



**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНОЙ
РУДНОЙ ЗОНЫ С ЗАКЛАДОЧНЫМ МАССИВОМ НА ОРЛОВСКОЙ ШАХТЕ**

**А. А. Неверов¹, С. А. Неверов¹, Ю. Н. Шапошник¹,
А. И. Конури¹, С. Н. Шапошник²**

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: shaposhnikyury@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

²*Восточно-Казахстанский государственный технический университет,
ул. Серикбаева 19, г. Усть-Каменогорск 070010, Республика Казахстан*

Рассмотрено влияние конструктивных особенностей выемки на напряженно-деформированное состояние и устойчивость массива горных пород и закладки в границах блока 12с на уровне 11 горизонта Орловской шахты. Установлены основные факторы обрушений закладки в выработанное пространство отработанных очистных заходов.

Закладочный и рудный массивы, искусственная кровля, разрушение горных пород и закладки, деформационные характеристики закладки, численное моделирование

**ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF “CONTACT ORE ZONE-BACKFILLING MASS”
SYSTEM AT THE ORLOVSKY MINE**

**A. A. Neverov¹, S. A. Neverov¹, Yu. N. Shaposhnik¹,
A. I. Konurin¹, and S. N. Shaposhnik²**

¹*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Science
E-mail: shaposhnikyury@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091 Russia*

²*East Kazakhstan State Technical University,
ul. Serikbaeva 19, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan*

The influence of excavation design features on the stress-strain state and stability of the rock mass and backfilling within the boundaries of block 12c at level 11 of the Orlovsky mine horizon is considered. The main factors of backfilling caving to the mined-out space of stopes are determined.

Backfilling and ore masses, artificial roof, failure of rocks and backfilling, strain backfilling characteristics, numerical simulation

Безопасность и эффективность разработки наклонных залежей Орловского полиметаллического месторождения системой горизонтальных слоев с нисходящим порядком выемки и твердеющей закладкой [1–5] в первую очередь связана с устойчивостью искусственной кровли [6–7]. Однако на практике наблюдаются явления внезапного одновременного обрушения в очистные выработки закладки нескольких вышележащих слоев, что свидетельствует о сложных процессах взаимодействия естественных и искусственных массивов [8]. В работах [9–12] проведено моделирование геомеханической ситуации при отработке Орловского месторождения с применением твердеющей закладки и проанализированы причины обрушения искусственной кровли. Суть механизма процесса обрушения искусственной кровли [8, 10–12] заключается в следующем: менее жесткая и прочная, чем вмещающий массив, закладка выработанного пространства

со сторон висячего и лежащего боков сдавливается вмещающими породами и переходит в пластичное состояние. Предложена также жесткопластическая модель обрушения искусственной кровли, отличающаяся наличием в искусственном массиве раздавленной горным давлением и находящейся в пластичном состоянии закладки верхних горизонтов, под воздействием которой нижележащие жесткие слои закладки выдавливаются в очистные выработки обрабатываемого слоя. Лабораторными исследованиями деформационных и прочностных свойств закладки и натурными наблюдениями за деформациями природных и искусственных массивов при отработке слоев установлено, что эквивалентный модуль деформации слоистого искусственного массива находится в пределах 120–200 МПа, что в 25–30 раз ниже жесткости природного скального массива, а при достигнутой полноте заполнения выработанного пространства и низкой жесткости закладки в ранние сроки твердения конвергенция кровли и почвы слоя при его отработке в три стадии достигает 200 мм, что приводит к существенному снижению устойчивости искусственной кровли и проведения дополнительных мероприятий по увеличению жесткости связи искусственной кровли с возводимым закладочным массивом.

В работе [13] отмечено, что с ростом прочности закладки увеличивается ее жесткость. Таким образом, при отбойке руды упругий импульс взрыва на границе раздела сред “руда – закладка” большей частью отражается назад в массив руды, а меньшей частью преломляется в искусственный массив в соседних заходках. Чем больше жесткость закладки, тем большая часть упругого импульса взрыва распространяется в ней. Это приводит к повреждению закладочного массива с последующим появлением в нем трещин и разрушением. Физико-механические свойства закладки на Орловской шахте: модуль упругости Юнга — $1.5 \cdot 10^3$ МПа, модуль деформации — $(0.1 \div 0.2) \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона — 0.16, угол внутреннего трения — 30° , предел прочности на сжатие — $3.0 \div 5.0$ МПа, предел прочности на растяжение — $0.3 \div 0.8$ МПа, предельное напряжение сдвига закладочной смеси — $30 \div 40$ Па, плотность закладочной смеси — $2100 \div 2200$ кг/м³, плотность закладки — $2200 \div 2400$ кг/м³.

