



**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Е. А. Христоролюбов¹, А. А. Еременко², В. Н. Филиппов²

¹*Шахта Шерегешевская, АО “Евраз ЗСМК”, E-mail: Evgeny.Khristolubov@evraz.com,
ул. Советская 1а, пос. Шерегеш 652971, Россия*

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала, E-mail: eremenko@ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

При проведении оценки НДС массива породного выступа Шерегешевского месторождения установлено, что зоны неупругих деформаций формируются вблизи отработанных пространств в юго-западной части целика. Показано, что расположение разгрузочных скважин на отм. +195 м, обеспечивающих разуплотнение породного уступа в его периферических областях, вызывает дополнительную разгрузку массива. При этом происходит ослабление сжимающих горизонтальных напряжений в приграничной части выступа, соответствующие сдвигающие напряжения, сравниваемые со сцеплением массива, уменьшаются на 40–50 %, что приводит к снижению неупругих деформаций в породном выступе.

Шахтные поля, напряженно-деформированное состояние массива, зона неупругих деформаций, разгрузочные скважины, разуплотнение породного уступа

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR PREVENTING GEODYNAMIC PHENOMENA
IN ROCKBURST-HAZARDOUS DEPOSITS**

E. A. Khristolubov¹, A. A. Eremenko², and V. N. Filippov²

¹*Mine Sheregesh, JSC “Evraz ZSMK”, E-mail: Evgeny.Khristolubov@evraz.com,
ul. Sovetskaya 1a, Sheregesh 652971, Russia*

²*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: eremenko@ngs.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

When assessing the stress-strain state of the rock mass of a ledge of the Sheregesh deposit, it was found that zones of inelastic deformation are formed near the mined-out spaces in the southwestern part of the pillar. It is shown that location of the relief holes at elevation +195 m, providing decompaction of the rock ledge in its peripheral regions, causes additional unloading of the rock mass. In this case, the compressive horizontal stresses in the boundary part of the ledge are reduced, the corresponding shear stresses comparable with the rock mass adhesion are reduced by 40–50 %, which leads to a decrease in inelastic deformations in the rock ledge.

Mine fields, stress-strain state of the rock mass, inelastic deformation zone, relief holes, rock ledge decompaction

Месторождения железных руд Горной Шории расположены в сейсмически активном районе Алтае-Саянской складчатой области, где имеют место современные тектонические движения земной коры. Шахтные поля этих месторождений подвержены влиянию сейсмических процессов, происходящих в сейсмически активных районах Горно-Алтайска, Ленинск Кузнецка, Междуреченска, Хакасии и находящегося в районе Таштагола горного массива — Кочура в непосредственной близости от Шерегешевского месторождения (28 км) [1, 2]. В массиве горных пород в породном выступе с северо-западной стороны центральной части рудного участка Новый Шерегеш (рис. 1) 16.07.2019 г. произошло динамическое событие (толчок) с энергетическим классом 5.6, а 23.07.2019 г. события с энергетическим классом 5.9 и 6.4.

В течение 2019 г. с января по июль, когда произошли динамические события высокого энергетического класса, в горном массиве Кочура ежемесячно службой РАН Алтае-Саянского филиала регистрировались землетрясения: январь — 2; февраль — 3; март — 3; апрель — 2; май — 1; июнь — 1; июль — 1.

Разрывная тектоника Шерегешевского месторождения широко развита и представлена крупными разрывными нарушениями сбросо-сдвигового типа с углами падения $40-85^\circ$ и амплитудами смещения 40–300 м. Разломы, разделяющие участки проявляются с одинаковым северо-восточным простиранием и равными амплитудами смещения.

Помимо дизъюнктивных нарушений большое развитие на месторождении получили зоны интенсивной трещиноватости, которые четко фиксируются по горным выработкам и отмечаются в виде многочисленных тектонических трещин с различными углами падения и простирания, расланцовкой, дроблением, брекчированием и смятием руд и вмещающих пород. Мощность зон по горным выработкам колеблется от нескольких метров до десятков как со смещением пород и рудных тел, так и без смещения. Тектонические нарушения в процессе своего развития неоднократно обновлялись с образованием зон трещиноватости, дробления, брекчирования, тектонической глины, зеркалов скольжения или залечивались кальцитом, материалом смятия. [3, 4].

