

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235(088.8): 519.21

Д. Ю. Сирота, В.В. Иванов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ И РАЗМЕРОВ ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ ГОРНОГО УДАРА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Введение. Существует, по крайней мере, две точки зрения на интерпретацию термина «очаг землетрясения». Согласно Б. В. Кострову [1], «очаг тектонического землетрясения представляет собой разрыв сплошности материала по некоторой плоской площадке, при этом разрыв возникает в малой области, а затем распространяется от нее со скоростью, не превосходящей скорости продольных волн». Согласно В.И. Уломову [2], разрыв, а значит и очаг, представляет собой «область наибольших упругих напряжений и деформаций на локальном участке протяженного разлома, возникшую в результате последовательного перемещения его бортов». Таким образом, под очагом разрушения понимается некая область в Земле, где происходят разрушение и другие необратимые деформации горных пород, в результате чего формируется макроскопический разрыв. С другой стороны [3], под очагом тектонического землетрясения можно понимать область, содержащую как гипоцентр первичного землетрясения, так и гипоцентры афтершоков, порожденных первичным макроразрывом. Будем называть эту область «эффективным» очагом землетрясения.

В данной статье рассматривается методика оценки глубины залегания и размеров очаговой зоны горного удара. При этом разработанная методика позволяет получить не только размеры собственно очага горного удара, но и «эффективные» размеры очага.

1. Определение глубины залегания очага разрушения

Рассмотрим задачу вычисления глубины залегания условного центра очага разрушения по результатам измеренных потенциалов (градиентов потенциалов) естественного электрического поля на земной поверхности. В первом подпункте рассмотрим случай шарообразного очага горного удара.

1.1. Случай шарообразного очага

Формула, определяющая напряженность электрического поля на дневной поверхности в случае шарообразного очага, помещенного в нижнем слое трехслойного однородного изотропного про-

странства с плоскопараллельными границами, будет иметь вид:

$$E_3^{x_M} = k_E \frac{1}{3} \sum_{n=1}^N p(n) \bar{x}_M \cdot R^{-3}, \quad (1.1.1.)$$

где

$$\begin{aligned} k_E &= 2\bar{A}^3 \rho_2 (1 - K_{12}) h \cdot \operatorname{div} \vec{j}, \\ R &= \left[\bar{x}_M^2 + (\bar{y}_M + 2(n-1))^2 + \bar{z}_M^2 \right]^{1/2}, \\ \bar{x}_M &= x_M \cdot h^{-1}, \quad \bar{y}_M = y_M \cdot h^{-1}, \\ \bar{z}_M &= z_M \cdot h^{-1}, \quad \bar{A} = A \cdot h^{-1} \end{aligned}$$

— приведенные координаты точки наблюдения и радиус очага; h (м) — мощность экранирующего слоя пород; ρ_2 , ($\text{ом}\cdot\text{м}$) — удельное электросопротивление экранирующего слоя; $\operatorname{div} \vec{j}$, ($\text{ам}\cdot\text{м}$) — функция источников естественного электрического поля очага; K_{12} — коэффициент отражения экранирующего слоя; $p(n)$ определяется из [4].

Введем в рассмотрение геометрическую характеристику электрического поля: расстояние между точками максимума напряженности поля $|E_3^{x_M}| = \Delta$ (м). Преимущество данной характеристики в том, что она инвариантна относительно любой системы координат. Произведем анализ зависимостей величины Δ от линейных размеров очага сейсмического события. Найдем координаты точки экстремума компоненты $E_3^{x_M}$.

Производная по переменной x_M при условии $z_M = 0$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \left(E_3^{x_M} \right)'_{x_M} &= \frac{2}{3} \bar{A}^3 \rho_2 (1 - K_{12}) \operatorname{div} \vec{j} \times \\ &\times \sum_{n=1}^N p(n) \left[\bar{y}_M + 2(n-1) \right]^2 - 2\bar{x}_M^2 \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

Приравнивая найденную производную к нулю, можно заметить, что сомножитель, стоящий перед знаком суммы и содержащий величины \bar{A}^3

и $\vec{div} \vec{j}$, не влияет на координату x_M точки экстремума. Таким образом, величина Δ не зависит от размеров шарообразного очага.

