

# Определение безопасных пролетов выработок с использованием несущей способности пород при разработке месторождений

В.И. Голик ✉

Московский государственный политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ [v.i.golik@mail.ru](mailto:v.i.golik@mail.ru)

**Резюме:** Статья посвящена совершенствованию методов расчета параметров горных выработок путем учета прочности пород и величины природно-техногенных напряжений. Актуальность исследования данного направления определяется тем, что завышение надежности расчетов увеличивает неактивные запасы, а занижение – повышает опасность работ. Корректность определения устойчивости параметров обнажений пород повышается при использовании феномена самозаклинивания пород при обнажении. Допустимые параметры очистных выработок определяются на основании обобщения существующих концепций, в том числе М.М. Протодияконова, в соответствии с которой на выработку действует только масса заключенных в пределах свода пород. Дана справка о состоянии горнодобывающей отрасли России. Приведены результаты исследований устойчивости рудовмещающих породных массивов с детализацией возможности сохранения пролета кровли плоской формы при отработке маломощных пологопадающих рудных тел. Определена взаимосвязь пролета выработки бесконечной длины, высоты свода естественного равновесия над ней и инженерно-геологических свойств пород. Приведен пример инженерно-геологического исследования рудовмещающего массива с графической интерпретацией. Разработан алгоритм определения безопасных параметров управления состоянием массива. Доказано, что при формировании напряжений в зоне выработок приоритетную роль играют горизонтальные напряжения, а управление состоянием массива заключается в реализации остаточной несущей способности пород путем ограничения величины пролетов. Сделан вывод, что определение размеров выработок пород по совмещенным критериям прочности пород и величины напряжений позволяет повысить безопасность работающих и уменьшить разубоживание руд породой. Результаты исследования могут быть востребованы при подземной добыче твердого минерального сырья.

**Ключевые слова:** месторождение, породный массив, выработанное пространство, пролеты, безопасность

**Для цитирования:** Голик В.И. Определение безопасных пролетов выработок с использованием несущей способности пород при разработке месторождений. *Горная промышленность*. 2024;(5S):59–63. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-59-63>

## Determination of safe spans of mine workings based on the bearing capacity of rocks in deposit development

V.I. Golik ✉

Moscow State Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ [v.i.golik@mail.ru](mailto:v.i.golik@mail.ru)

**Abstract:** The article focuses on improving methods for calculating parameters of mining operations by accounting the strength of the rocks and the magnitude of natural and man-made stresses. The relevance of research in this area is determined by the fact that overstating the reliability of calculations increases non-recovered reserves, while understating increases the operating hazards. The correctness of determining the stability of the rock outcrop parameters increases when using the phenomenon of self-blocking of rocks upon their exposure. The permissible parameters of the stopes are determined based on generalization of the existing concepts, including the one by M.M. Protodiakonov, according to which only the mass of the rocks contained within the dome acts on the mine working. Information is provided on the state of the mining industry in Russia. The results of studying the stability of the ore-bearing rock masses are presented with the detailed description of the possibility to preserve the span of a flat roof during the development of narrow slightly dipping ore bodies. The paper defines the relationship between the span of the workings of infinite length, the height of the dome of natural equilibrium above it and the engineering and geological properties of rocks. An example of an engineering–geological study of an ore-containing rock mass with graphical interpretation

is given. An algorithm has been developed for determining the safe parameters to control the state of the rock mass. It is proved that horizontal stresses play an important role in formation of stresses within the mined area, and controlling the state of the rock mass consists in utilizing the residual bearing capacity of rocks by limiting the length of the spans. It is concluded that the determination of the size of mine workings based on combined criteria of the rock strength and the stress values makes it possible to increase the safety of workers and reduce the dilution of ores with the gangue rock. The results of the research may be demanded in the underground mining of solid minerals.

