

Способ интерпретации данных множественного измерительного гидроразрыва для определения полного тензора напряжений в породном массиве

А. В. Панов^{1}, Н. А. Мирошниченко¹, А. А. Скулкин¹*

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: anton-700@yandex.ru

Аннотация. Обоснован метод интерпретации данных множественного измерительного гидроразрыва для одновременного определения всех компонент тензора внешнего поля напряжений в массиве горных пород в окрестности геотехнических подземных объектов. Проведен анализ вариантов расположения системы шести измерительных скважин, который позволил выявить допустимые направления последних, обеспечивающие разрешимость сформулированной задачи. Анализ заключается в решении прямых задач «при известных напряжениях во внешнем поле найти нормальные напряжения σ_n на площадках, ортогональных осям скважин» и обратной задачи определения компонент внешнего поля напряжений по σ_n . При реализации предложенного метода в качестве входной информации могут быть использованы результаты измерений напряжений *in situ* методом направленного гидроразрыва. Численными экспериментами с использованием синтетических входных данных установлены допустимые вариации ориентации измерительных скважин, возникающие при направленном бурении, при которых ошибка определения компонент внешнего поля напряжений не превышает 10%.

Ключевые слова: горная порода, тензор напряжений, измерительный гидроразрыв, обратная задача

Data interpretation method in HF stress measurement for the total stress tensor determination in rock mass

A. V. Panov^{1}, N. A. Miroshnichenko¹, A. A. Skulkin¹*

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: anton-700@yandex.ru

Abstract. The data interpretation method is validated for the hydraulic fracturing stress measurements for determining simultaneously all components of external stress tensor in rock mass in the vicinity of underground geotechnical structures. The analysis of the alternative patterns of 6 measurement boreholes reveals allowable drilling directions of boreholes to ensure the formulated problem resolvability. The analysis includes the solution of direct problems on finding “the normal stresses σ_n in the areas orthogonal to the axes of the boreholes at the known external stresses” and the solution of an inverse problem on finding the external stresses σ_n . In the proposed method, the input information may be the data obtained in the *in-situ* HF stress measurement. The numerical experiments with the synthetic input data determine allowable variations in orientation of measurement holes in directional drilling such that the measuring fault of external stresses is no thigher than 10%.

Keywords: rock mass, stress tensor, hydraulic fracturing stress measurement, inverse problem

Введение

При строительстве и эксплуатации современного горнодобывающего предприятия важной составной частью комплекса геомеханических исследований является оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях естественного залегания, без которой невозможно выработать правильные проектные решения и обосновать технологию выемки запасов. Существуют различные подходы к оценке состояния геомеханических объектов (например, физическое моделирование на макете процесса эволюции напряжения и обрушения кровли в шахте [1]; сейсмоакустический мониторинг напряженного состояния при подземной добыче [2]), однако натурный эксперимент является, по сути, единственным надежным средством количественной оценки действующих в породном массиве напряжений [3]. Среди экспериментальных способов определения напряженного состояния породных массивов можно выделить метод измерительного гидроразрыва пород в скважине [4-6], основным преимуществом которого в сравнении с другими методами определения напряжений является независимость результатов от деформационных свойств пород. Для уточнения информации можно одновременно проводить регистрацию акустической [7] или [8] микросейсмической эмиссии.

При определении напряжений методом измерительного гидроразрыва [9,10] возникает ряд вопросов: сколько необходимо пробурить скважин? Какие существуют ограничения на скважины по их ориентации и взаимному расположению? Возможно ли применить многозонный измерительный гидроразрыв для уменьшения количества скважин? Ответам на эти вопросы и будет посвящена данная работа. В ходе исследований была поставлена задача выявить возможную пространственную ориентацию системы измерительных скважин для определения шести неизвестных компонент тензора внешних напряжений S_{ij} ($i, j = x, y, z$), используя данные измерительного гидроразрыва.