Рассмотрим частный случай двухслойного вмещающего пространства. Формулы, определяющие напряженность электрического поля на дневной поверхности в этом случае, будут иметь следующий вид:

$$\left(E_3^{x_M} \right)_{K_{12}=0} = \frac{2}{3} A^3 \rho_1 \vec{div} \vec{j} |_{x_M} \left[x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 \right]^{-3/2} \quad (1.1.3)$$

Найдем производную от (1.1.3.):

$$\left(E_3^{x_M} \right)'_{x_M} = \frac{2}{3} A^3 \rho_2 (1 - K_{12}) \vec{div} \vec{j} \frac{y_M^2 - 2x_M^2}{\left[x_M^2 + y_M^2 \right]^{5/2}} \quad (1.1.4)$$

Приравняем найденную производную к нулю. Так как изолинии потенциала равномерно заряженного шара образуют концентрические круги, то для величины Δ будет верна формула: $\Delta = 2x_M^{max}$. Тогда формула, связывающая величину Δ и глубину залегания $H=y_M$, будет иметь вид:

$$H = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \Delta \quad (1.1.5)$$

Пример 1.1.1. Предположим, что расстояние между областями зон концентраций изолиний составляет 200, 250, 300 м. Вычислим примерную глубину залегания очага.

По формуле (1.1.5.) получаем:

$$H = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 200 = 141,4; H = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 250 = 176,8; \\ H = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 300 = 212,1, (м).$$

Рассмотрим теперь более сложный случай трехслойного вмещающего пространства. Поскольку в этом случае надо рассматривать формулу (1.1.2.), то получить простую формулу, аналогичную (1.1.5.), не удастся. Величина Δ будет зависеть не только от общей глубины залегания очага $H=y_M$, но также от мощности промежуточного слоя h и коэффициента экранирования K_{12} . Предположим в дальнейшем, что $K_{12}=-0,6$. В [5] был произведен анализ влияния промежуточного слоя на величину потенциала и напряженность поля очага: промежуточный слой порождал так называемый эффект экранирования. Поэтому представляется необходимым здесь и в дальнейшем строить регрессионные формулы для различных значений промежуточного слоя. Будем рассматривать мощности в 5, 25 и 50 метров.

Используя метод наименьших квадратов, получим

$$\overline{H}_{h=5} = 1,059305 + 0,711327 \cdot \overline{\Delta} - 0,862709 \cdot \ln(\overline{\Delta}) \quad (1.1.6)$$

следующие регрессионные формулы

$$\overline{H}_{h=25} = 0,08981 + 0,821478 \cdot \overline{\Delta} - \\ - 0,282177 \cdot (\overline{\Delta})^{0,5} \cdot \ln(\overline{\Delta}); \\ \overline{H}_{h=50} = -0,368155 + 0,138079 \cdot (\overline{\Delta}) \cdot \ln(\overline{\Delta}) + \\ + 1,087381 \cdot (\overline{\Delta})^{0,5}.$$

Все уравнения удовлетворяют критериям Фишера и Стьюдента на 5%-ном уровне значимости. Область применимости полученных формул: $H \in [100; 500]$, $\Delta \in [150; 700]$.

Можно заметить, что само наличие и мощность промежуточного слоя существенно влияет на полученные регрессионные формулы.

Пример 1.1.2. Предположим, что расстояние между областями зон концентраций изолиний составляет 200, 250, 300 метров. Вычисленные значения примерной глубины залегания очага записаны в таблицу 1.1.1.

