Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVIII, вып. 1, 1969 г.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ СТРЕЛЯНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД В НЕЗАКРЕПЛЕННЫХ ВЫРАБОТКАХ НА ПРИМЕРЕ АПАТИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХИБИН

В. Н. Крапивин, А. Г. Протосеня

Кировский рудник комбината Апатит отрабатывает пластообразную апатито-нефелиновую залежь со средней мощностью 150—200 *м*, расположенную между ийолит-уртитами в лежачем боку и рисчорритами в висячем. Простирание залежи северо-западное, 310—320°, падение под углом 30±5°. Крепость по Протодьяконову: руды $f=6$—8, вмещающих пород $f=10$—12. Проведение горизонтальных и вертикальных выработок зачастую сопровождается внезапным отделением (с резким треском) кусков породы от контура и забоя выработки. Это явление, называемое стрелянием, наблюдается при проведении выработок как по руде, так и по породам висячего и лежачего боков. Активнее всего стреляние проявляется сразу после взрывных работ при проходке выработок.

Первые стреляния отмечались на Кировском руднике в 1950 г. на глубине 100—120 *м* при разделке подсечки блока 2/3 горизонта 465 *м* в зоне богатой руды; затем на горизонтах 392 и 322 *м* (глубина от поверхности 260 и 360 *м*) в местах сопряжений ортов 6, 7, 8 и 12, 13 с восточным откаточным штреком. Этим участкам соответствуют максимальные высотные отметки гористого рельефа местности (рис. 1). Стреляния наблюдаются при проведении капитальных выработок подготавливаемого в настоящее время горизонта 252 *м* ($H=450$ *м*). На руднике Расвумчорр, отрабатывающем аналогичную по горно-геологическим условиям залежь, интенсивные стреляния на

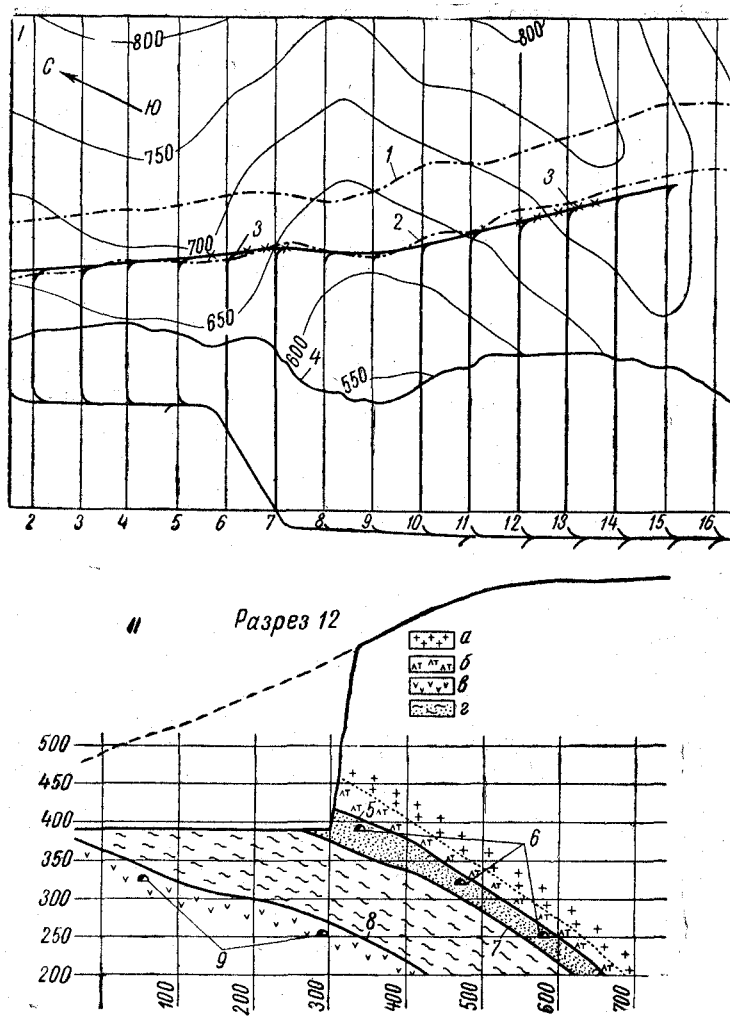


Рис. 1. Участок плана поверхности и горных работ горизонта 322 *м* Кировского рудника (*I*) и разрез 12 (*II*):

