

DOI: 10.12737/article_5968b451964e89.96580358

Храмцов Б.А., канд. техн. наук, доц.,
Былин И.П., доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Корнеев П.В., аспирант
Белгородский государственный национальный исследовательский университет

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

bilin1948@mail.ru

Данная статья посвящена актуальной проблеме определения напряженного состояния массива горных пород на больших базах с использованием современных высокоточных геодезических приборов. При разработке месторождения полезных ископаемых подземным способом с обрушением налегающей толщи массива горных пород происходит образование провалов и зон обрушений на земной поверхности. Провалы и зоны обрушения на земной поверхности используются в качестве возмущающего фактора, которые вызывают перераспределение напряжений в массиве горных пород. Образовавшиеся полости заполненной обрушенными породами могут аппроксимироваться на земной поверхности окружностью или эллипсом. Предложена методика и схемы для расчета напряжений при выходе зоны обрушения на земную поверхность в виде окружности, с использованием результатов наблюдений за сдвижением реперов на земной поверхности по профильным линиям.

Ключевые слова: зона обрушения, массив горных пород, напряженное состояние, геодезические приборы, профильные линии, репера, провал.

В настоящее время актуальной проблемой остается разработка мер охранызданий, сооружений и природных объектов при разработке мощных железорудных месторождений подземным способом. В работе Н.П. Влоха, А.Д. Сашурин и А.В. Зубкова [1] была обоснована необходимость определения интегрального поля напряжений на больших базах с целью обеспечения безопасности ведения горных работ на участках шахтных полей от сотен метров и более, а также расчета параметров предохранительных целиков и разработки мероприятий по охранезданий и сооружений на земной поверхности от их подработки горными работами.

Современные методы [2–4] позволяют оценить безопасное состояниезданий, сооружений и природных объектов при сдвигении горных пород и земной поверхности, в которых для расчета в качестве граничных условий используют градиенты естественного поля напряжений, действующие в массиве горных пород.

В качестве возмущающего фактора в естественном поле напряжений используют образовавшиеся в массиве горных пород провал и зону обрушения над выработанным пространством, форма которой на земной поверхности может быть аппроксимирована окружностью или эллипсом [5–8].

Для определения напряжений необходимо заложить наблюдательную станцию на земной поверхности по специально разработанному

«Проекту», соблюдая требования «Инструкции по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при разработке рудных месторождений» [9] и ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций основанийзданий и сооружений [10].

Опорные грунтовые реперы закладываются за пределами зоны возможных деформаций, не менее двух пунктов, как со стороны висячего, так и лежащего боков рудного тела. Расстояние между опорными реперами должно быть не менее 70 метров. В качестве опорных реперов рекомендуется использовать осевые пункты стволов и надшахтныхзданий, пункты триангуляции и полигонометрии, если они расположены за пределами зоны возможных смещений.

Рабочие реперы закладываются на расстояниях не более 5 радиусов (R) расчетной (проектной) зоны обрушения. Схемы расположения профильных линий и реперов могут быть различными:

- профильные линии вкрест простирания рудного тела (рис. 1);
- профильные линии под углом 45° к простиранию рудного тела (рис. 2);
- расположение рабочих реперов в шахматном порядке;
- комбинированные схемы.

В настоящее время при производстве маркшейдерских работ используются современные высокоточные электронные

приборы (электронные тахеометры, сканирующие системы, навигационные системы «GPS» и «ГЛОНАСС»), которые позволяют изменить методики производства геодезических и маркшейдерских работ для решения вопросов промышленной безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых. Применение высокоточных геодезических электронных приборов позволяет повысить точность определения координат рабочих реперов, отстоящих от опорных реперов на расстояниях от ста метров до километров, с точностью до 2 мм. Существенно сократить время на производство геодезических измерений.