Таблица 1.1.1. Определение глубины залегания очага

$\Delta, (м)$	$h, (м)$	$H, (м)$
200	5	131,7
250	5	166,3
300	5	201,0
200	25	125,1
250	25	156,3
300	25	187,9
200	50	133,6
250	50	163,7
300	50	194,0

Сравнивая результаты вычислений в примерах 1.1.1. и 1.1.2., можно заметить, что наличие промежуточного, экранирующего слоя оказывается влияние в сторону уменьшения глубины залегания очага по сравнению со случаем, когда промежуточный слой отсутствует.

1.2. Случай эллипсоидального очага

Рассмотрим более сложную модель очага сейсмического события в виде равномерно заряженного эллипсоида с полуосами $A \geq B \geq C$, причем полуось B направлена в сторону дневной поверхности; угол наклона эллипсоида к плоскости дневной поверхности равен α . В этом случае введенная ранее геометрическая характеристика Δ уже будет зависеть от размеров очага.

Поскольку в процессе трещинообразования очаговая зона накопления трещин увеличивается в размерах, то необходимо рассмотреть изменение размеров очага по всем трем осям координат. Предположим, что начальный размер очага $A=1,5$ м, что примерно соответствует энергии горного удара в 100 (Дж). Далее, в процессе трещинообразования очаговая зона будет увеличиваться; при этом увеличение произойдет в большей степени по полуосям A и B . Такое предположение обусловлено тем, что при гипотетическом увеличении макроразрывов может достигнуть поверхности Земли. В связи с этим предположим, что пре-

дельный размер полуосей эллипсоида составляют: $A=50$ (м), что соответствует предельной энергии большинства горных ударов в 10^6 (Дж). Величины полуосей B и C равны половине и десятой части полуоси A соответственно. Также положим глубину залегания очага равной 150, 250, 500 м, а мощность промежуточного слоя – 5, 25, 50 м. Коэффициент экранирования $K_{12} = -0.6$. Расчетный размах $amp(\bar{\Delta}) = \bar{\Delta}_{max} - \bar{\Delta}_{min}$ и $amp(\Delta) = \Delta_{max} - \Delta_{min}$ см. в таблице 1.2.1.

Таблица 1.2.1. Определение амплитуды величин Δ и $\bar{\Delta}$.

H , (м)	h , (м)	$amp(\bar{\Delta})$	$amp(\Delta)$, (м)
150	5	0,3438	1,7
150	25	0,0691	1,7
150	50	0,0365	1,8
250	5	0,3316	1,7
250	25	0,0431	1,0
250	50	0,0234	1,2
500	5	0,3529	1,8
500	25	0,0545	1,4
500	50	0,0234	1,2

Полученные величины фактического размерного размаха $amp(\Delta)$ не превосходят 2 м, что говорит о практической независимости Δ от размеров очага. Однако к этому выводу надо подходить с известной осторожностью, поскольку он верен только для рассмотренной модели изменения размеров очага. Несомненно, существуют закономерности изменения полуосей эллипсоида, при которых зависимость Δ от размеров очага будет более существенной, чем в разбранном случае.

Найдем связь Δ и H , рассматривая только трехслойное вмещающее очаг пространство. Параметры пространства из предыдущего пункта сохраним неизменными.

$$\begin{aligned}\overline{H}_{h=5} &= -3,580473 + 0,707718 \cdot \bar{\Delta} + 10,602172 \cdot (\bar{\Delta})^{-0,5} \\ \overline{H}_{h=25} &= 0,146716 + 0,732021 \cdot \bar{\Delta} - 0,227299 \cdot \ln^2(\bar{\Delta}) \\ \overline{H}_{h=50} &= -0,343885 + 0,138343 \bar{\Delta} \cdot \ln(\bar{\Delta}) + 1,078808(\bar{\Delta})^{0,5}\end{aligned}\quad (1.2.1)$$

Пример 1.2.1. В условиях примера 1.1.2. найдена оценочная глубина залегания очага сейсмического события (таблица 1.2.2).