**Keywords:** deposit, rock mass, mined-out space, spans, safety

**For citation:** Golik V.I. Determination of safe spans of mine workings based on the bearing capacity of rocks in deposit development. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):59–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-59-63>

**Введение**

Состояние горнодобывающей отрасли России характеризуется снижением объема добываемых руд в первую очередь за счет выбывания из числа действующих месторождений с выработанными запасами. Проблема модернизации технологий подземной разработки приобретает новую актуальность, особенно при разработке месторождений, залегающих на небольшой глубине в сложных горнотехнических условиях. Поведение рудовмещающего массива определяется характером оруденения и интенсивностью напряжений и деформаций, поэтому совершенствование технологий разработки маломощных рудных тел осуществляется с учетом взаимодействия участвующих факторов. Часть пологих месторождений малой и средней мощности обрабатывается технологиями с погашением выработанного пространства изоляцией с риском для земной поверхности.

При подземной разработке месторождений управление горным давлением включает в себя ограничение размеров выработок. Сложность учёта происходящих в массиве явлений стимулирует завышение коэффициента надежности определения величины удерживающих и разрушающих сил, генерируемых природными и технологическими нагрузками.

Управление состоянием массива сводится к регулированию гравитационных, тектонических и сейсмических явлений, поэтому совершенствование системы управления может быть достигнуто в результате оптимизации форм взаимодействия физико-химических процессов. Завышение надежности расчета прочности несущих элементов массива снижает экономическую эффективность добычи руд, а занижение опасно, поэтому оптимизация величины пролетов обнажения пород является актуальной задачей. Устойчивость обнажений пород в кровле очистных блоков обуславливается интенсивностью и характером развития в породах кровли субпараллельных рудным телам нарушений.

Многообразие геологических и горнотехнических условий локализации месторождений обусловило применение при отработке запасов комбинированных систем разработки: подэтажного обрушения для мощной части рудного тела, с магазинированием для маломощных участков рудного тела и сплошной – для секущих рудных тел и др.

Целью исследований является совершенствование методики расчета допустимых пролетов обнажений пород по совмещенным критериям прочности пород и величине действующих природно-техногенных напряжений.

Задачи исследований включают в себя оценку влияния участвующих факторов в конкретных условиях месторождения и разработку методики определения безопасных обнажений пород. Снижение опасности горных работ

возможно при уменьшении объема выработанного пространства за счет увеличения извлечения металлов из уже добытых руд и хвостов их первичной переработки при использовании новых технологий [1–3].

**Методы**

Допустимые параметры выработок определяются на основе обобщения теории и практики в альтернативных концепциях, различающихся приоритетным признаком устойчивости: свод пород, балка пород, слой пород и шарнирная арка из заклинившихся пород. Натурными исследованиями определяются нарушенность пород макро- и микротрещинами, размеры структурных блоков и физико-механические свойства. Аналитическими расчетами исходя из условия самозаклинивания пород при обнажении определяются устойчивые параметры обнажений пород. Состояние рудовмещающего массива и устойчивость образованных в них горных выработок контролируются методами геомеханического мониторинга состояния горных пород на этапах разработки месторождений [4–5].

**Результаты**

Два шарнира расположены в основаниях свода, а третий – в центре слоя пород над выработкой. При нарушении продольными и диагональными разломами арка не образуется вследствие недостаточной силы распора. Потеря несущей способности слоя пород наступает при скалывании и разрушении площадки, высотой примерно 1/3 размера структурного блока.

При отработке маломощных пологопадающих рудных тел расчет параметров обнажений пород сводится к определению эквивалентного пролета кровли прямоугольной выработки:

$$L_f \leq L_f^o,$$

где  $L_f$  – фактической пролет кровли выработки, м;  $L_f^o$  – допустимый пролет обнажения плоской кровли при данном наклоне выработки, м.