Постановка задачи. Метод решения

Рассмотрим изотропную упругую среду в трехмерном пространстве. На рис. 1 изображено направление измерительной скважины из центра системы координат, плоскость гидроразрыва и нормаль \vec{n}^m к ней для скважины с индексом m . Будем считать, что мы имеем плоскость щели для измерительного гидроразрыва, ортогональную оси скважины независимо от ее ориентации в пространстве. Добиться этого удастся разными способами [11], например, используя щелеобразователь [12]. В этом случае нормаль к плоскости гидроразрыва совпадает с направлением скважины. При проведении измерительного гидроразрыва удастся получить величину давления запираения скважины σ_n^m [13]. Эти данные будем использовать для решения поставленной задачи.

Проекция вектора напряжений на произвольно ориентированную площадку m с нормалью $\vec{n}^m = (n_x^m, n_y^m, n_z^m)$ [14]:

$$\sigma_n^m = S_{xx}(n_x^m)^2 + S_{yy}(n_y^m)^2 + S_{zz}(n_z^m)^2 + S_{xy}2n_x^m n_y^m + S_{xz}2n_x^m n_z^m + S_{yz}2n_y^m n_z^m, \quad (1)$$

где n_x^m, n_y^m, n_z^m – направляющие косинусы вектора \vec{n}^m , задающие направление действия нормального напряжения σ_n^m для площадки m ; S_{ij} – компоненты тензора напряжений ($i, j = x, y, z$).

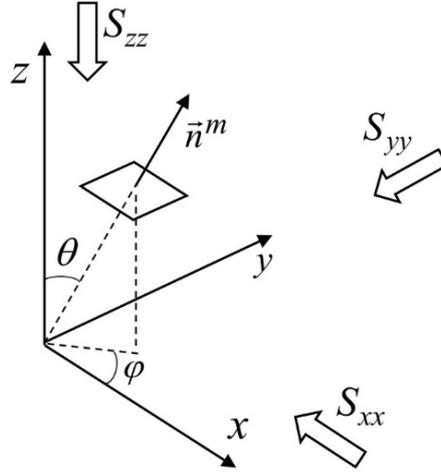


Рис. 1. Схема ориентации измерительной площадки

Очевидно, что для одновременного определения всех шести неизвестных компонент тензора напряжений S_{ij} необходимо произвести, как минимум, шесть измерений напряжений σ_n . Перепишем уравнение (1) в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} (n_x^1)^2 & (n_y^1)^2 & (n_z^1)^2 & 2n_x^1 n_y^1 & 2n_x^1 n_z^1 & 2n_y^1 n_z^1 \\ (n_x^2)^2 & (n_y^2)^2 & (n_z^2)^2 & 2n_x^2 n_y^2 & 2n_x^2 n_z^2 & 2n_y^2 n_z^2 \\ (n_x^3)^2 & (n_y^3)^2 & (n_z^3)^2 & 2n_x^3 n_y^3 & 2n_x^3 n_z^3 & 2n_y^3 n_z^3 \\ (n_x^4)^2 & (n_y^4)^2 & (n_z^4)^2 & 2n_x^4 n_y^4 & 2n_x^4 n_z^4 & 2n_y^4 n_z^4 \\ (n_x^5)^2 & (n_y^5)^2 & (n_z^5)^2 & 2n_x^5 n_y^5 & 2n_x^5 n_z^5 & 2n_y^5 n_z^5 \\ (n_x^6)^2 & (n_y^6)^2 & (n_z^6)^2 & 2n_x^6 n_y^6 & 2n_x^6 n_z^6 & 2n_y^6 n_z^6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{zz} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_n^1 \\ \sigma_n^2 \\ \sigma_n^3 \\ \sigma_n^4 \\ \sigma_n^5 \\ \sigma_n^6 \end{pmatrix} \quad (2)$$