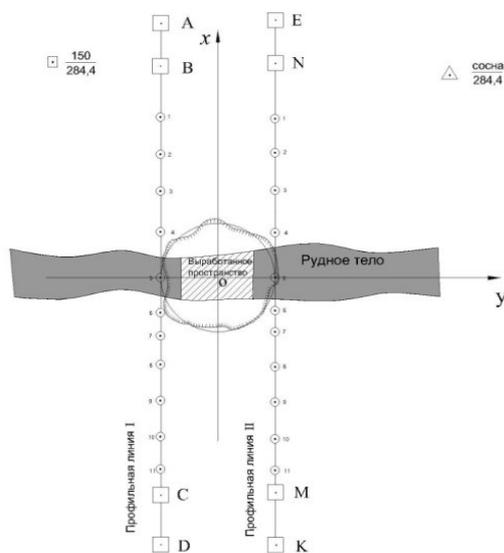


Рис. 1. Схема расположения профильных линий вкостр простиранья рудного тела

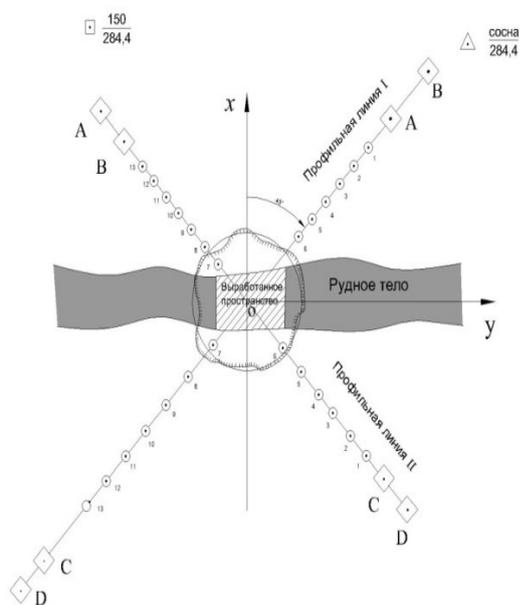


Рис. 2. Схема расположения профильных линий под углом 45° к простиранью рудного тела

Рассмотрим методику определения напряженного состояния массива горных пород для зоны обрушения представленной на плане в виде окружности.

Опорные грунтовые реперы закладывают на расстоянии более 5 радиусов от центра расчетной зоны обрушения. При соблюдении данного условия перераспределение напряжений вокруг образовавшейся зоны обрушения в массиве горных пород и на земной поверхности не будет оказывать влияние на сдвигание опорных реперов. После закладки наблюдательной станции до выхода зоны обрушения, плановые координаты грунтовых опорных и рабочих реперов $(x_i; y_i)$ определяют из двух серий наблюдений.

После выхода зоны обрушения на земную поверхность выполняют тахеометрическую съемку, по результатам которой составляют план в масштабе 1:500 с нанесением контуров зоны обрушения и зоны трещин.

Используя известные аналитические способы, определяют площадь зоны обрушения, находят плановые координаты $(x_0; y_0)$ центра тяжести [11]. Радиус (R) зоны обрушения вычисляют по формуле:

$$R = \sqrt{S/\pi}, \tag{1}$$

где R и S – соответственно радиус и площадь зоны обрушения.

Вводим новую систему координат $(x'o'y')$ начало которой совмещают с центром тяжести образовавшейся зоны обрушений на земной поверхности (рис. 3). В новой системе координат $(x'o'y')$ ось y' совмещается с осью x , а ось x' с осью y для дальнейшего удобства перевода координат опорных и рабочих реперов в новую систему координат.

При выходе зоны обрушения на земную поверхность происходит сдвигание рабочих реперов (см. рис. 3), что приводит к изменению их плановых координат. С помощью высокоточных электронных приборов определяем новые плановые координаты и приращения координат рабочих реперов, расположенных в зоне сдвижений на земной поверхности, в новой системе координат. Величина полного горизонтального смещения i -го репера в плане после выхода зоны обрушения на земную поверхность определяется по формуле:

$$\epsilon_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \tag{2}$$

где ϵ_i – абсолютное горизонтальное смещение i -го репера; $\Delta x_i, \Delta y_i$ – приращения координат i -го репера по осям x' и y' в новой системе координат после выхода зоны обрушения.

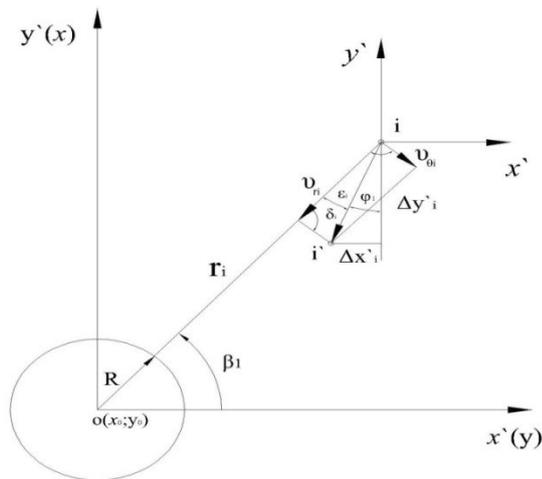


Рис. 3. Схема смещения рабочего *i*-го репера после выхода зоны обрушения на земную поверхность