Связь между предельно допустимыми эквивалентными пролетами пород кровли выработок в рудных телах с углом падения  $\alpha$  и  $0^\circ$  выражается зависимостью:

$$L_\alpha^o = K_\alpha L_0^o,$$

где – предельный эквивалентный пролет пород кровли горизонтальной выработки; – коэффициент учета угла наклона выработки:

$$K_\alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha + \eta \sin^2 \alpha},$$

где  $\alpha$  – угол падения рудного тела, град;  $\eta$  – коэффициент бокового распора:

$$\eta = \frac{\mu}{1 - \mu},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Если ширина выработки с плоской кровлей превысит ее допустимое значение, породы обрушаются, а кровля приобретает сводообразную форму и работает как параболическая трехшарнирная арка (рис. 1).

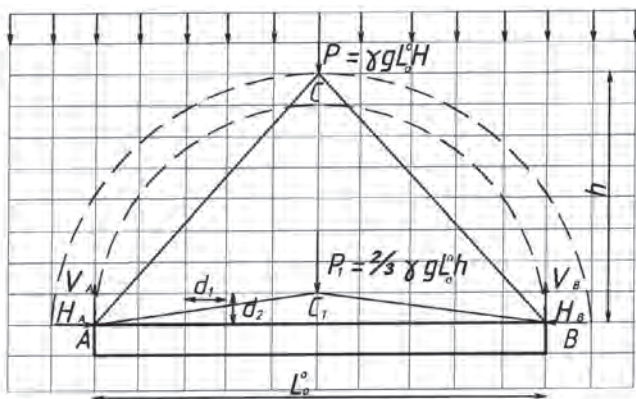


Рис. 1  
Схема взаимодействия структурных блоков пород кровли

Fig. 1  
The scheme of interaction of structural blocks of roof rocks

Пролет бесконечной длины выработки  $l$ , высота свода естественного равновесия над ней  $h_{arch}$  и инженерно-геологические характеристики массива связаны между собой:

$$\left( \frac{3R_{comp} k_w d_2^2}{2k_3 \gamma h_{arch} g} \right)^2 = d_2^2 \left( \frac{L^0}{2} \right)^2 + \left( \frac{L^0}{2} \right)^4,$$

где  $R_{comp}$  – прочность пород при одноосном сжатии, Па;  $k_w$  – коэффициент структурного ослабления пород;  $d_2$  – вертикальный размер структурного породного блока, м;  $\gamma$  – плотность пород, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{arch}$  – высота свода естественного равновесия, м;  $L^0$  – допустимый пролет плоской кровли выработки бесконечной длины;  $k_3$  – коэффициент запаса.

Таблица 1  
Инженерно-геологическая характеристика рудовмещающего массива

Элементы массива и их мощность	Тип пород	Размеры структурных блоков пород, м		Коэффициент ослабления пород	Свойства пород	
		вертикальный	горизонтальный		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа
Внутренняя часть тектонического блока, 60–70 м	Глинистые известняки	4,5	2,5	0,54	2760	124
Зоны влияния разлома висячем и лежащем крыльях, 15–30 м	Афанитовые известняки	3,0	2,0	0,45	2720	150
Внутренняя часть Центрального тектонического блока, 80–90 м	Афанитовые известняки	4,5	2,5	0,57	2720	155
Внутренняя часть Центрального тектонического блока, 80–90 м	Диоритовые порфириды	3,0	2,0	0,46	2710	101
Зоны туффитовых известняков, 15–20 м	Туффитовые известняки	4,0	2,0	0,51	2720	127
Внутренняя часть Восточного тектонического блока, 30–100 м	Водорослевые известняки	4,5	2,5	0,58	2710	170

Для расчетов допустимых пролетов очистных выработок в каждом конкретном случае выполняется комплекс инженерно-геологических исследований свойств пород (табл. 1).

Расчеты предельно-допустимых обнажений плоской кровли интерпретируются графиками зависимости допустимого эквивалентного пролета обнажения плоской кровли от угла падения рудного тела и глубины залегания (рис. 2).