При переходе в сферическую систему координат (рис. 1), характеризующуюся азимутальным φ и зенитным θ углами и расстоянием r от заданной точки до начала координат, принимая $r=1$, формулы для вычисления составляющих вектора \vec{n} примут вид:

$$\begin{aligned} n_x &= \sin \theta \cos \varphi, \\ n_y &= \sin \theta \sin \varphi, \\ n_z &= \cos \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Перепишем систему уравнений (2) в виде:

$$A \cdot S = \sigma_n \quad (4)$$

Будем полагать, что для поиска шести неизвестных компонент тензора напряжений S нам необходимо произвести измерение напряжений σ_n на шести разных площадках с нормалью \vec{n}^m ($m=1, \dots, 6$). Нормали к измерительным площадкам совпадают по направлению с осями измерительных скважин, поэтому эти понятия можно считать равнозначными.

При проведении реального измерительного гидроразрыва необходимо учитывать погрешность измерения напряжений σ_n [13], а также погрешности в ориентации скважин \vec{n}^m , возникающие при их направленном бурении, – в сумме они могут привести к значительным расхождениям в решении [15]. Поэтому поставлена задача поиска таких площадок, для которых определитель матрицы A из уравнения (4) не равен нулю ($\det A \neq 0$), а число обусловленности A имеет достаточно малое значение ($1 \leq \text{cond}(A) \leq 100$); при этом матрица A будет являться хорошо обусловленной [16].

Будем считать, что: а) погрешность измерений напряжений σ_n составляет не более 10%; б) погрешность ориентации скважины в горизонтальной плоскости не превышает $\pm 4^\circ$, в вертикальной $\pm 2^\circ$.

Исходя из опыта выполнения измерительного гидроразрыва [17], предложено несколько вариантов расположения скважин в пространстве, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Углы ориентации нормалей измерительных площадок в пространстве

№ изм. площадки	Вариант 1 θ, φ	Вариант 2 θ, φ	Вариант 3 θ, φ	Вариант 4 θ, φ	Вариант 5 θ, φ	Вариант 6 θ, φ	Вариант 7 θ, φ	Вариант 8 θ, φ	Вариант 9 θ, φ
1	90; 90	90; 90	90; 90	90; 90	90; 0	90; 0	60; 30	90; 90	45; 90
2	45; 90	60; 90	60; 90	60; 90	60; 0	90; 30	60; 60	75; 90	0; 0
3	0; 0	0; 0	0; 0	45; 90	45; 180	90; 45	45; 30	0; 0	90; 270
4	45; 0	60; 0	30; 0	30; 90	30; 180	90; 60	45; 60	45; 0	45; 0
5	90; 0	90; 0	90; 0	0; 0	0; 0	90; 90	30; 30	90; 0	90; 45
6	90; 45	90; 30	90; 45	90; 0	90; 90	0; 0	30; 60	90; 80	90; 135

Процедура отбора возможных вариантов расположения системы шести скважин включает следующие шаги:

1. Вычисление определителя матрицы A : $\det A \neq 0$.
2. Проверка числа обусловленности матрицы A : $1 \leq \text{cond}(A) \leq 100$.
3. Задание значений компонент внешнего поля напряжений: $S_{xx}^0 = 15$ МПа, $S_{yy}^0 = 25$ МПа, $S_{zz}^0 = 30$ МПа, $S_{xy}^0 = 5$ МПа, $S_{xz}^0 = 4$ МПа, $S_{yz}^0 = 3$ МПа (по данным экспериментальных исследований, выполненных на Соликамском месторождении калийных солей).
4. Вычисление σ_n^m по (2).
5. По найденным σ_n^m для вариаций значений φ, θ ($\pm 4^\circ$ и $\pm 2^\circ$, соответственно) вычисление S_{ij} .
6. Отбор допустимых вариантов расположения скважин, при которых погрешность определения S_{ij} не превысила 10% от заданных на шаге 3 значений S_{ij}^0 .