Таблица 1.2.2. Определение глубины залегания очага.

Δ , (м)	h , (м)	H , (м)
200	5	132,0
250	5	166,5
300	5	201,3
200	25	125,5
250	25	156,5
300	25	188,2
200	50	129,0
250	50	159,1
300	50	189,3

Сравнивая результаты примеров 1.1.2 и 1.2.1. можно заметить их полную идентичность, в особенности для мощностей промежуточного слоя до 25 м.

2. Вычисление линейных размеров очага

2.1. Случай двухслойного пространства

Рассмотрим в качестве первого приближения очаг сейсмического события в виде равномерно заряженного шара. В этом случае оценки потенциала и компоненты вектора напряженности электрического квазистационарного поля имеют вид:

$$\Phi_3 = d_\Phi \frac{1}{3} \left[\frac{-2}{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1.1)$$

$$E_3^{xM} = d_E \frac{1}{3} x_M \left[\frac{-2}{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2} \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (2.1.2)$$

где $d_\Phi = 2\bar{A}^3 \rho_1 h^2 \operatorname{div} \vec{j}$ и $d_E = 2\bar{A}^3 \rho_1 h \operatorname{div} \vec{j}$.

Формула для радиуса очага в этом случае будут иметь вид:

$$A = h \cdot \left[\frac{1,5 \cdot \Phi_3 \sqrt{\frac{-2}{x_M^2 + y_M^2}}}{\rho_1 h^2 \operatorname{div} \vec{j}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.1.3)$$

Приведем примеры применения полученных формул. Будем использовать формулы (2.1.2.) и (2.1.3) следующим образом: при заданном значении глубины залегания очага $H=y_M$ вычисляется координата x_M точки максимума выражения

$$\left[\frac{-2}{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2} \right]^{-\frac{3}{2}} \quad \text{из формулы (2.1.2) для}$$

напряженности электрического поля, которая соответствует точке концентраций изолиний потенциала. Затем в найденной точке по формуле (2.1.3.) вычисляется радиус очага. Поскольку в указанную формулу входит объемная плотность токов $\operatorname{div} \vec{j}$, которая согласно [5] варьируется в зависимости от стадии подготовки сейсмического события (начальной и завершающей) и составляет следующие значения:

$$\left(\operatorname{div} \vec{j} \right)_{start} = \frac{7,089 \cdot 10^{-3}}{\rho_1 A} \quad \text{и} \quad \left(\operatorname{div} \vec{j} \right)_{finish} = \frac{0,2867}{\rho_1},$$

будем рассматривать два возможных случая размера очага: для начальной стадии и завершающей.

Пример 2.1.1. Значение потенциала электрического поля в районе концентрации изолиний, после проведения выработки, составляет 120 (мВ). В предположении, что глубина очага составляет 150, 250, 350 и 500 м, координата точки максимума напряженности электрического поля равна:

$$x_{H=150}^{max} = 106,1; x_{H=250}^{max} = 176,8; x_{H=350}^{max} = 247,5$$

и $x_{H=500}^{max} = 353,6$ м. Результаты вычислений по формуле (2.1.3) записаны в следующей таблице.

Таблица 2.1.1. Определение радиуса очага горного удара (м).

H	x^{\max}	Φ^{\max}	A_{start}	A_{finish}
150	106,1	0,12	68,3	4,9
250	176,8	0,12	88,2	5,8
350	247,5	0,12	104,3	6,5
500	353,6	0,12	124,7	7,3

Можно предположить, что полученные значения A_{start} соответствуют размерам очага в смысле Касахары [3], а A_{finish} – в смысле Кострова [1].

2.2. Случай трехслойного пространства

2.2.1. Очаг имеет форму шара.