1 и *2* — контакт горизонтов 252 и 322 *м*; *3* — зоны стреляний; *4* — граница обрушения висячего бока; *5* — контакт богатой зоны; *6* — восточные откаточные штреки горизонтов 392 и 252 *м*; *7* — контакт бедной и богатой зон; *8* — контакт бедной зоны; *9* — западные откаточные штреки горизонтов 322 и 252 *м*

а — рисчорриты; *б* — породы контактной зоны; *в* — ийолит-уртиты; *г* — апатито-нефелиновое рудное тело

глубине около 100 *м* наблюдались в 1962 г. при проведении материально-ходовой штольни горизонта 600 *м*. В наблюдаемых случаях с увеличением глубины разработки активность и частота стреляний возрастает.

Проявление стреляний на указанных рудниках имеет характерную особенность, заключающуюся в постоянстве ориентирования зон стреляний. Так, на Кировском руднике в вертикальных выработках квадратного и прямоугольного сечения стреляниям подвержены лишь определенные углы и боковые стенки выработок. При этом ориентирование зон разрушений в результате стреляний имеет постоянное направление, близкое к северному. Аналогичная картина наблюдается и в вертикальных выработках круглого сечения. Эта особенность ориентировки сохраняется в различных участках шахтного поля.

В горизонтальных выработках, различно ориентированных в пространстве, проявление стреляний имеет те же особенности. В выработках, пройденных в меридиональном направлении (по простиранию), стреляния наблюдаются только в почве и кровле, а также в забое во время проведения. В стенках выработок их нет. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в выработках, пройденных в широтном направлении (орты), стреляния либо незначительны, либо совсем не наблюдаются.

Известно, что под действием веса покрывающих пород в наиболее напряженном состоянии оказываются стенки горизонтальных выработок, в которых, как правило, и происходит стреляние. Для рассматриваемого случая величина напряжений, обусловленных весом налегающих пород, незначительна и составляет 30—100 *кГ/см*^{2}. Руды и породы месторождения имеют прочность на одноосное сжатие 900—1800 *кГ/см*^{2}. Достижение на контуре выработок разрушающих напряжений, обусловленных весом пород налегающей толщи, в данном случае, очевидно, невозможно. Указанные особенности распределения зон стреляний на контурах горизонтальных и вертикальных выработок, а также проявление стреляний на малых глубинах представляются следствием некоторых дополнительных направленных сил в массиве.

Согласно положениям теории упругости равномерность распределения напряжений на контуре выработок зависит от формы последних и от условий нагружения. Для выработок одинаковой формы наличие стреляний в почве и кровле в выработках меридионального направления и отсутствие их в выработках широтного направления для одной и той же глу-

бины свидетельствует о различии в условиях нагружения. А это возможно при действии дополнительных сил P в массиве в широтном направлении. В этом случае выработки широтного направления имеют одинаковые условия на бесконечности: $\sigma_1=\sigma_2=\lambda P$. Напряжения по контуру таких выработок будут распределены равномерно. Визуальными наблюдениями подтверждается, что в выработках указанного направления стреляния не наблюдаются.

Натурные измерения напряженного состояния пород, выполненные на руднике Расвумчорр методом разгрузки [Марков, Турчанинов, 1966], выявили направленное действие сил в массиве с азимутом 110—120°, значительно превышающих гравитационные. Из анализа проявлений стреляния вытекают предположения о независимости стреляний от различия в свойствах слагающих пород и об аномально высоком действии сил в массиве в широтном направлении.

Стреляния и горные удары на незначительных глубинах в условиях рудных месторождений отмечались как в зарубежной, так и отечественной практике [Айзаксон, 1961; Зейц, 1967; Малахов, Черноус, 1960; Черниг, 1959]. Причиной их, по современным представлениям, является существование направленных сил в массиве, обусловленных влиянием тектонических напряжений.