В настоящее время при отработке блока 12с залежи “Основная” зафиксированы случаи сдвижения закладочного массива по падению рудной залежи. Целесообразно при контроле за сдвижениями закладочного массива на шахте внедрить инклинометрический метод [14–16]. Для геомеханического обоснования горнотехнической ситуации на Орловском месторождении использовано численное моделирование методом конечных элементов в программе Ansys12. Анализ геолого-маркшейдерской документации на месторождении свидетельствует о том, что породы в приконтурной с рудным телом зоне весьма неустойчивые из-за многочисленных разнонаправленных микротрещин, заполненных кальцитом, пиритом, и многочисленных зеркал скольжения. Поэтому технологические риски при выполнении численных расчетов показателя устойчивости учтены через коэффициент структурного ослабления массива пород ($K_c = 0.1 \div 0.3$ для сильно и слабо трещиноватых пород соответственно).

В данной работе проанализированы следующие возможные варианты сдвижения рудного и закладочного массивов по падению рудной залежи:

— сдвижение рудного и закладочного массивов по падению рудной залежи блока 12с по плоскости висячего и лежащего боков происходит за счет недостаточного их сцепления. При этом полагается, что на нижних отметках блока 12с имеются незаложенные ранее пустоты, образованные при выемке руд слоевыми или подэтажно-камерными системами разработки;

— использование твердеющей закладки, не отвечающей требованиям технологии ее производства, при обязательном наличии ниже обрабатываемых очистных заходов открытых обнажений, полостей, которые не учтены в маркшейдерской документации. Данное предположение обладает высокой вероятностью смещения (закладки в нижележащие выработки);

— сдвигение закладочного массива по падению рудной залежи блока 12с связано с постоянным недозакладом вышерасположенных слоевых выработок, в результате чего в блоке происходит постоянное накапливание объема пустот. За счет этого предполагается, что часть вышележащего закладочного массива разрушена и создает пригрузку нижним более жестким слоям закладки. При достижении разрушенной закладкой определенного объема, достаточного для выдавливания ее нижних слоев в выработанное пространство с учетом действующих напряжений во вмещающих породах, следует ожидать разрушение и смещение закладки в очистные выработки обрабатываемого слоя.

Для моделирования был принят центральный вертикальный разрез вкрест простирания рудной залежи для блока 12с. В расчетах учтено, что выше нижней отметки 11 горизонта (отметка –350 м) все запасы погашены и заложены. Физико-механические свойства горных пород соответствуют геологическим данным блока 12с. Мощность “рубашки” неустойчивых пород приконтурной рудной зоны принята 35 м (среднее значение). Оценка устойчивости горных пород осуществлялась по критерию возникновения растягивающих напряжений и Кулона – Мора с учетом коэффициента структурного ослабления $K_c = 0.2 - 0.3$. Для твердеющей закладки использовался критерий устойчивости, определяемый как $\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{сж}^3$ (где $\sigma_{сж}^3$ — средняя прочность закладки на сжатие), т. е. разрушение закладочного массива наступает тогда, когда интенсивность главных напряжений становится больше предела прочности закладки на сжатие, а также по величине растягивающих усилий. В расчетах значения пределов прочности закладки на сжатие соответствуют 4.0–6.0 и 2.5 МПа. При этом учитывалось известное положение — при всестороннем сжатии закладочный массив сохраняет устойчивое состояние, если величина сжимающих напряжений в среднем в 1.5–2.0 раза больше, чем при одноосном.

Все расчеты разделены на две группы:

— геомеханическая оценка горнотехнической ситуации в зависимости от физико-механических свойств твердеющей закладки: 1 — более прочная (жесткая) закладка с $\sigma_{сж}^3 = 4 - 6$ МПа; 2 — менее прочная закладка с $\sigma_{сж}^3 \leq 2.5$ МПа;

— геомеханическая оценка горнотехнической ситуации в условиях наличия недозакладов в вышележащих заложённых слоях: высота недозаклада в слое принята на уровне 0.5 м.