Введем среднеквадратичное отклонение F найденных напряжений:

$$F = \left(\frac{1}{6} \left[\left(1 - \frac{S_{xx}}{S_{xx}^0} \right)^2 + \left(1 - \frac{S_{yy}}{S_{yy}^0} \right)^2 + \left(1 - \frac{S_{zz}}{S_{zz}^0} \right)^2 + \left(1 - \frac{S_{xy}}{S_{xy}^0} \right)^2 + \left(1 - \frac{S_{xz}}{S_{xz}^0} \right)^2 + \left(1 - \frac{S_{yz}}{S_{yz}^0} \right)^2 \right] \right)^{1/2} \quad (5)$$

Поскольку возможные отклонения от первоначально заданных значений φ, θ заранее не известны, то зададим их как случайную величину следующим образом:

$$\begin{aligned} \theta^m &= (\theta^m)_0 + \delta_1 \text{rand}_1 \\ \varphi^m &= (\varphi^m)_0 + \delta_2 \text{rand}_2 \end{aligned} \quad (6)$$

где $(\theta^m)_0, (\varphi^m)_0$ – «точные» углы ориентации скважины из табл. 1; δ_1, δ_2 – амплитуды отклонения скважины по вертикали ($\delta_1^{\max} = 2^\circ$) и горизонтали ($\delta_2^{\max} = 4^\circ$); $\text{rand}_1, \text{rand}_2$ – случайно распределенные на отрезке $[-1, 1]$ величины. Таким образом,

$$F = F(\delta_1, \delta_2) \quad (7)$$

Результаты

На рис. 3 для Варианта 1 (табл. 1) взаимного расположения нормалей измерительных площадок представлены изолинии искомых компонент внешнего поля напряжений S_{ij} и функции F в зависимости от амплитуды отклонения нормали δ_1, δ_2 . Отметим, что максимальные отклонения компонент внешнего поля

напряжений не всегда находятся в областях максимальных значений δ_1 , δ_2 . Тем не менее, среднеквадратичные отклонения функции F соответствуют области максимума δ_1 , δ_2 (рис. 3, табл. 2).