Лабораторные испытания на сжатие образцов пород и руд, слагающих месторождение, по данным ВНИМИ, показали прямолинейную зависимость между напряжениями и деформациями вплоть до разрушения, что позволяет считать массив пород упругим. Кроме того, породы проявляют способность к накоплению потенциальной энергии упругих деформаций.

Выясним указанные закономерности распределения зон стреляний с помощью статической теории упругости. Правомерность такой постановки задачи объясняется тем, что рассматривается не механизм стреляний как динамический процесс, а возможные причины, их вызывающие. Заметим, что подготовительно-нарезные выработки на Кировском и других рудниках комбината проводятся обычным буровзрывным способом, в основном без крепления.

Исследуем напряженное состояние массива горных пород вокруг выработок, контур которых имеет технологические неровности. При постановке задачи предполагаются направленное действие сил в массиве и большая длина выработки по сравнению с ее поперечным сечением. Это позволяет решать плоскую задачу теории упругости. Напряженное состояние

рассматривается главным образом вблизи контура выработки.* Тогда в предлагаемой постановке данная задача

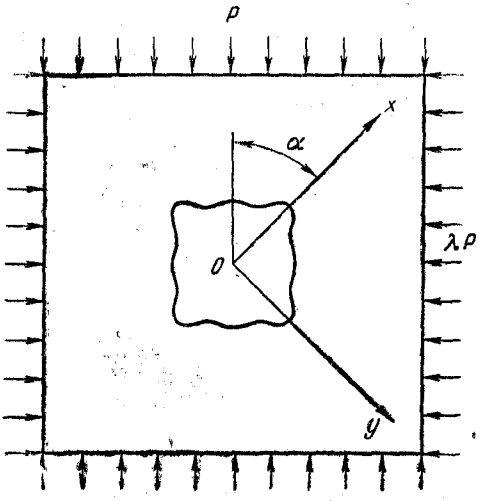


Рис. 2. Расчетная схема

сводится к задаче о распределении напряжений в бесконечной невесомой плоскости с отверстием (рис. 2) при сжимающих усилиях на бесконечности $\sigma_1 = P$, $\sigma_2 = \lambda P$, где P — сила, действующая в массиве до проведения выработки; λ — коэффициент бокового распора. Контур отверстия [Баклашов, Руппенейт, 1965] с достаточной степенью точности может быть описан кривой трохоидального типа. Решение задачи [Мусхелишвили, 1966] сводится к построению двух аналитических функций $\varphi(\zeta)$ и $\psi(\zeta)$ по контурным условиям.

Искомые функции находятся из уравнений

$$\left.\begin{aligned} \varphi(\zeta) &= -\frac{X+iY}{2\pi(1+\chi)}\ln\zeta + C\Gamma\zeta + \varphi_0(\zeta); \\ \psi(\zeta) &= \frac{(X-iY)\chi}{2\pi(1+\chi)}\ln\zeta + C\Gamma'\zeta + \psi_0(\zeta), \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

* Задача о влиянии неровностей контура рассмотрена И. В. Баклашовым, К. В. Руппенейтом [1965] в предположении, что начальное напряженное состояние массива гидростатическое ($\sigma_1 = \sigma_2 = P$).

где $\chi=3-4\mu$; μ — коэффициент Пуассона; X, Y — компоненты главного вектора всех внешних сил, приложенных к контуру отверстия; Γ, Γ' — постоянные, связанные с напряжениями на бесконечности следующими зависимостями:

$$\Gamma=\frac{1}{4}(\sigma_1+\sigma_2);\quad \Gamma'=-\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_2)\,e^{-2i\alpha}; \tag{2}$$

α — угол между напряжением σ_1 и осью x.