В предположении шаровой формы очага формулы для потенциала и компонент вектора напряженности будут иметь вид:

$$\Phi_3 = k_\Phi \frac{1}{3} \sum_{n=1}^N p(n) R^{-1} \quad (2.2.1)$$

$$E_3^{xM} = k_E \frac{1}{3} \sum_{n=1}^N p(n) \bar{x}_M R^{-3} \quad (2.2.2)$$

где

$$\begin{aligned} k_\Phi &= 2\bar{A}^3 \rho_2 (1 - K_{12}) h^2 \vec{div} \vec{j}, \\ k_E &= 2\bar{A}^3 \rho_2 (1 - K_{12}) h \vec{div} \vec{j}, \\ R &= \left[\bar{x}_M^2 + (\bar{y}_M + 2n)^2 + \bar{z}_M^2 \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

Формулы для линейного размера очага будут иметь вид:

$$\begin{aligned} A &= h \cdot \left[\frac{3 \cdot \Phi_3}{2\rho_2(1-K_{12})h^2 \vec{div} \vec{j} \Sigma_1} \right]^{1/3}, \\ \Sigma_1 &= \sum_{n=0}^{\infty} (-K_{12})^n \cdot R^{-1}; \quad (2.2.1.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= h \cdot \left[\frac{3 \cdot E_3^{xM}}{2\rho_2(1-K_{12})h \vec{div} \vec{j} \Sigma_2} \right]^{1/3}, \\ \Sigma_2 &= \sum_{n=0}^{\infty} (-K_{12})^n \bar{x}_M \cdot R^{-3}. \quad (2.2.1.2) \end{aligned}$$

Приведем пример применения полученных формул. Вычислять предположительные размеры очага будем по рассмотренной в пункте 2.1 методике с учетом формул для объемной плотности токов и различных значений мощности промежуточного слоя h .

Пример 2.2.1.1. Потенциал поля в зоне концентраций изолиний равен 120 мВ. Предположительная глубина очага составляет 150, 250, 350 и 500 м. Предположительная мощность промежу-

точного слоя составляет величину в 5, 10 и 50 м. Коэффициент отражения границы второго слоя $K_{12}=-0.6$. Полученные значения запишем в форме таблицы 2.2.1.1.

Таблица 2.2.1.1. Радиус очага на начальной и конечной стадии трещинообразования (м)

H	h	x^{\max}	Φ^{\max}	A_{start}	A_{finish}
150	5	113,2	0,12	71,1	5,0
250	5	185,1	0,12	90,5	5,9
350	5	256,3	0,12	106,4	6,5
500	5	362,8	0,12	126,8	7,3
150	25	120,0	0,12	77,7	5,3
250	25	120,0	0,12	96,8	6,1
350	25	120,0	0,12	112,3	6,8
500	25	120,0	0,12	131,9	7,6
150	50	117,7	0,12	82,5	5,5
250	50	199,9	0,12	101,8	6,4
350	50	279,7	0,12	117,4	7,0
500	50	396,0	0,12	136,9	7,7

Произведя сравнительный анализ таблиц 2.1.1 и 2.2.1.1, можно сделать вывод о незначительности влияния экранирующего слоя при заданном K_{12} , если только мощность этого слоя мала по сравнению с суммарной глубиной залегания очага. Таким образом, если мощность экранирующего слоя мала (5, 10 м), а общая глубина выработки велика (больше 200 м), то допустимо применение формул для двухслойного пространства.

2.2.2. Очаг имеет форму эллипсоида

Рассматривая модель очага сейсмического события в виде эллипсоида, для расчетов линейных размеров очага нужно применять общие формулы [5] для потенциала и напряженности поля равномерно заряженного эллипсоида.