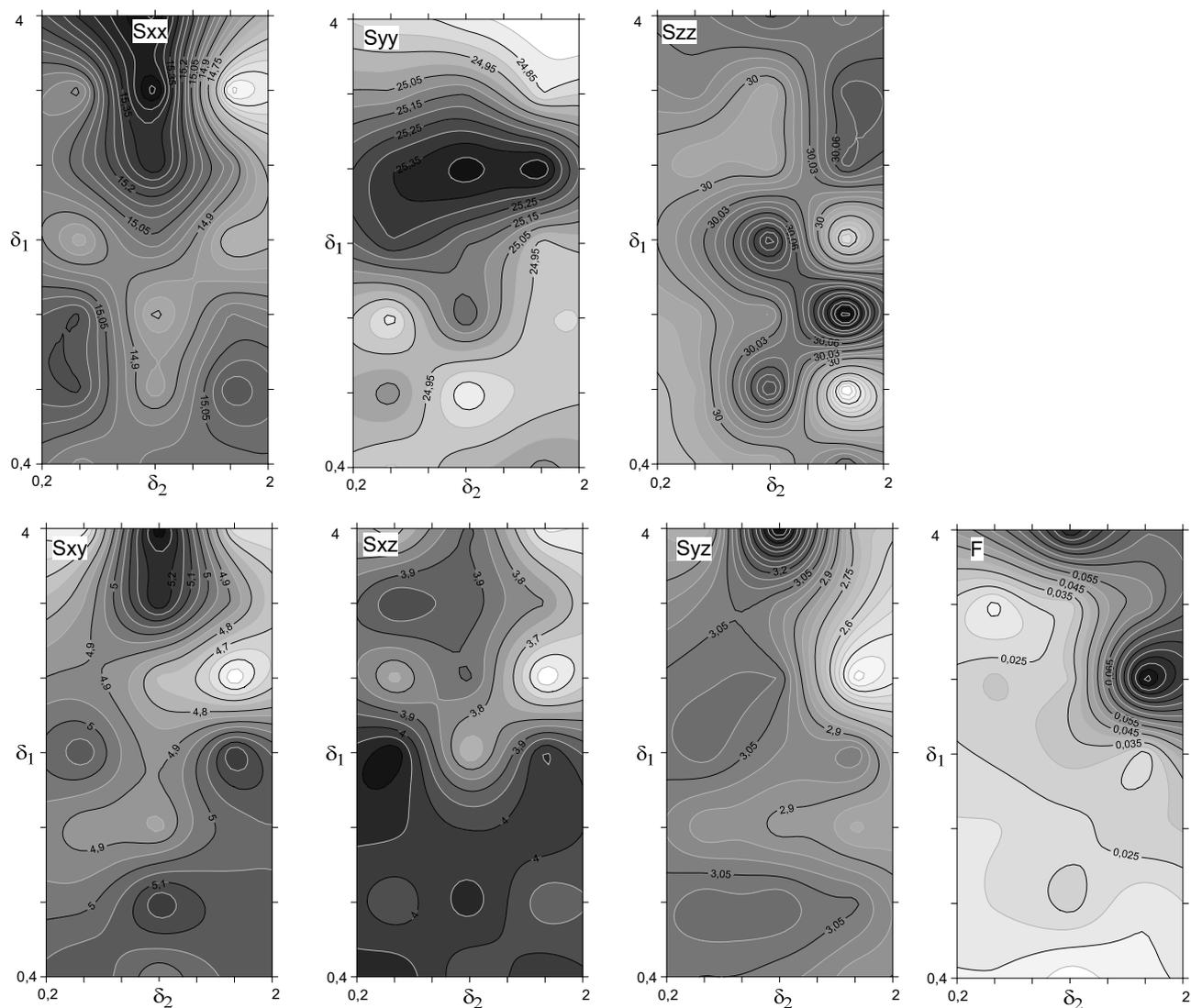


Рис. 3. Изолинии компонент поля напряжений S_{ij} и функции F

В табл. 2 приведены восстановленные значения искоемых параметров внешнего поля напряжений S_{ij} ($i, j = x, y, z$) для трёх вариантов взаимного расположения шести скважин при генерации случайной погрешности в направлении ориентации измерительной скважины (измерительной площадки). Видно, что для нормальных компонент S_{xx}, S_{yy}, S_{zz} внешнего поля напряжений погрешности не превышают 10%. Для касательных S_{xy}, S_{xz}, S_{yz} отклонения достигают 27%, что связано с большой разницей между нормальными и касательными компонентами поля напряжений. В числовом выражении эти погрешности не превышают 2 МПа, что довольно близко к значению допустимой погрешности при проведе-

нии измерительного гидроразрыва. Среднеквадратичное отклонение для выбранных вариантов не превышает 12%.

Таблица 2

Диапазон найденных значений напряжений S_{ij} и функции F

S_{ij} , МПа F	Вариант 1		Вариант 3		Вариант 9	
	Диапазон значений	Макс. отклонение от иско- мых значе- ний, %	Диапазон значений	Макс. от- клонение от иско- мых значе- ний, %	Диапазон значений	Макс. от- клонение от иско- мых значе- ний, %
S_{xx}	14.3–15.6	4.6	14.5–15.5	6	13.4–15.9	10
S_{yy}	24.7–25.4	1.6	24.5–25.6	3	24.6–25.5	2
S_{zz}	29.8–30.2	0.6	29.8–30.1	1	29.8–30.1	0.6
S_{xy}	4.5–5.4	10	4.6–5.5	16	4.7–5.3	6.4
S_{xz}	3.4–4.2	15	3.7–4.6	15	3.3–5.1	27
S_{yz}	2.3–3.7	23	2.2–3.4	27	2.8–3.3	10
F	0.005–0.11	11	0.005–0.12	12	0.005–0.12	12

Заключение

Для решения задачи одновременного определения всех компонент тензора внешнего поля напряжений в массиве горных пород с использованием данных направленного измерительного гидроразрыва проведен анализ вариантов расположения системы шести измерительных скважин, который позволил выявить допустимые направления последних, обеспечивающие разрешимость сформулированной задачи. Численными экспериментами с использованием синтетических входных данных найдены три варианта взаимного расположения измерительных скважин, при которых происходит восстановление внешнего поля напряжений с погрешностью, не превышающей 10%.