$\varphi_0(\zeta)$ и $\psi_0(\zeta)$ соответственно равны [Мусхелишвили, 1966]

$$\varphi_0(\zeta)=\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{\lambda_1}\frac{\omega(\sigma)}{\overline{\omega'(\sigma)}}\frac{\overline{\varphi_0'(\sigma)}}{\sigma-\zeta}\,d\sigma-\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{\lambda_1}\frac{f_0(\sigma)}{\sigma-\zeta}\,d\sigma; \tag{3}$$

$$\psi_0(\zeta)=\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{\lambda_1}\frac{\overline{\omega(\sigma)}}{\omega'(\sigma)}\frac{\varphi_0'(\sigma)}{\sigma-\zeta}\,d\sigma-\frac{1}{2\pi i}\int\limits_{\lambda_1}\frac{\overline{f_0(\sigma)}}{\sigma-\zeta}\,d\sigma, \tag{4}$$

где σ — координата ζ на контуре единичной окружности λ_1; $\omega(\sigma)$ — значение отображающей функции $\omega(\zeta)$ на контуре λ_1; $\varphi_0(\sigma)$ — значение $\varphi_0(\zeta)$ на контуре λ_1; $f_0(\sigma)$ находится из уравнения

$$f_0(\sigma)=f(\sigma)+\frac{X+iY}{2\pi}\ln\sigma-\frac{X-iY}{2\pi}\frac{\omega(\sigma)\,\sigma}{\overline{\omega'(\sigma)}}-$$
$$-R\Gamma\left[\sigma+\frac{\omega(\sigma)}{\overline{\omega'(\sigma)}}\right]-\frac{R\Gamma'}{\sigma}. \tag{5}$$

С помощью отображающей функции [Баклашов, Руппенейт, 1965] конформно отобразим внешность единичного круга на внешность трохоидального контура, т. е. контура, описанного по кругу, эллипсу, криволинейному треугольнику, криволинейному квадрату и любому равностороннему криволинейному многоугольнику с периодическими возмущениями

$$Z=\omega(\zeta)=R\left(\zeta+\frac{C_1}{\zeta^n}+\frac{C_2}{\zeta^m}\right), \tag{6}$$

где R — величина, определяющая размеры контура выработки; C_1 — величина, определяющая очертания проектного контура; n — величина, определяющая форму проектного контура; C_2 — амплитуда возмущений в долях R; m — целое число периодических возмущений без единицы.

При $n=0$ и $C_1=0$ проектный контур — окружность; $n=1$ и $0<C_1<1$ — эллипс; $n=2$ и $C_1=0{,}1$ — контур, близкий к сводчатому; $n=3$ и $C_1={}^1/_9 \div {}^1/_{10}$ — криволинейный квадрат; $n=4$; 5; 6 ... и $0<C_1<{}^1/_n$ — криволинейный многоугольник, соответствующий полигональному контуру.

По известным значениям $\varphi(\zeta)$, $\psi(\zeta)$ и $\omega(\zeta)$ определяются компоненты напряженного состояния из уравнений

$$\sigma_\Theta + \sigma_\rho = 4\mathrm{Re}\,\Phi(\zeta); \tag{7}$$

$$\sigma_\Theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\Theta} = \frac{2\zeta^2}{\rho^2\,\overline{\omega'(\zeta)}}\left[\overline{\omega(\zeta)}\,\Phi'(\zeta) + \omega'(\zeta)\,\Psi(\zeta)\right], \tag{8}$$

где

$$\Phi(\zeta) = \frac{\varphi'(\zeta)}{\omega'(\zeta)}; \quad \Psi(\zeta) = \frac{\psi'(\zeta)}{\omega'(\zeta)}; \tag{9}$$

σ_Θ — окружное нормальное напряжение; σ_ρ — радиальное нормальное напряжение; $\tau_{\rho\Theta}$ — касательное напряжение. Функция $\varphi_0(\zeta)$ аналитична вне λ_1 и может быть разложена в ряд

$$\varphi_0(\zeta) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_j}{\zeta^j}. \tag{10}$$

Для получения функции $\varphi_0(\zeta)$ подставляем выражения (2), (5), (6), (10) в уравнение (3) с учетом, что контур выработки свободен от внешних усилий и напряжения на бесконечности $\sigma_1=P$, $\sigma_2=\lambda P$, а следовательно,

$$f(\sigma)=0;\ X=Y=0; \tag{11}$$

$$\Gamma = \frac{P(1+\lambda)}{4}; \quad \Gamma' = -\frac{P(1-\lambda)}{2}\,e^{-2i\alpha}. \tag{12}$$