$$\Phi_3 = \rho_2 (1 - K_{12}) h^2 \vec{div} \vec{j} \sum_{n=0}^{\infty} (-K_{12})^n \begin{bmatrix} M_{000} - (A_M)^2 \\ \cdot M_{100} - (B_M)^2 M_{010} - \\ - z_M^2 M_{001} \end{bmatrix} \quad (2.2.2.1)$$

$$E_3^{xM} = 2\rho_2 h \vec{div} \vec{j} (1 - K_{12}) \times$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-K_{12})^n \begin{pmatrix} A_M \cos \alpha M_{100} - \\ - B_M \sin \alpha M_{010} \end{pmatrix} \quad (2.2.2.2)$$

где ξ для эллиптических интегралов M_{ijk} [6] вычисляется из уравнения:

$$\frac{(A_M)^2}{\bar{A}^2 + \xi} + \frac{(B_M)^2}{\bar{B}^2 + \xi} + \frac{(\bar{z}_M)^2}{\bar{C}^2 + \xi} = 1;$$

$$A_M = \bar{x}_M \cos \alpha + (\bar{y}_M + 2n) \sin \alpha,$$

$$B_M = -\bar{x}_M \sin \alpha + (\bar{y}_M + 2n) \cos \alpha$$

В дальнейшем (2.2.2.1) будем записывать следующим образом: $\Phi_3 = (1 - K_{12}) \cdot K_\Phi \cdot \Sigma_\Phi$, где

K_ϕ – размерный коэффициент.

Будем предполагать, что размеры очага изменяются в зависимости от глубины его залегания: чем глубже расположен очаг, тем потенциально он может иметь больший размер. Размеры очага будут изменяться следующим образом: на глубине $H=150$ м - $A=1.5\text{--}50$, на глубине $H=250$ м - $A=1.5\text{--}100$, на глубинах $H=350, 500$ м - $A=1.5\text{--}200$. Для любой глубины $B = 0.5 \cdot A$, $C = 0.1 \cdot A$. Кроме того, будем предполагать, что $K_{12}=-0.6$, а мощность промежуточного слоя $h = 5, 25, 50$ м.

Используя метод наименьших квадратов для нелинейных функций (вычислительный алгоритм Левенберга – Марквардта) найдем взаимосвязь между безразмерной величиной $\bar{A} = A \cdot h^{-1}$ и Σ_ϕ , вычисленной в точке максимума напряженности поля. Для величины $h=5$ м получаем формулы (2.2.2.3), для $h=25$ – формулы (2.2.2.4.), для $h=50$ – формулы (2.2.2.5.).

$$\bar{A}_{H=150} = 7,812689 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,332336} - 0,005343 ;$$

$$\bar{A}_{H=250} = 9,189265 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,331932} - 0,013479 ;$$

$$\bar{A}_{H=350} = 10,290091 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,330444} - 0,052008 ;$$

$$\bar{A}_{H=500} = 11,504194 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,331943} - 0,024907 ; \quad (2.2.2.3)$$

$$\bar{A}_{H=150} = 4,832556 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,332388} - 0,001008 ;$$

$$\bar{A}_{H=250} = 5,595662 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,332035} - 0,002488 ;$$

$$\bar{A}_{H=350} = 6,181721 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,330672} - 0,009582 ;$$

$$\bar{A}_{H=500} = 6,889809 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,332047} - 0,004617 ; \quad (2.2.2.4)$$

$$\bar{A}_{H=150} = 3,983707 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,332396} - 0,000502 ;$$

$$\bar{A}_{H=250} = 4,584785 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,332040} - 0,001241 ;$$

$$\bar{A}_{H=350} = 5,033973 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,330728} - 0,004683 ;$$

$$\bar{A}_{H=500} = 5,595675 \cdot \Sigma_{x_max}^{0,332076} - 0,002254 \quad (2.2.2.5)$$

Все регрессионные уравнения удовлетворяют статистическим критериям Стьюдента и Фишера при уровне значимости 5%.