Рудно-скарновая зона участка Новый Шерегеш является слепой. Средняя длина рудной зоны по простиранию составляет 900–950 м, по падению от 400 м на флангах до 900 м в центральной части. Мощность зоны колеблется от 40 м на флангах до 350 м в центральной части. Падение зоны на верхних горизонтах выше горизонта +185 м крутое, юго-западное ($50-80^\circ$) с постепенным выполаживанием, почти до горизонтального с глубиной. Западный фланг участка разбит серией тектонических нарушений северо-западного простирания на отдельные тектонические блоки, в пределах которых зафиксированы два пологозалегающих рудных тела мощностью до 20 м (рис. 1).

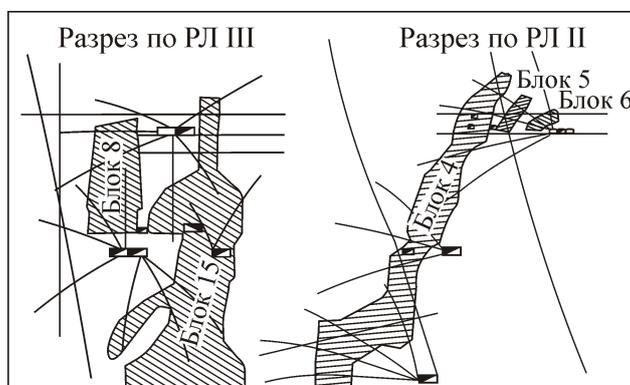


Рис. 1. Разрезы по участку Новый Шерегеш

По физико-механическим свойствам пород и руд, уровню напряжений, действующих в массиве горных пород на Шерегешевском месторождении участок Новый Шерегеш с горизонта (+255) м и ниже относится к “опасным” по горным ударам. Причиной проявления сейсмической активности являлось перераспределение горного давления в породном выступе рудного участка Новый Шерегеш при наличии напряжений на контактах разномодульных пород (известняков с коэффициентом крепости по шкале Протоdjeяконова 9 и скарнов — 19) [5, 6].

Взрывы по обрушению блоков, совмещение нескольких взрывов в разных местах по времени являются основным фактором влияющим на напряженно-деформированное состояние массива. Применяемая на месторождении система разработки подэтажного обрушения влечет за собой ежесуточное проведение взрывов. С начала года на шахте было произведено более 600 взрывов по отбойке вееров массой ВВ от 2 до 10т. В июле 2019 г. — 108 шт.

В связи с изложенным установлено, что основными причинами произошедших геодинамических событий явилось нахождение шахтного поля Шерегешевского месторождения в сейсмически активном районе, где ежемесячно происходят землетрясения, на месторождении широко развита разрывная тектоника, мощные тектонические нарушения, зоны интенсивной трещиноватости и ежесуточное проведение взрывов.

Для разгрузки удароопасного участка (породного выступа) предложен способ обурирования массива горизонтальными скважинами диаметром 105 мм на гор. 185 м в объеме более 1600 м, а на гор. +195 м скважинами диаметром 89 мм в объеме около 1400 м (рис. 2).