Получим

$$\sum_{j=1}^{\infty}\frac{a_j}{\zeta^j} + \sum_{j=1}^{m-2} j\bar{a}_j \sum_{k=0}^{k=\frac{m-j-2}{n+1}} a_{k(n+1)}\frac{1}{\zeta^{m-j-1-k(n+1)}} =$$

$$= \frac{PR(1+\lambda)}{4}\sum_{k=0}^{k=\frac{m-n}{n+1}} a_{k(n+1)}\frac{1}{\zeta^{m-k(n+1)}} + \frac{PR(1-\lambda)}{2}\,e^{-2i\alpha}\frac{1}{\zeta}, \tag{13}$$

где

$$a_0 = -C_2;$$

$$\cdots\cdots$$

$$a_{k(n+1)} = (-1)^{k(n+1)+1}(nC_1)^k C_2;$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$a_{m-n} = (-1)^{(m-n)+1}(nC_1)^{\frac{m-n}{n+1}} C_2. \quad k = 0,\ 1,\ 2, \ldots,\ \frac{m-n}{n+1}.$$

Сравнивая в уравнении (13) коэффициенты при одинаковых степенях, получим систему из m—2 алгебраических уравнений. Отделяя действительные и мнимые части, разобьем ее на две самостоятельные неоднородные системы. Полученные системы имеют ненулевые решения, если их определители не равны 0. Как показывают расчеты, для большого диапазона значений n, m, C_1, C_2 определители не равны 0. Справедливость этого должна быть проверена при конкретных расчетах.

Обозначим через A и B определители действительных и мнимых частей системы m—2 уравнений, а через A_j и B_j определители, получающиеся из предыдущих заменой столбца j в матрице столбцом из свободных членов. Тогда найденные коэффициенты будут иметь вид

$$\alpha_j = \frac{A_j}{A} + i\frac{B_j}{B}. \tag{14}$$

Внося значение коэффициентов (14) в разложение (10), имеем

$$\varphi_0(\zeta) = \sum_{j=1}^{m-2}\left(\frac{A_j}{A} + i\frac{B_j}{B}\right)\frac{1}{\zeta^j} + \frac{PR(1+\lambda)a_0}{4}\frac{1}{\zeta^m}. \tag{15}$$

Подставляя выражения (11), (12), (15) в первое из уравнений (1), получим значение

$$\varphi(\zeta) = \sum_{j=1}^{m-2}\left(\frac{A_j}{A} + i\frac{B_j}{B}\right)\frac{1}{\zeta^j} - \frac{PR(1+\lambda)C_2}{4}\frac{1}{\zeta^m} + \frac{PR(1+\lambda)}{4}\zeta. \tag{16}$$

Функцию $\psi(\zeta)$ найдем, подставив выражения (5), (6), (11), (12), (15) в уравнение (4) и произведя соответствующие математические операции:

$$\psi(\zeta)=\sum_{j=1}^{m-2}\left\{j\left(\frac{A_j}{A}+i\frac{B_j}{B}\right)\left[\sum_{k=0}^{k=\frac{m-j-n-1}{n+1}}a_{k(n+1)}\zeta^{m-j-1-k(n+1)}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{1+C_1\zeta^{n+1}+C_2\zeta^{m+1}}{mC_2+nC_1\zeta^{m-n}-\zeta^{m+1}}\zeta^{m-j-1}\right]\right\}-\frac{PR(1+\lambda)}{4}\times$$

$$\times\left[\frac{1}{\zeta}+\sum_{k=0}^{k=\frac{m-n}{n+1}}a_{k(n+1)}\zeta^{m-k(n+1)}+\frac{1+C_1\zeta^{n+1}+C_2\zeta^{m+1}}{\zeta^{m+1}-nC_1\zeta^{m-n}-mC_2}\times\right.$$

$$\left.\times\left(\zeta^m-mC_2\frac{1}{\zeta}\right)\right]-\frac{(1-\lambda)PRe^{-2i\alpha}}{2}\zeta. \qquad (17)$$

Построенные функции $\varphi(\zeta)$ и $\psi(\zeta)$ позволяют определить компоненты напряжений σ_Θ, σ_ρ, $\tau_{\rho\Theta}$ вокруг горной выработки с контуром, имеющим технологические неровности. Компоненты напряжений находим, подставив значения (16) и (17) в уравнения (9), (7), (8) и отделив действительные и мнимые части уравнений.