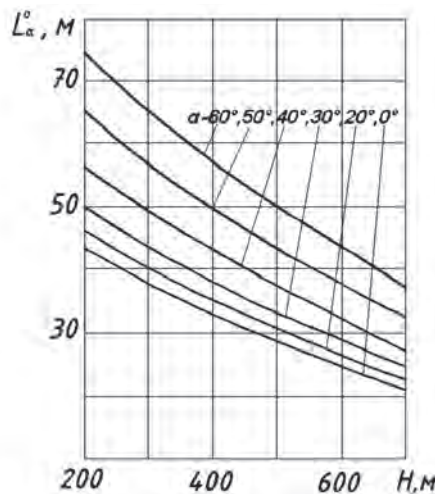


Рис. 2  
Зависимость предельно-допустимого пролета плоской кровли  $L_{\alpha}^0$  от глубины разработки  $H$  и угла падения рудного тела  $\alpha$

Fig. 2  
Dependence of the maximum permissible span of a flat roof ( $L_{\alpha}^0$ ) on the mining depth ( $H$ ) and the dip angle of the ore body ( $\alpha$ )

По предельно допустимому эквивалентному пролету плоской кровли определяются параметры выработки с использованием алгоритма (рис. 3).

В трещиноватых скальных породах структурные блоки смещаются в выработанное пространство, а кровля принимает форму свода, которая нежелательна из-за повышенного разубоживания руд. Для исследования состояния массивов применяют методы, базирующиеся на: измерении деформаций и расчете по ним напряжений; измере-

Table 1  
Engineering and geological characteristics of the ore-bearing rock mass



Рис. 3  
Алгоритм определения безопасных параметров управления состоянием массива

Fig. 3  
Algorithm for determining safe parameters to control the rock mass state

нии давления; определении с помощью корреляционных зависимостей и др. (табл. 2).

Динамика напряжений, оценка опасности критических деформаций, исследование реактивации разломов, вызванных горными работами, оцениваются средствами геолого-геофизического сопровождения горных работ [6–9].

Если кровлю рассматривать как плиту, опертую на целики или защемленную по контуру, то ограниченную по контуру выработку можно заменить эквивалентной выработкой бесконечно большой длины, где кровля выработок сохраняет плоскую форму.

Эквивалентный пролет выработки  $l$ :

$$l = \frac{ab}{a+b},$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно длина и ширина камеры, м.

Плоская форма пролета обнажения кровли возможна при самозаклинивании структурных блоков:

$$L = 2d_2 \sqrt{\frac{10R}{K_2 \gamma d_1}},$$

где  $L$  – предельный пролет плоской формы обнажения пород кровли, м;  $d_1$  – горизонтальный размер структурных блоков, м;  $d_2$  – вертикальный размер структурных блоков, м;  $R$  – предел прочности пород на сжатие, МПа;  $K_2$  – коэффициент запаса;  $\gamma$  – объемный вес пород, т/м<sup>3</sup>.

Если в кровле находится часть рудопроводящего шва, которая ведет себя как отслаивающаяся пачка, – способность к самозаклиниванию снижается.

Допустимый пролет непосредственной кровли плоской формы  $L$ :

$$L = 1,48d_2 \sqrt{\frac{10R}{K_2 \gamma b}},$$

где  $d_2$  – вертикальный размер структурного блока пород непосредственной кровли, м;  $b$  – мощность непосредственной кровли, м.

**Обсуждение результатов**

Безопасные пролеты выработок с использованием несущей способности дискретных пород обосновываются решением математической модели, описывающей устойчивые параметров при приемлемых условиях освоения геологических ресурсов в рамках концепции экологически сбалансированной геотехнологии [10–12].

При формировании напряжений в зоне выработок приоритетную роль играют горизонтальные напряжения. Управление напряжением в нарушенных породах состоит в реализации остаточной несущей способности пород путем ограничения величины пролетов.