Направление полного горизонтального смещения (сдвижения) *i*-го репера характеризуется углом φ_i относительно оси y'

$$\varphi_i = \arctg \frac{\Delta x'_i}{\Delta y'_i}. \quad (3)$$

Из схемы, представленной на рис. 3 определяем радиус – вектор *i*-го репера в новой системе

$$\begin{cases} v_r = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{r^3} - \frac{R^2}{r} (x + 1) \right] \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r}; \\ v_\theta = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{r^3} + \frac{R^2}{r} (x - 1) \right] \sin 2\theta, \end{cases} \quad (8)$$

где v_r, v_θ – радиальные и тангенциальные смещения; σ_1, σ_2 – главные нормальные напряжения; R – радиус провала; r – радиус-вектор репера; $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль сдвига; E – модуль деформации; μ – коэффициент Пуассона; $\chi = \frac{3-\mu}{1+\mu}$ – коэффициент Колосова Г.В.; θ – угловая координата репера, отсчитываемая от σ_1 до радиус-вектора репера против часовой стрелки.

Для определения напряжений σ_1, σ_2 , угла θ и модуля сдвига G необходимо составить четыре уравнения.

Для составления четырех уравнений достаточно знать величину и направление полных векторов горизонтальных смещений двух рабочих реперов.

Составим систему уравнений для рабочих реперов 1 и 2, используя формулы (3) и (7) и схему, приведенную на рис. 4.

координат до выхода зоны обрушения на земную поверхность по формуле:

$$r_i = \sqrt{y_i'^2 + x_i'^2}, \quad (4)$$

где x'_i, y'_i – плановые координаты *i*-го репера в новой системе координат ($x' \ o' \ y'$) до выхода зоны обрушения на земную поверхность.

Направление радиус–вектора *i*-го репера до выхода зоны обрушения в новой системе координат определяют по формуле:

$$\beta_i = \arctg \frac{y'_i}{x'_i}. \quad (5)$$

Радиальное и тангенциальное смещения *i*-го репера вычисляют по формулам:

$$\begin{cases} v_{ri} = \varepsilon_i \cos \delta_i; \\ v_{\theta i} = \varepsilon_i \sin \delta_i; \end{cases} \quad (6)$$

$$\delta_i = 90^\circ - \beta_i - \varphi_i, \quad (7)$$

где $v_{ri}, v_{\theta i}$ – соответственно радиальное и тангенциальное смещения *i*-го репера;

ε_i – полное горизонтальное смещения *i*-го репера; δ_i – угол между вектором полного горизонтального смещения *i*-го репера и радиус – вектором *i*-го репера.

Радиальные и тангенциальные смещения реперов в зоне влияния провала и зоны обрушения на земной поверхности определяют с помощью следующих формул [12, 13]:

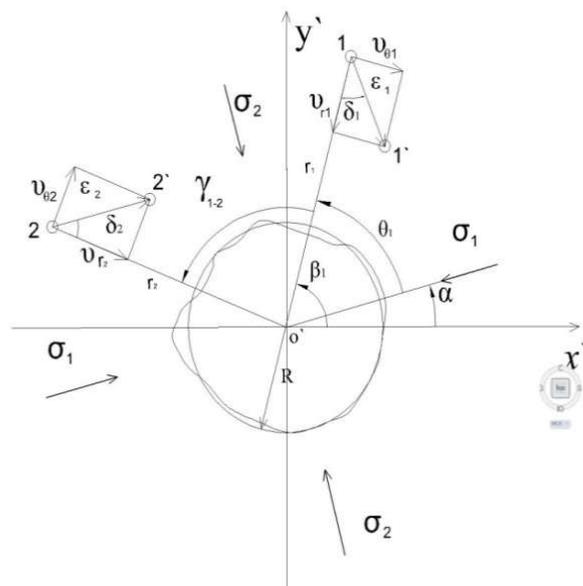


Рис. 4. Схема для расчета напряжений при выходе зоны обрушения на земную поверхность в виде окружности

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 \cos \delta_1 G + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4} \left[\frac{R^4}{r_1^3} - \frac{R^2}{r_1} (x + 1) \right] \cos 2\theta_1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4} \frac{R^2}{r_1} = 0 \\ \varepsilon_1 \sin \delta_1 G + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4} \left[\frac{R^4}{r_1^3} + \frac{R^2}{r_1} (x - 1) \right] \sin 2\theta_1 = 0 \\ \varepsilon_2 \cos \delta_2 G + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4} \left[\frac{R^4}{r_2^3} - \frac{R^2}{r_2} (x + 1) \right] \cos 2(\theta_1 + \gamma_{1-2}) - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4} \frac{R^2}{r_2} = 0 \\ \varepsilon_2 \sin \delta_2 G + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4} \left[\frac{R^4}{r_2^3} + \frac{R^2}{r_2} (x - 1) \right] \sin 2(\theta_1 + \gamma_{1-2}) = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

Решение полученной системы уравнений (9) позволит определить главные нормальные напряжения σ_1 , σ_2 , модуль сдвига G и угол θ_1 между σ_1 и радиус – вектором репера 1.