На рис. 1 приведены картины распределения максимальных σ_1 и минимальных σ_3 главных напряжений в рудо-породном и закладочном массивах в зависимости от деформационно-прочностных свойств закладки для схемы, моделирующей предельную ситуацию при одновременной отработке двух заходок, разделенных между собой (по высоте) рудным массивом на высоту двух слоев (рис. 1а). Выявлено, что более высоко модульная закладка в большей степени ограничивает перемещение налегающих пород и воспринимает часть нагрузки от их веса. При этом следует отметить, что действующие главные напряжения в более прочном закладочном массиве — сжимающие, что положительно сказывается на его устойчивости.

Применение для заполнения отработанных слоев менее жесткой закладки обуславливает развитие в ней и окружающем закладку массиве растягивающих напряжений, а также формирование более высокого уровня НДС и в особенности высокой концентрации напряжений в краевых областях зоны отработки, что свидетельствует о более высоком опорном давлении на этих участках. В связи с этим проведено моделирование, при котором основная закладка считалась разрушенной, кроме пяти нижележащих слоев, расположенных в краевой зоне и примыкающих к отработанной заходке (рис. 1б). В результате потери устойчивости закладки в породах висячего бока формируется весьма обширная зона растяжения и наблюдается пригрузка пяти нижележащих заложённых слоев, действующие напряжения в которых превышают предельные прочностные характеристики закладки.

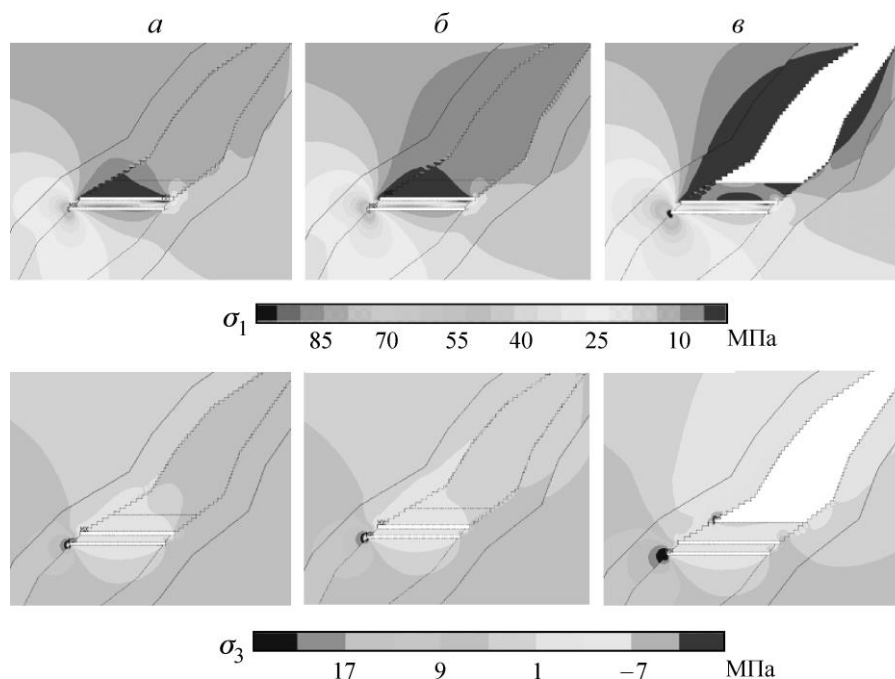


Рис. 1. Распределение главных максимальных σ_1 и минимальных σ_3 напряжений в рудо-породном и закладочном массивах при использовании: *а* — прочной закладки; *б* — менее прочной закладки; *в* — в условиях разрушенной вышележащей закладки, потерявшей связь с основным массивом (кроме пяти более жестких слоев выше отметки –350 м)

Для оценки устойчивости горных пород и закладки в границах блока 12с на уровне 11 горизонта залежи “Основная” использовалось НДС массива, полученное из упругого решения. На рис. 2 приведены зоны возможных разрушений в рудо-породном и закладочном массивах в зависимости от деформационно-прочностных свойств закладки для схемы, моделирующей предельную ситуацию при одновременной отработке двух заходов, разделенных по высоте рудным массивом на высоту двух слоев.