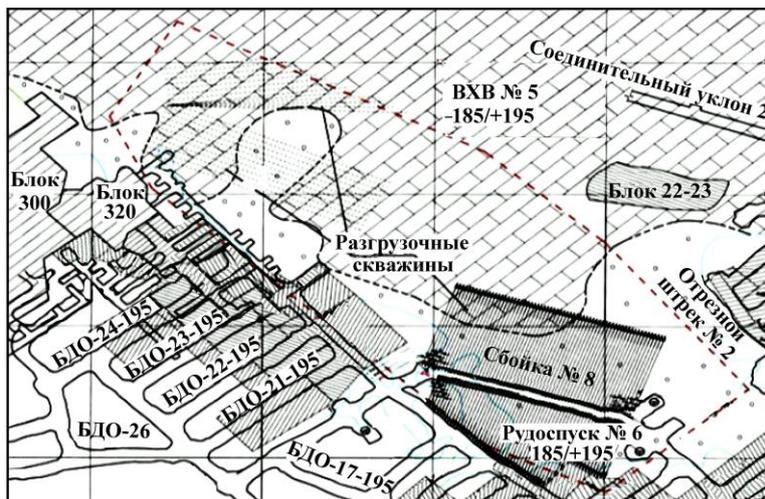


Рис. 2. Схемы расположения разгрузочных скважин

Обурирование массива проводилось из предварительно пройденных выработок параллельно друг другу для формирования защитной зоны, которая ограничила влияние напряжений на контуры выработок, находящихся в зоне ведения очистных работ. В случае, когда нагрузка в массиве превышает 1.2–1.3 предела прочности руды (породы), на контуре скважины происходят ее разрушения [7, 8].

Выполнена оценка НДС массива породного выступа которая осуществлялась с учетом физико-механических свойств горных пород (таблица). Напряжения в массиве определяются весом пород и коэффициентом бокового отпора в ненарушенном массиве. В локальной системе координат XYZ в вертикальном направлении действует напряжение $\sigma_z = \gamma H$, где H — глубина, м, γ — объемный вес пород (Н/м^3); горизонтальные напряжения: $\sigma_x = \lambda_1 \gamma H$; $\sigma_y = \lambda_2 \gamma H$, где λ_1, λ_2 — коэффициенты бокового отпора*.

Физико-механические свойства горных пород и руд

Наименование пород	Прочность		Коэффициент			Объемный вес $\gamma, \text{г/см}^2$
	на сжатие $\sigma_{сж}, \text{г/см}^2$	на растяжение $\sigma_p, \text{кг/см}^2$	Пуассона м	сцепления $K, \text{кг/см}^2$	крепости по Протодьяконову	
Известняки	1013	92	0.27	80	8–10	2.56
Порфириты	1735	—	—	—	16–18	2.88
Туфы андезитовых порфиритов	2300	375	0.26	287	14–15	2.87
Сиениты	2367	280	0.26	270	16	2.66
Граниты	1848	170	0.19	200	18	2.66
Скарны	2404	390	0.20	378	18–21	3.18
Руды	1744	227	0.18	139	12-17	3.9

*Расчеты выполнены Л.Н. Гаховой.

Главные напряжения на месторождении: σ_1 ориентировано по азимуту 125° в северо-западном направлении, коэффициенты бокового отпора $\lambda_1 = 2.6$, $\lambda_2 = 1.4$. Для условий месторождения интегральная характеристика $\gamma = 0.029 \text{ Н/м}^3$, следовательно для нетронутого массива на глубине с отм. +185 м $\sigma_x^0 = 26.3 \text{ МПа}$, $\sigma_y^0 = 14.1 \text{ МПа}$.

Результаты расчетов представлены в виде графиков изолиний компонентов тензора напряжений (σ_x , σ_y , σ_z) и напряжениями σ_s (сдвигающими напряжениями), сравниваемыми со сцеплением массива C и позволяющими для анализа воспользоваться критерием разрушения Кулона – Мора:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi,$$

где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ — главные напряжения; φ — угол внутреннего трения.

Зоны массива, в которых рассчитанные σ_s превосходят критическую величину $\sigma_s > \sigma_s^{\text{крит}}$, являются зонами возможного неупругого деформирования (возможного разрушения).

В расчетах коэффициент крепости по Протодьяконову массива горных пород принимался $f = 19$ ($f \approx 0.1 \sigma_{\text{сж}}$). Согласно таблице, для горных пород, имеющих $f = 19$, значение сцепления $2.9 \div 3.8 \text{ МПа}$. С учетом коэффициента структурного ослабления (0.4) критическая величина $\sigma_s^{\text{крит}}$ при расчетах области неупругого деформирования принимается 2 МПа ($\sigma_s \geq 2 \text{ МПа}$).

