^{-11}$	46	$2\cdot10^{-4}$	$1{,}27\cdot10^{6}$

Таким образом, на последней стадии подготовки крупного землетрясения напряженность электрического поля может достигать 10^4 В/м, что превышает пробойные для атмосферы значения напряженности поля. При определенной влажности атмосферы за несколько часов до землетрясения это может приводить к ее свечению, в особенности в горной местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.В.* Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород. [Текст]: дис… докт. техн. наук: 05.15.11: защищена 28.06.94: утв. 15.09.94 / Иванов Вадим Васильевич. – Кемерово, 1994. –366 с. – Библиогр.: с. 296 -320.

2. *Пархоменко Э.И.* Явления электризации в горных породах [Текст] / Элеонора Пархоменко. – М.: Наука, 1968. –180 с.

3. *Теркот Д.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред [Текст]: в 2 т./ Дональд Теркот, Геральд Шуберт. – М.: Мир, 1985, т2. –730 с.

4. *Муратов Р.З.* Потенциалы эллипсоида [Текст] / Р.З. Муратов. – М.: Атомиздат, 1976. – 143 с.

5. *Григорян С.С.* О механизме возникновения землетрясений и содержании эмпирических закономерностей сейсмологии / С. С. Григорян. – Доклады Академии Наук СССР [Текст]. – М.: 1988, т.299, в.5. – С. 1083 – 1087.

6. *Мячкин В.И.* Процессы подготовки землетрясений [Текст]/ В.И. Мячкин. – М.: Наука, 1978. – 231 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Хямяляйнен В.А. – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, первый проректор, зав. кафедрой теоретической и геотехнической механики ГУ КузГТУ,
Иванов В.В. – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и геотехнической механики ГУ КузГТУ,
Сирота Д.Ю. – старший преподаватель кафедры прикладной математики ГУ КузГТУ,
Бузук Р.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии КузГТУ.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Л. Шкуратник.*

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ			
АЛЕКСАНДРОВА Татьяна Николаевна	Методы оценки состояния и управления природно-техническими системами на основе комплекса технологических решений переработки природного и техногенного сырья	25.00. 36 25.00. 22	д.т.н.