Рассмотрим применение полученных формул для определения размеров очага на начальной и завершающей стадии трещинообразования. Разберем вначале более простой случай завершающей стадии. Размерный коэффициент из (2.2.2.1) будет вычисляться по формуле [6]:

$$K_\Phi^{finish} = \frac{(1 + K_{12})h^2 \cdot 0,2867}{(1 - K_{12})} .$$

Предположим, что $K_{12}=-0.6$ и $h=(5, 25, 50)$ м, тогда сомножитель при Σ_ϕ в формуле (2.2.2.1.) будет равен $(1 - K_{12}) \cdot K_\Phi^{finish} = \{2,867; 71,675;$

286,7\}.

Пример 2.2.2.1. Потенциал поля в зоне концентраций изолиний равна 120 и 80 мВ. Предположительная глубина очага составляет 150, 250, 350 и 500 м. Предположительная мощность промежуточного слоя составляет величину $h = (5, 25, 50)$ м. Коэффициент отражения границы второго слоя $K_{12} = -0.6$. Предположим, что процесс трещинообразования перешел в завершающую стадию. Получим значения величины A_{finish} , которые запишем в таблицу 2.2.2.1.

Таблица 2.2.2.1. Линейные полуразмеры очага, вычисленные по формулам (2.2.2.3.), (2.2.2.4.), (2.2.2.5.)

$h, (m)$	$H, (m)$	$\Phi, (B)$	$A_{finish}, (m)$
5	150	0,12	13,6
	250	0,12	16,0
	350	0,12	17,8
	500	0,12	20,0
	150	0,08	12,0
	250	0,08	14,0
	350	0,08	15,5
	500	0,08	17,4
25	150	0,12	14,4
	250	0,12	16,7
	350	0,12	18,4
	500	0,12	20,5
	150	0,08	12,6
	250	0,08	14,6
	350	0,08	16,1
	500	0,08	18,0
50	150	0,12	15,0
	250	0,12	17,3
	350	0,12	19,0
	500	0,12	21,0
	150	0,08	13,1
	250	0,08	15,1
	350	0,08	16,6
	500	0,08	18,4

Поскольку все значения A_{finish} входят в интервалы, использованные для построения этих регрессионных формул, найденные значения можно считать достоверными.

Сравнивая значения A_{finish} из таблиц 2.2.1.1 и 2.2.2.1, можно отметить, что линейные полуразмеры очага в случае модели «эллипсоид» примерно в три раза превосходят радиус очага в случае модели «шар». Можно сделать предположение, что и для начальной стадии трещинообразования мы получим аналогичное соотношение между размерами очагов в разных моделях. Поскольку полученные величины A_{start} будут превосходить глубину залегания H , то они несомненно являются бессмысленными, однако позволяют предположить, что зона «эффективного» очага в смысле Касахары охватывает все пространство между

очагом и дневной поверхностью. Это утверждение вполне согласуется с тем фактом, что в некоторых случаях макроразрыв достигает дневной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костров, Б.В. Механика очага тектонического землетрясения / Б.В. Костров; –М.: Наука, 1975. – 175 с.
2. Уломов В.И. Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФЗ РАН –2008, Т.1. с.127 – 146
3. Касахара, К. Механика землетрясений / К. Касахара; – М.: Мир, 1985. – 264 с.
4. Сирота, Д. Ю. Повышение скорости вычислений для одной задачи электроразведки / Д.Ю. Сирота // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2008, №1. –С. 81 – 84.
5. Сирота, Д.Ю. Эффект экранирования электрического поля от глубинных очагов разрушения в слоистой среде / Д.Ю. Сирота // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2008, №3. –С. 36 – 39.
6. Иванов, В.В. Электромагнитные возмущения в атмосфере перед крупными сейсмическими событиями / В.В. Иванов, Д.Ю. Сирота // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2006, №6.2. –С. 3 – 8.

Авторы статьи.

Иванов Вадим Васильевич – докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики КузГТУ Тел. 8-3842-58-10-56	Сирота Дмитрий Юрьевич – ст. преподаватель каф. прикладной математики e-mail: sirotadm@kuzbass.net
--	---