Направление действия σ_1 относительно оси x' определяют с помощью следующей формулы:

$$\alpha = \beta_1 - \theta_1, \quad (10)$$

где α – угол между осью x' и направлением действия σ_1 ; β_1 – угол между осью x' и радиус – вектором репера 1.

Для определения интегрального поля напряжений после выхода зоны обрушения на земную поверхность осуществляют перебор всех возможных вариантов и выполняют оценку точности определения компонентов естественного поля напряжений, действующих в горизонтальной плоскости и модуля сдвига горных пород для территории равной площади круга с радиусом равном пяти радиусам зоны обрушения. Наблюдения за развитием зоны обрушения в процессе ведения горных работ и проведение долговременных геодезических наблюдений за смещением реперов, позволяет осуществлять мониторинг за напряженным состоянием массива горных пород с учетом размеров подрабатываемой территории горными работами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влох Н.П., Сашурин А.Д., Зубков А.В. Напряженное состояние горных пород рудных месторождений Урала // Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). М.: Наука, 1973. С. 87–106.

2. Храмов Б.А. Сдвигение горных пород под влиянием подземных разработок рудных месторождений при выходе зоны обрушения на земную поверхность: Диссертация на соискание ученой степени кан. техн. наук. Свердловск. СГИ, 1981, 176 с.

3. Сашурина А.Д. Геомеханические модели и методы расчета сдвижений горных пород при разработке месторождений в скальных массивах: Автореф. дис. докт. техн. наук. Екатеринбург: ИГД, 1995, 38 с.

4. Храмов Б.А. Сравнительная оценка методов измерения напряжений горного массива / Научно-технический прогресс в добывающих отраслях промышленности. Тезисы докладов научно – технической конференции. Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1975, С. 12

5. Методические рекомендации к экспериментально-аналитическим измерениям напряжений на больших участках горного массива. Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1977. 28 с.

6. Сашурин А.Д., Храмов Б.А. Метод определения напряженного состояния горных пород массива на больших базах. Отражение современных полей напряжений и свойств пород в состоянии скальных массивов. Апатиты: АН СССР, 1977. С. 40–41

7. Сашурин А.Д., Храмов Б.А. Экспериментально-аналитический метод измерения напряжений больших участков горного массива // Подземная добыча руд черных металлов. Кривой Рог: НИГРИ, 1978. С. 40–46

8. Храмов Б.А. Метод определения напряженного состояния массивов горных пород с использованием навигационных систем при выходе зоны обрушения на земную поверхность // Вестник ТулГУ. Серия Геомеханика. Механика подземных сооружений. Вып.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007.

9. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений: Утв. Госгортехнадзором СССР, 1986. М.: Недра, 1988. 113 с.

10. ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений

11. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 416 с.

12. Влох Н.П. Сашурин А.Д. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. М.: Недра, 1970, 124 с.

13. Сашурин А.Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. Екатеринбург: ИГД УроРАН, 1999, 268 с.

Khramtsov B.A., Bylin I.P., Korneev P.V.**METHOD OF DETERMINING STRESS IN ROCK MASS USING HIGH-PRECISION GEODETIC MEASUREMENTS**

This article is devoted to the problem of determining the stress state of rock masses for large databases using advanced high-precision surveying instruments. In the development of a mineral deposit by an underground method, the collapse of the overlying strata of the rock mass is accompanied by the formation of holes and zones of collapse on the earth's surface. The failures and the area of the collapse on the earth's surface are used as the perturbing factors that cause stress redistribution in the rock mass. The resulting cavities are filled with tumbled rocks can approximately on the earth's surface by a circle or ellipse. The proposed method and scheme for the calculation of stresses in the exit zone of collapse to the earth's surface in the form of a circle, using the results of observations of the displacement of the reference points on the earth's surface, on the profile lines.

Key words: *Collapse zone, rock mass, rock mass, stress determination, geodetic device, profile lines, frame, failure.*

Храмцов Борис Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Былин Илья Парфирьевич, доцент, старший преподаватель кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: bilin1948@mail.ru

Корнеев Павел Васильевич, аспирант кафедры прикладной геологии и горного дела.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Адрес: Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.