Напряженно-деформированное состояние массива в сечениях, построенных по 3D-модели, в отм. +185 ÷ +195 м показано на рис. 3, 4. Юго-восточная часть целика разгружена от действия σ_x и σ_y . В центральной и северо-западной части целика σ_x сравнима с σ_x^0 нетронутого массива; σ_y в центральной части целика превышает σ_y^0 нетронутого массива более чем в 1.5 раза. Зоны неупругих деформаций формируются вблизи отработанных пространств в юго-западной части целика. Вблизи целика в юго-западной части массива σ_y между отработанными участками достигает $30 - 35 \text{ МПа}$, а σ_s здесь вдвое превышает критическую величину $\sigma_s^{\text{крит}}$.

В предположении, что в центральной части целика крепость пород $f \approx 9$, сцепление массива здесь не превосходит 1 МПа (таблица), с учетом коэффициента структурного ослабления критическая величина в центральной части целика $\sigma_s^{\text{крит.ц}} = 0.6 \text{ МПа}$ (только для центральной части целика, где $f \approx 9$). В этом случае зона неупругих деформаций занимает большую часть целика. Между центральной частью целика и отработанным в юго-западной части пространством образуются зоны, в которых напряжения $\sigma_s > 2\sigma_s^{\text{крит}}$ ($\sigma_s^{\text{крит}}$ основного массива целика); в этих зонах располагаются толчки, зарегистрированные сейсмостанциями [9 – 11].

Установлено, что расположение разгрузочных скважин на отм. +195 м, обеспечивающих разуплотнение породного уступа в его периферических областях, вызывает дополнительную разгрузку массива. При этом сжимающие горизонтальные напряжения в приграничной части выступа снижаются, соответствующие сдвигающие напряжения, сравниваемые со сцеплением массива, уменьшаются на 40 - 50 %, что приводит к снижению неупругих деформаций в породном выступе.

На рис. 4 приведена схема размещения в целике на отм. +195 м разгрузочных скважин, обеспечивающих разуплотнение пород целика, вызывающее дополнительное ослабление массива и область неупругих деформаций, в которых $\sigma_s^{\text{крит}} \geq \sigma_s \geq \sigma_s^{\text{крит.ц}}$ занимает в разуплотненном массиве всю площадь целика. Рассмотрено местоположение трещин в скважинах и сколов горных пород на различных глубинах при перераспределении напряжений вокруг скважин. В целом, во всех скважинах происходит образование и прорастание трещин и отслоение кусков горных пород, что подтверждает то, что породный уступ постепенно вертикально смещается вниз со снижением и перераспределением напряжений в массиве горных пород. (рис. 5).