Работа выполнена в рамках проекта НИР номер государственной регистрации 121062200075-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bin Zhu, and Li Ge. Experimental Simulation of the Mine Pressure in ChuancaoGedan Coal Mine // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 21. – P. 44–47.
2. Cao Anye, et al. Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – Vol. 78. – P. 1–9.
3. Zang A., Stephansson O. Stress Field of Earth's Crust. – London: Springer, 2010. –322 p.
4. Mizuta Y., Kikuchi S., Tokunaga K. Studies on Hydraulic Fracturing Stress Measurement Assisted by Water Jet Borehole Slotting // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1993. – Vol. 30, No. 7. – pp. 981-984.

5. Klee G., Bungler A., Meyer G., Rummel F., Shen B. In Situ Stresses in Borehole-1 / South Australia Derived from Breakouts, Core Discing and Hydraulic Fracturing to 2 km Depth // *Rock Mech. Rock Eng.* – 2011. – V 44, No. 5. – pp. 531-540.
6. Скулкин А. А. Определение параметров действующего поля напряжений при ведении очистных работ методом измерительного гидроразрыва // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* – 2021. – Т. 2, №. 4. – С. 123-129.
7. Xinfang M. A., Ning L. I., Congbin Y. I. N., Yanchao L. I., Yushi Z. O. U., Shan W. U., Tong Z. H. O. U. (2017). Hydraulic fracture propagation geometry and acoustic emission interpretation: A case study of Silurian Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(6), 1030–1037.
8. Gischig V. S., Doetsch J., Maurer H., Krietsch H., Amann F., Evans K. F., Wiemer S. (2018). On the link between stress field and small-scale hydraulic fracture growth in anisotropic rock derived from microseismicity // *SolidEarth.* – 2018. – No. 9(1). – pp. 39–61. doi: 10.5194/se-9-39-2018.
9. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. Современное оснащение измерительно-вычислительного комплекса "Гидроразрыв" и опыт его применения при экспериментальном исследовании действующих полей напряжений в соляном массиве // *Проблемы недропользования.* – 2018. – № 1 (16). – С. 52-58.
10. Скулкин А. А. Определение параметров действующего поля напряжений при ведении очистных работ методом измерительного гидроразрыва // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* – 2021. – Т. 2, №. 4. – С. 123-129.
11. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2014. – №. 5. – С. 137-142.
12. Леонтьев А. В., Рубцова Е. В., Леконцев Ю. М., Качальский В. Г. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2010. – № 1. – С. 104–110.
13. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О методах косвенного определения величины давления запираания трещины при измерительном гидроразрыве // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* – 2016. – Т. 2, №. 3. – С. 265-269.
14. Nazarova L.A., Nazarov L.A. Dilatancy and the formation and evolution of disintegration zones in the vicinity of heterogeneities in a rock mass. *Journal of Mining Science.* 2009. V. 45(5). P. 411-419.
15. Цей Р., Шумафов М. М. Число обусловленности матрицы как показатель устойчивости при решении прикладных задач // *Труды ФОРА.* – 2011. – №. 16.
16. Годунов С. К. Современные аспекты линейной алгебры. – Научная книга, 1997.
17. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О выполнении измерительных гидроразрывов в соляных породах на подземных рудниках Верхнекамского месторождения // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2017. – Т. 4, №. 2. – С. 270-274.

© А. В. Панов, Н. А. Мирошниченко, А. А. Скулкин, 2022