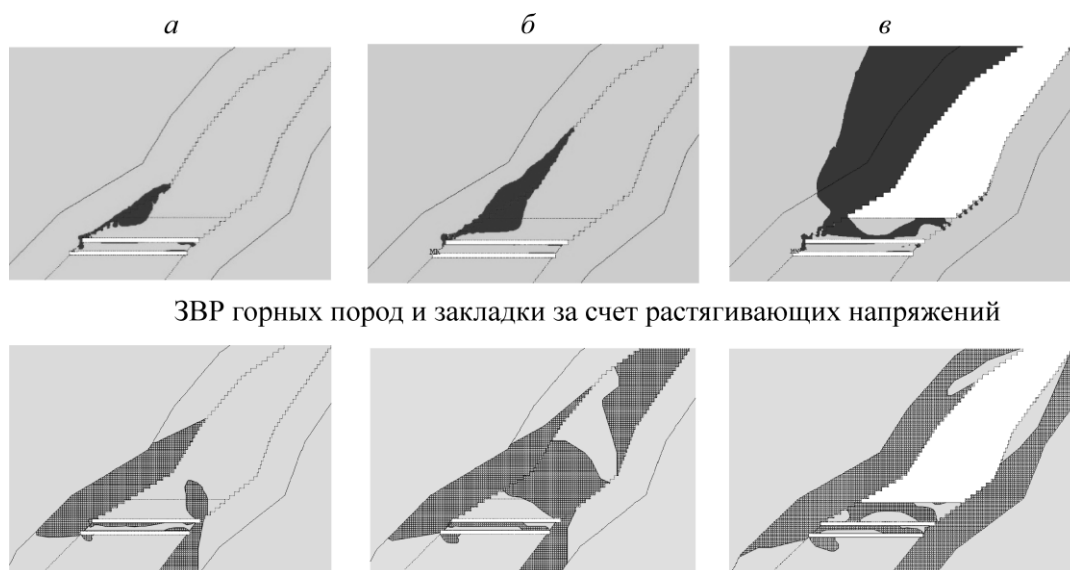


Рис. 2. Зоны возможных разрушений горных пород и закладки при одновременной отработке двух заходов, разделенных рудным массивом на высоту двух слоев при использовании: *а* — прочной закладки; *б* — менее прочной закладки; *в* — в условиях разрушенной вышележащей закладки, потерявшей связь с основным массивом (кроме пяти более жестких слоев выше отметки –350 м)

При менее прочной закладке наблюдаются более обширные участки потерь устойчивости как в самой закладке, так и в окружающем ее вмещающем массиве. Так, разрушение закладки и горных пород за счет растягивающих усилий отмечаются в основном в районе висячего бока залежи. Результаты расчетов устойчивости по критерию Кулона – Мора свидетельствуют о том, что использование менее прочной твердеющей закладки приводит к ее разрушению и к развитию процессов обрушения вмещающих пород висячего и лежащего боков, создающих дополнительную пригрузку нижележащим залеженным слоям.

Установление степени влияния конструктивных особенностей на НДС и устойчивость массива горных пород и закладки в границах блока 12с на уровне 11 горизонта залежи “Основная”, а именно вариантов ведения горных работ в районе висячего и лежащего боков на нескольких подэтажах слоевой системой разработки, а также камерной выемкой, разделенных как рудным, так и рудо-закладочным массивом, показало высокую согласованность результатов с рассмотренным вариантом. Возможные разрушения породного и закладочного массивов наблюдаются при определенном сочетании взаимовлияющих факторов: наличия в приконтурной рудной зоне “рубашки” неустойчивых пород и использования не соответствующей нормативным требованиям закладки. Особо следует отметить ухудшение геомеханической обстановки в условиях ведения горных работ на нескольких разделенных по высоте слоях при сформированных в нижней части добычного участка отработанных заходов и камер, разделенных рудо-закладочным массивом минимальной высоты. В данном случае возможно ожидать большие смещения рудо-закладочного массива в выработанные пространства отработанных слоев и камер. Полученные результаты также свидетельствуют о наиболее вероятном разрушении искусственной кровли вблизи контакта с висячим боком залежи.