Геомеханическая сбалансированность массива обеспечивается разделением массивов на участки, для которых удовлетворяются условия:

$$L < L_{lim} uH > h,$$

а внутри участков – на пролеты с плоской кровлей, где  $H$  и  $h$  – глубина работ от поверхности и высота зоны влияния выработок, м;  $L_{lim}$  – предельный по условию сохранения плоской кровли пролет.

**Заключение**

Совершенствование методики расчета допустимых пролетов обнажений пород по совмещенным критериям прочности пород и величины напряжений позволяет повысить безопасность работающих и уменьшить разубоживание руд породой.

Таблица 2  
Методы исследования свойств пород

Table 2  
Methods of studying the properties of rocks

Название метода	Принцип	Реализация
Разгрузка напряжений	Упругое восстановление формы после снятия нагрузки	Выбуривание кернов с датчиками на забой и измерение напряжений с пересчетом по формулам теории упругости
Акустический	Способность пород генерировать звуковые импульсы микронарушений при изменении напряжений	Подача и прием звуковых импульсов
Ультразвуковой	Зависимость между скоростью упругих волн в породах и напряжениями	Подача и прием звуковых импульсов
Электрометрический	Зависимости между удельным электрометрическим сопротивлением пород и напряжениями	Подача и прием электрических импульсов
Сейсмоакустический	Зависимость между упругими колебаниями и напряжениями	Возбуждение упругих колебаний в породе ударным способом

## Список литературы / References

1. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023;67(3-4):398–408. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01526-z>
2. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing. *Metallurgist*. 2023;67(1-2):96–103. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01493-5>
3. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023;66(11-12):1476–1480. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y>
4. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры. *Маркшейдерский вестник*. 2016;(1):35–43.  
Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of properties and the condition of the massif of rocks by underground mining of fields of difficult structure. *Mine Surveying Bulletin*. 2016;(1):35–43. (In Russ.)
5. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):405–415.  
Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):405–415. (In Russ.)
6. Lei Q., Gao K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019;113:121–133. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.001>
7. Vanneschi C., Mastrococco G., Salvini R. Assessment of a rock pillar failure by using change detection analysis and FEM modelling. *International Journal of Geo-Information*. 2021;10(11):774. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110774>
8. Xia K., Chen C., Wang T., Yang K., Zhang C. Investigation of mining – induced fault reactivation associated with sublevel caving in metal mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022;55(10):5953–5982. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02959-9>
9. Tu J., Zhang Y., Mei G., Xu N. Numerical investigation of progressive slope failure induced by sublevel caving mining using the finite difference method and adaptive local remeshing. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3812. <https://doi.org/10.3390/app11093812>
10. Петров Ю.С., Соколов А.А., Раус Е.В. Математическая модель оценки техногенного ущерба от функционирования горных предприятий. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019;11(4):554–560.  
Petrov Yu.S., Sokolov A.A., Raus E.V. A mathematical model for estimating technogenic losses from the operation of mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2019;11(4):554–560. (In Russ.)
11. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Geocological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(2):580–588. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588>
12. Гончар Н.В., Пикалов В.А., Соколовский А.В., Терешина М.А. Экологосбалансированная геотехнология освоения природных и техногенных георесурсов. *Горная промышленность*. 2024;(4):68–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-68-73>  
Gonchar N.V., Pikalov V.A., Sokolovsky A.V., Tereshina M.A. Environmentally balanced geotechnology for development of natural and man-made geological resources. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):68–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-68-73>

**Информация об авторе**

Голик Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@mail.ru

**Information about the author**

Vladimir I. Golik – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy of Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 17.08.2024  
Поступила после рецензирования: 08.10.2024  
Принята к публикации: 16.10.2024

**Article info**

Received: 17.08.2024  
Revised: 08.10.2024  
Accepted: 16.10.2024