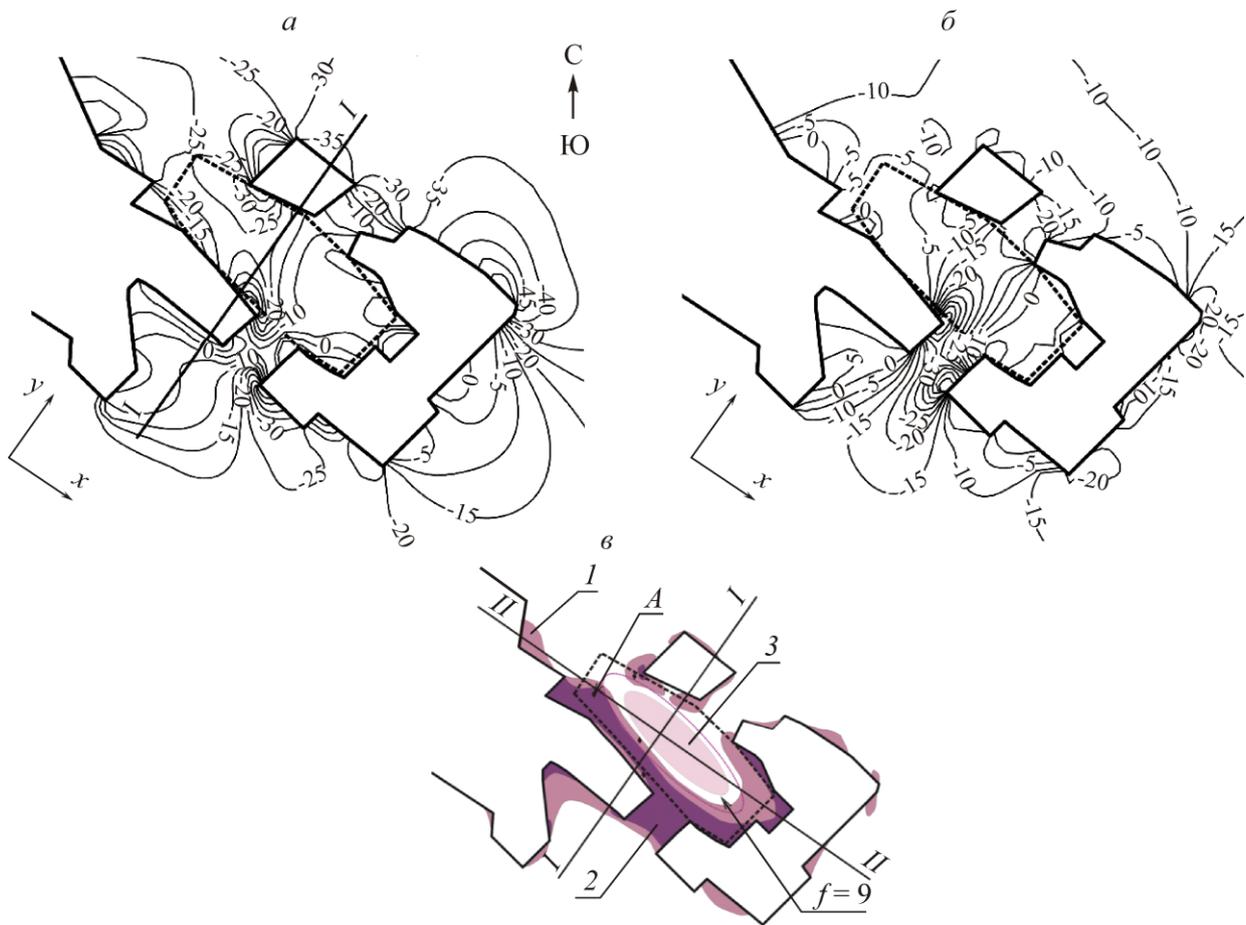


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние массива, в отм. +185 ÷ +195 м: *а* — горизонтальные напряжения σ_x (МПа); *б* — горизонтальные напряжения σ_y (МПа); *в* — зоны неупругих деформаций в отм. +185 ÷ +195 м при $f=19$ в основном массиве целика и $f=9$ в центральной части целика. 1 — $\sigma_s \geq \sigma_s^{\text{крит}}$; 2 — $\sigma_s \geq 2\sigma_s^{\text{крит}}$; 3 — $\sigma_s^{\text{крит}} \geq \sigma_s^{\text{крит.ц}}$; А — толчки

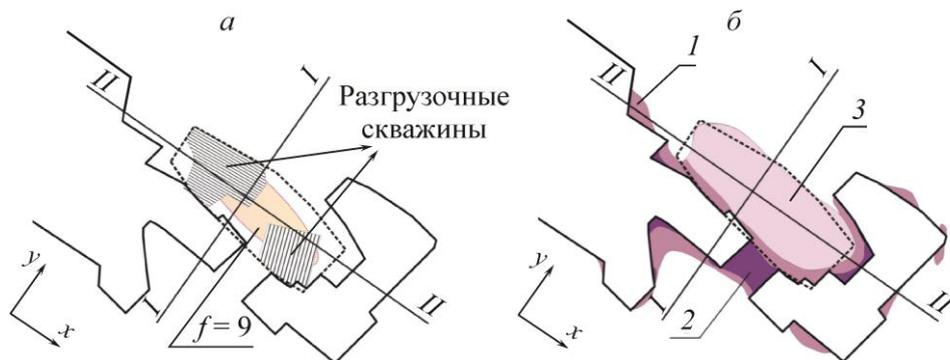


Рис. 4. *а* — расположение разгрузочных скважин в целике на отм. +195 м; *б* — зоны неупругих деформаций на отм. +195 м с учетом разуплотнения массива разгрузочными скважинами (при $f=19$ в основном массиве целика и $f=9$ в центральной его части): 1 — $\sigma_s \geq \sigma_s^{\text{крит}}$; 2 — $\sigma_s \geq 2\sigma_s^{\text{крит}}$; 3 — $\sigma_s^{\text{крит}} \geq \sigma_s^{\text{крит.ц}}$

Проведена оценка напряженно-деформированного состояния данного массива горных пород и степени удароопасности комплексом методов включающих следующие региональные и локальные методы: микросейсмический контроль на базе сейсмостанции; электропрофилирование; подземное электророндирование на малых и крупных базах; измерение деформаций; регистрация ЭМИ [12, 13].