ВЫВОДЫ

Приконтурная рудная зона сильно нарушенных пород для рассмотренных горнотехнических ситуаций практически полностью находится в неустойчивом состоянии. Это характеризует высокую вероятность образования вблизи контакта рудной залежи с вмещающими породами висячего бока различного рода обрушений, одним из которых может стать развитие так называемых “куполов”. Обрушение слоев закладки с позиции предложенных вариантов, учитывающих разные деформационные характеристики закладки и наличие недозакладов, можно объяснить существенной пригрузкой вышележащей обрушенной породой и закладкой нижележащих залеженных слоев в выработанное пространство открытых заходов (камер). Таким образом, по совокупности влияющих факторов основными причинами обрушений закладки в выработанное пространство отработанных заходов являются не отвечающая нормативным требованиям закладка, недозаклады в вышележащих отработанных слоях, неустойчивость вмещающих пород вокруг рудной залежи, отработанные камеры на нижних подэтажах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- 1. Barilyuk A. I., Ryshkel I. A., Tkachev V. M., Makarov A. B., Ort V. G., and Ananin A. I.** Development of the Orlovskoye field by a system of horizontal layers in descending order, *Mining Journal*, 2002, no. 5, pp. 55–58 (in Russian) [Барилюк А. И., Рышкель И. А., Ткачев В. М., Макаров А. Б., Орт В. Г., Ананин А. И. Разработка Орловского месторождения системой горизонтальных слоев в нисходящем порядке // Горн. журнал. — 2002. — № 5. — С. 55–58.]
- 2. Pustokhina N. G., Reish A. I., Pustokhin G. M., Gusmanov F. F., and Kokarev K. V.** Development of development systems at the Orlovsky mine, *News of the higher institutions*, 2012, no. 3, pp. 26–29 (in Russian) [Пустохина Н. Г., Райш А. И., Пустохин Г. М., Гусманов Ф. Ф., Кокарев К. В. Развитие систем разработки на Орловском руднике // Изв. вузов. — 2012. — № 3. — С. 26–29.]

3. **Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N., Shaposhnik S. N., and Tursunbaeva A. K.** Technology of backfill at mining enterprises of the Republic of Kazakhstan, *Journal Mining Science*, 2013, no. 1, pp. 95–105 (in Russian) [**Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Турсунбаева А. К.** Технология закладочных работ на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 95–105.]
4. **Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N., Shaposhnik S. N., Nurshayykova G. T., and Tungushbaeva Z. K.** Development of the technology of backfilling on the basis of cement-slag binder at the Orlovsky mine, *Journal Mining Science*, 2017, no. 1, pp. 84–91 (in Russian) [**Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Нуршайыкова Г. Т., Тунгушбаева З. К.** Разработка технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 84–91.]
5. **Bitimbaev M. Zh., Krupnik L. A., and Shaposhnik Yu. N.** Theory and practice of backfilling work in the development of mineral deposits, Association of Universities of the Republic of Kazakhstan, Almaty: RPC Dowir LLP, 2012, 624 pp. (in Russian) [**Битимбаев М. Ж., Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н.** Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых, Ассоциация вузов Республики Казахстан. — Алматы: ТОО РПИК “Дауір”, 2012. — 624 с.]
6. **Zhirnov A. A., Abdrakhmanov S. U., Shaposhnik Yu. N., and Konurin A. I.** Rock mass stability estimation and selection of mine support design at Orlov complex ore deposit, *Mining Journal*, 2018, no. 3, pp. 51–57 (in Russian) [**Жирнов А. А., Абдрахманов С. У., Шапошник Ю. Н., Конурин А. И.** Оценка устойчивости массива горных пород и выбор типа и параметров крепления выработок на Орловском полиметаллическом месторождении // Горн. журнал. — 2018. — № 3. — С. 51–57.]
7. **Shaposhnik Yu. N., Konurin A. I., and Shokarev D. A.** Development of technology for mine workings under conditions of intensive oxidation of sulphide ores at Orlovsky field, *Vestnik RUDN, Series, Engineering Studies*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 235–245 (in Russian) [**Шапошник Ю. Н., Конурин А. И., Шокарев Д. А.** Разработка технологии крепления горных выработок в условиях интенсивного окисления сульфидных руд на Орловском месторождении // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. — 2018, — Т. 19. — № 2. — С. 235–245.]
8. **Tereshin A. A.** Substantiation of the method of controlling an artificial roof with a development system with horizontal layers with a downward groove and bookmark, *Synopsis of Cand. Tech. Sci. Thesis*, Moscow, MGGRU, 2002 (in Russian) [**Терешин А. А.** Обоснование способа управления искусственной кровлей при системе разработки горизонтальными слоями с нисходящей выемкой и закладкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГГРУ, 2002.]
9. **Makarov A. B. and Ogorodnikov S. V.** Forecast and prevention of rock bursts when developing powerful sloping deposits of horizontal descending layers with a backfill, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2005, no. 5, pp. 187–189 (in Russian) [**Макаров А. Б., Огородников С. В.** Прогноз и предотвращение горных ударов при разработке мощных наклонных залежей горизонтальными нисходящими слоями с закладкой // ГИАБ. — 2005. — № 5. — С. 187–189.]
10. **Isaev K. O., Makarov A. B., Tereshin A. A., and Sosunov Yu. A.** Geomechanical processes in the development of the Orlovsky field layered system with a backfill in a descending order, *Geodynamics and stress state of the earth’s interior*, Novosibirsk, IGD SB RAS, 1999, 152 pp. (in Russian) [**Исаев К. О., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Геомеханические процессы при разработке Орловского месторождения слоевой системой с закладкой в нисходящем порядке // Геодинамика и напряженное состояние земных недр. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1999. — 152 с.]
11. **Isaev K. O., Makarov A. B., Tereshin A. A., and Sosunov Yu. A.** Management of rock pressure in the development of the Orlovsky field by a layered system with a bookmark, *Marksheyderskiy Vestnik*, 1999, no. 2, pp. 23–33 (in Russian) [**Исаев К. О., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Управление горным давлением при разработке Орловского месторождения слоевой системой с закладкой // Маркшейдерский вестник. — 1999. — № 2. — С. 23–33.]