Окружное нормальное напряжение σ_Θ на контуре можно получить из уравнения (7), учитывая, что на контуре $\sigma_\rho=0$, $\rho=1$

$$\sigma_\Theta=4\frac{\frac{(1+\lambda)P}{4}[1-m^2C_2^2-mnC_1C_2\cos(m-n)\Theta-}{1+m^2C_2^2+}\ldots\rightarrow$$

$$\leftarrow\ldots\frac{-nC_1\cos(n+1)\Theta]-\frac{1}{R}\sum_{j=1}^{m-2}j\left\{\frac{A_j}{A}[\cos(j+1)\Theta-\right.}{+n^2C_1^2-2nC_1\cos(n+1)\Theta-}\ldots\rightarrow$$

$$\leftarrow\ldots\frac{-nC_1\cos(n-j)\Theta-mC_2\cos(m-j)\Theta]+\frac{B_j}{B}[\sin(j+1)\Theta-}{-2mC_2\cos(m+1)\Theta+}\ldots\rightarrow$$

$$\leftarrow\ldots\left.\frac{-nC_1\sin(n-j)\Theta+mC_2\sin(m-j)\Theta]}{+2nmC_1C_2\cos(m-n)\Theta}\right\}. \qquad (18)$$

Определим напряжение на контуре вертикальных выработок применительно к условиям Кировского рудника. Вертикальные выработки имеют квадратное и прямоугольное сечение. Пространственная ориентировка их показана на рис. 3.

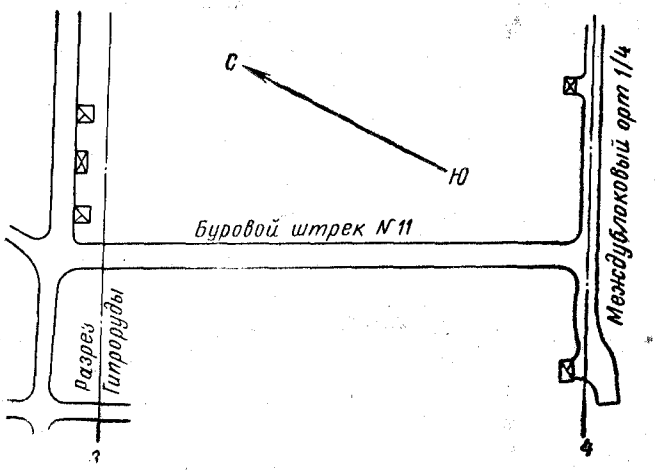


Рис. 3. Схема расположения выработок

Рассмотрим квадратное сечение с параметрами $n=3$; $m=7$; $C_2=0{,}06\ R$; $C_1=\frac{1}{9}$; $\alpha=0$. Параметры выбраны для рассматриваемого случая из данных практики.

Основные прочностные и деформационные характеристики руд и вмещающих пород рассматриваемого месторождения приведены в табл. 1.

Коэффициент Пуассона пород в среднем равен $\mu=0{,}25$ $\left(\lambda=\frac{1}{3}\right)$. Подставляя данные значения m, C_1, C_2, α, λ и выражения (6), (9), (13) в уравнении (18), получим

$$\sigma_\theta = 4P\,\frac{0{,}32-0{,}215\cos 2\theta-0{,}112\cos 4\theta+0{,}125\cos 6\theta-0{,}118\cos 8\theta}{1{,}287-0{,}38\cos 4\theta-0{,}84\cos 8\theta}. \qquad (19)$$