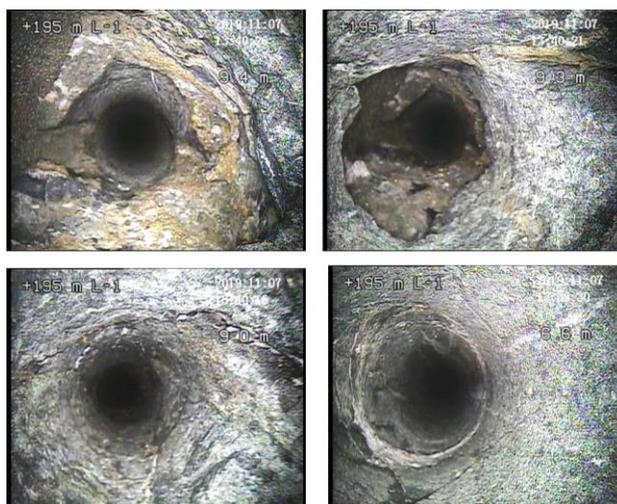


Рис. 5. Вид разгрузочных скважин после перераспределения напряжений

Всего за 2019 г. на участке Новый Шерегеш произошло 8372 сейсмособытия, из них: январь — 304, февраль — 215, март — 335, апрель — 615, май — 461, июнь — 814, июль — 2435, август — 1123, сентябрь — 553, октябрь — 569, ноябрь — 537, декабрь — 431. События 1–2 классов составляют 99.37 % от общего количества толчков, события 3 класса — 0.5 %, события с высокой энергетикой (свыше 1 000 Дж) — 0.118 % от общего числа событий. График сейсмособытий представлен на рис. 6.

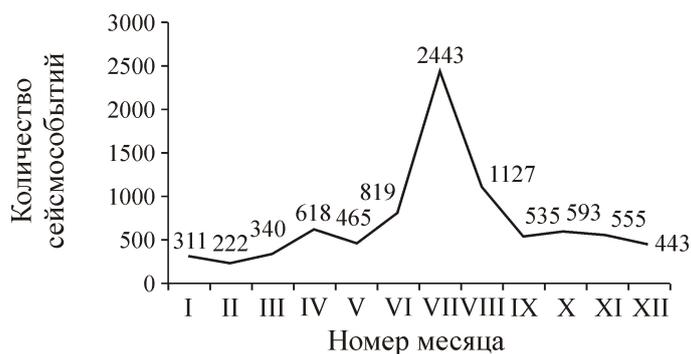


Рис. 6. График сейсмособытий за 2019 г.

ВЫВОДЫ

Исследования НДС массива в окрестности разгрузочных скважин в породном выступе свидетельствует о разгрузке массива от действующих напряжений вдоль всей группы скважин. Установлено, что расположение разгрузочных скважин на отм. +195 м, обеспечивающих разуплотнение породного уступа в его периферических областях, вызывает дополнительную разгрузку массива. При этом сжимающие горизонтальные напряжения в приграничной части выступа снижаются, соответствующие сдвигающие напряжения, сравниваемые со сцеплением массива, уменьшаются на 40–50 %, что приводит к снижению неупругих деформаций в породном выступе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kuznetsov V. A. Geotectonic zoning of the Altai-Sayan folded region, Questions of Asian geology, Moscow Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1954. (in Russian) [Кузнецов В. А. Геотектоническое районирование Алтае-Саянской складчатой области // Вопросы геологии Азии. — М.: Изд-во АН СССР, 1954.]