12. **Kunanbayev N. S., Makarov A. B., Tereshin A. A., and Sosunov Yu. A.** Geomechanical processes in the development of the Orlovsky field, *Mining Journal*, 2000, no. 5, pp. 10–13 (in Russian) [**Кунанбаев Н. С., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Геомеханические процессы при разработке Орловского месторождения // *Горн. журнал.* — 2000. — № 5. — С. 10–13.]
13. **Makarov A. B.** Practical geomechanics, Allowance for mining engineers, Moscow, Mining Book, 2006, 391 pp. (in Russian) [**Макаров А. Б.** Практическая геомеханика: пособие для горных инженеров. — М.: Горная книга, 2006. — 391 с.]
14. **Sergeev S. V. and Zaitsev D. A.** Promising methods for controlling the deformation of the backfill massif under a layered system for the development of rich iron ores, *News of the TSU, Earth Sciences*, 2011, vol. 1, pp. 365–370 (in Russian) [**Сергеев С. В., Зайцев Д. А.** Перспективные методы контроля деформирования закладочного массива при слоевой системе разработки богатых железных руд // *Изв. ТулГУ. Науки о Земле.* — Вып. 1. — 2011. — С. 365–370.]
15. **Baryshnikov V. D., Baryshnikov D. V., and Kachalsky V. G.** The experience of using the inclinometric method to control the movement of the backfill array during underground development of deposits, *Geo-Siberia-2007, SGGA, Novosibirsk*, 2007, vol. 5, pp. 225–228 (in Russian) [**Барышников В. Д., Барышников Д. В., Качальский В. Г.** Опыт применения инклинометрического метода для контроля за сдвигами закладочного массива при подземной разработке месторождений // *Гео-Сибирь-2007.* — Новосибирск: СГГА, 2007. — Т. 5. — С. 225–228.]
16. **Bakulin V. A.** Controlling the stability of the artificial roof with a downward layer excavation, *Mining Journal*, 2010, no. 4, pp. 19–21 (in Russian) [**Бакулин В. А.** Контроль устойчивости искусственной кровли при нисходящей слоевой выемки // *Горн. журнал.* — 2010. — № 4. — С. 19–21.]