Таблица 1

Местонахождение	Горные породы	Объемный вес, $г/см^3$	Предел прочности, $кГ/см^2$		Деформационные характеристики		
			на сжатие	на растяжение	коэффициент Пуассона при нагрузке	коэффициент Пуассона при разгрузке	модуль упругости, $10^5 кГ/см^2$
Висячий бок	Рисчоррит	2,6	1520—1830	96	0,28	0,25	5,76
	Малиньит	3,0	1150—1740	120	0,25	0,29	5,57
	Сфеновый ийолит	2,9	1150—890	65	0,25	0,34	8,00
Руда	Пятнистая	2,9	900	50	0,23	0,23	10,00
	Линзовидная	3,0	1380—1220	45	0,25	0,25	9,41
Лежачий бок	Ийолит	2,9	1480—1530	127	0,25	0,25	9,41

Расчеты, выполненные по формуле (19), сведены в табл. 2 и представлены в виде эпюры на рис. 4.

По данным исследований КФ АН СССР [Марков, Турчанинов, 1966], величина силы P составляет 570 $кГ/см^2$. Тогда в точке $\Theta=0°$ $\sigma_\Theta = -74{,}2$ $кГ/см^2$, а в точке $\Theta=90°$ $\sigma_\Theta = 6660$ $кГ/см^2$. Из табл. 1 и 2 следует, что разрушения на контуре незакрепленных горных выработок для условий Кировского рудника происходят не от растягивающих напряжений, а в результате действия максимальных сжимающих напряжений. Зоны этих напряжений имеют определенную ориентировку (рис. 4).

Шахтные наблюдения показывают, что ориентирование зон стреляний в вертикальных выработках носит постоянное направление северо-северо-восток — юго-юго-запад (рис. 3, 4).

Таблица 2

θ, *град*	σ_θ в долях P	
	на неровном контуре	на гладком контуре
0	−0,13	0
22,5	0,38	0,62
45	1,49	1,00
67,5	1,27	1,75
90	11,7	4,00

Отсюда следует, что зоны максимальной концентрации сжимающих напряжений на контуре выработок соответствуют зонам стреляний. Таким образом, стреляния на контуре выработок происходят в результате действия максимальных сжимающих напряжений, коэффициент концентрации которых достаточно велик. Последний в значительной степени зависит от технологических неровностей. Для снижения активности стреляний может быть рекомендовано гладкое взрывание.

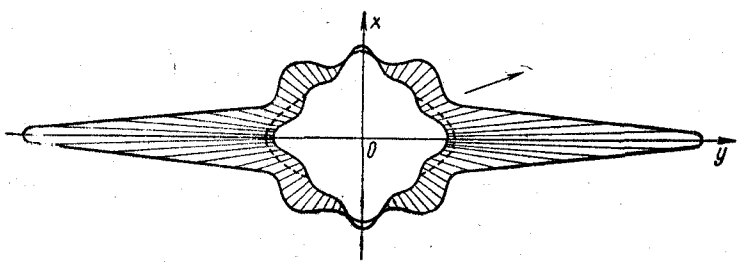


Рис. 4. Эпюра распределения тангенциальных напряжений
Пунктирными линиями показаны зоны стреляний

Для горизонтальных выработок в направлении простирания подход к объяснению стреляний аналогичен, но задача усложняется влиянием наложения поля напряжений от гористого рельефа поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

Айзаксон Э. Давление горных пород в шахтах. Госгортехиздат, 1961.

Баклашов И. В., Руппенейт К. В. Прочность незакрепленных горных выработок. М., Недра, 1965.

Зейц Ф. Ю. Породные взрывы на Таштагольском железном руднике. Горн. журн., № 8, 1967.

Малахов Г. М., Черноус А. П. Вскрытие и разработка рудных месторождений на больших глубинах. Госгортехиздат, 1960.

Марков Г. А., Турчанинов И. А. О напряженном состоянии массива скальных пород, не нарушенного выработками. В сб. «Пробл. механики горных пород». Алма-Ата, Наука, 1966.

Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Наука, 1966.

Чернигг Э. Горные удары на свинцово-цинковых месторождениях Альп. Реф. журн., Геология, III, горн. дело, 1959.