2. **Eremenko A. A., Eremenko V. A., and Gaidin A. P.** Improving the geotechnology of development of iron ore impact fields in the conditions of natural and man-made factors, *Novosibirsk, Science*, 2008, pp 33–37. (in Russian) [Еременко А. А., Еременко В. А., Гайдин А. П. Совершенствование геотехнологии освоения железорудных удароопасных месторождений в условиях действия природных и техногенных факторов. — Новосибирск: Наука, 2008. — С. 33–37.]
3. **Eremenko A. A., Filippov V. N., Konurin A. I., Khmelinin A. P., Baryshnikov D. V., and Khristolyubov E. A.** Parameters of drilling and blasting operations in the system for developing a sub-floor collapse at the Sheregesh field, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 126–131. (in Russian) [Еременко А. А., Филиппов В. Н., Коноурин А. И., Хмелинин А. П., Барышников Д. В., Христолюбов Е. А. О параметрах буровзрывных работ при системе разработки подэтажного обрушения на Шерегешевском месторождении // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 3. — С. 126–131.]
4. **Eremenko A. A., Gakhova L. N., Konurin A. I., Koltyshev V. N., Prib V. V., and Uzun E. E.** Assessment of the geomechanical condition of the rock massif during explosion of two approximate ore bodies at the Sheres deposit, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2018, no. 1, pp. 67–75. (in Russian) [Еременко А. А., Гахова Л. Н., Коноурин А. И., Колтышев В. Н., Приб В. В., Узун Е. Е. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке двух сближенных рудных тел на Шерегешевском месторождении // ГИАБ. — 2018. — № 1. — С. 67–75.]
5. **Shtirts V. A., Eremenko A. A., Konurin A. I., and Klishin I. V.** The experience of forecasting geodynamic phenomena during mass explosions, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. 7, pp 196–206. (in Russian) [Штирц В. А., Еременко А. А., Коноурин А. И., Клишин И. В. Опыт прогноза геодинамических явлений при массовых взрывах // ГИАБ. — 2015. — № 7. — С. 196–206.]
6. **Konurin A. I., Eremenko A. A., and Filippov V. N.** Features of assessing the state of a rock mass during industrial explosions and geodynamic phenomena, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2017, no. 7, pp. 153–160. (in Russian) [Коноурин А. И., Еременко А. А., Филиппов В. Н. Особенности оценки состояния массива горных пород при промышленных взрывах и геодинамических явлениях // ГИАБ. — 2017. — № 7. — С. 153–160.]
7. **Celleri, H. M., Sánchez, M., and Otegui, J. L.** Fracture behavior of transversely isotropic rocks with discrete weak interfaces, 2018, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(18), pp. 2161–2176.
8. **Feng D.-K., Zhang J.-M., and Hou W.-J.** Three-dimensional direct-shear behaviors of a gravel-structure interface, 2018, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(12), 04018095
9. **Berkane, A. and Karech, T.** Numerical modeling of the pathological case of a damaged tunnel application to Djebel El-Ouahch tunnel (east–west highway), 2018, *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(8), pp. 913–925.
10. **Wei X., Li C., Zhou X., Hu B., and Li W.** The change laws of strength and selection of cement-sand ratio of cemented backfill, 2017, *Geotechnical Engineering*, 48(4), pp. 144–150.
11. **Kozyrev A. A., Panin V. I., Ivanov S. N. et al.** Control of rock pressure in tectonically strained massifs. Part 2, *Apatity*, 1996, 162 pp. (in Russian) [Козырев А. А., Панин В. И., Иванов С. Н. и др. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Ч. 2. — Апатиты, 1996. — 162 с.]
12. **Benyavsky Z.** Management of ground stress, Moscow, World, 1990, 254 pp. (in Russian) [Бенявский З. Управление горным давлением. — М.: Мир, 1990. — 254 с.]
13. **Filippov V. N., Eremenko A. A., and Mokrousov I. N.** The effect of mining on seismic activity during the development of a safety pillar in the conditions of the Sheregesh deposit, *Interexpo Geo-Siberia*, 2019, vol. 2, no. 5, pp. 75–80. (in Russian) [Филиппов В. Н., Еременко А. А., Мокроусов И. Н. Влияние горных работ на сейсмическую активность при отработке предохранительного целика в условиях Шерегешевского месторождения // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2019. — Т. 2. — № 5. — С. 75–80.]