



**ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ  
ПРИ ВАРИАНТЕ ПОДЭТАЖНОГО ОБРУШЕНИЯ С ТОРЦОВЫМ ВЫПУСКОМ РУДЫ**

**С. А. Неверов, А. А. Неверов, А. М. Никольский, А. И. Конурин, С. А. Щукин**

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

Приведен расчетный метод определения потерь и разубоживания руды для типичного варианта подэтажного обрушения с послойной отбойкой. Изложены результаты аналитического моделирования выпуска руды для наиболее представительной высоты подэтажа в практике подземной выемки месторождений.

*Система разработки, выпуск, высота подэтажа, методика, потери, разубоживание*

**GRAPHICAL-ANALYTIC METHOD FOR DETERMINING ORE EXTRACTION PARAMETERS  
IN SUBLEVEL CAVING WITH FRONT RELEASE OF ORE**

**S. A. Neverov, A. A. Neverov, A. M. Nikolsky, A. I. Konurin, and S. A. Shchukin**

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

A calculation method for determining the loss and dilution of ore for a typical variant of sublevel caving with layer-by-layer breaking is given. The results of analytical modeling of ore release for the most representative sublevel height in the practice of underground mining are presented.

*Mining system, release, sublevel height, methodology, losses, dilution*

**Система разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды.** Уровни потерь  $P$  и разубоживания  $R$  руды, как показывает практика отработки месторождений полезных ископаемых системами подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды [1–4], колеблются в диапазонах, соответственно, 7–20 и 12–33 %. При этом высота подэтажа  $h$  изменяется от 10 до 27 м, расстояние  $L$  между буро-доставочными выработками (ортами / штреками) — 12–20 м (рис. 1). Последние располагаются на подэтажах в шахматном порядке, образуя форму отбиваемого слоя руды, приближенную к ромбу высотой, равной  $2h$ , в нижней части представленного траншеей. Отбойку руды осуществляют слоями толщиной  $n$  от 2.7 до 4.5 м, выпуск ведут до предельного разубоживания в последней дозе  $R_{lim}$ , значение которого определяется возможностью возврата временных потерь от выпуска вышележащих запасов и величиной нормативной прибыли. Из опыта эксплуатации месторождений  $R_{lim}$  изменяется от 45 до 60 % (в расчетах принимается 50 %).

По условию максимизации показателей полноты и качества извлечения запасов из недр рациональные параметры конструктивных элементов системы разработки определяются фигурой выпуска. Известно, что фигура выпуска представляет собой эллипсоид вращения, ограниченный со стороны нетронутого рудного массива [4–6]. Параметры фигуры выпуска (ширина зоны потока раздробленной руды) зависят от множества факторов — гранулометрического состава отбитой рудной массы, коэффициента разрыхления, угла внутреннего трения, слеживаемости и, в конечном счете, от комплексного показателя сыпучести  $\rho$ , характеризующего в физическом

смысле радиус кривизны вершины эллипсоида вращения. В нашем случае, определение величин потерь и разубоживания руды, предполагается выполнить путем геометрических построений в соответствии с принятыми из практики ведения горных работ крайними ограничениями.

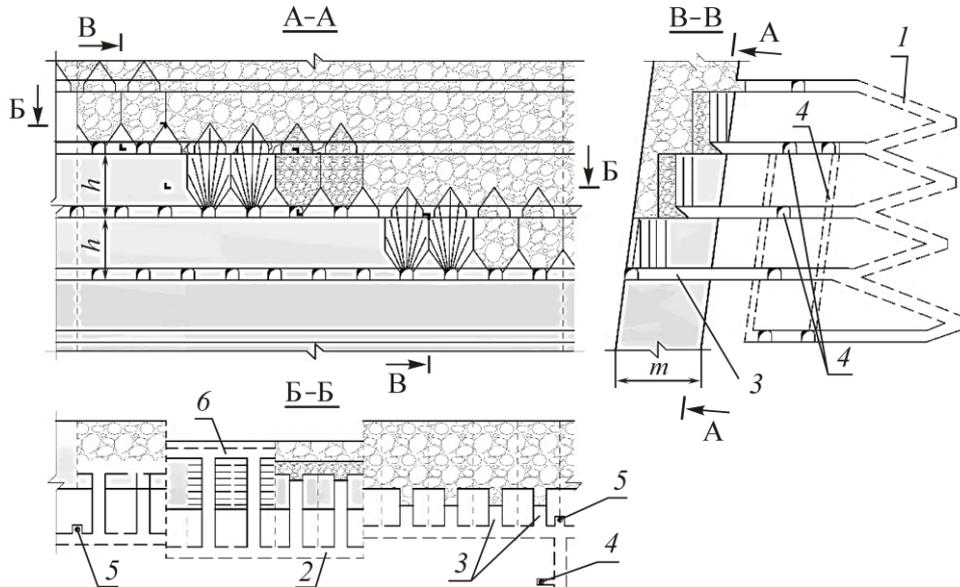


Рис. 1. Вариант системы разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды из слоев, нижняя часть которых представлена в виде формы траншеи: 1 — автомобильный уклон; 2 — доставочный полевой штрек; 3 — буро-доставочный орт; 4 — рудоспуск; 5 — вентиляционно-ходовой восстающий; 6 — отрезной штрек;  $h$  — высота подэтажа, м;  $m$  — мощность рудного тела, м

**Граничные условия определения показателей извлечения.** Принципиальная расчетная схема определения показателей извлечения и параметры формирования потерь руды на горизонте выпуска и доставки показана на рис. 2. Источниками потерь и разубоживания являются следующие места их образования: контур рудного тела из-за его криволинейности и несоответствия контуру отработки; разубоживание с торца выпускного слоя; примешивание пород почвы при углублении выработок горизонта доставки; разубоживание налегающими обрушенными породами верхнего подэтажа и потери руды в откосах между погрузочно-доставочными выработками.

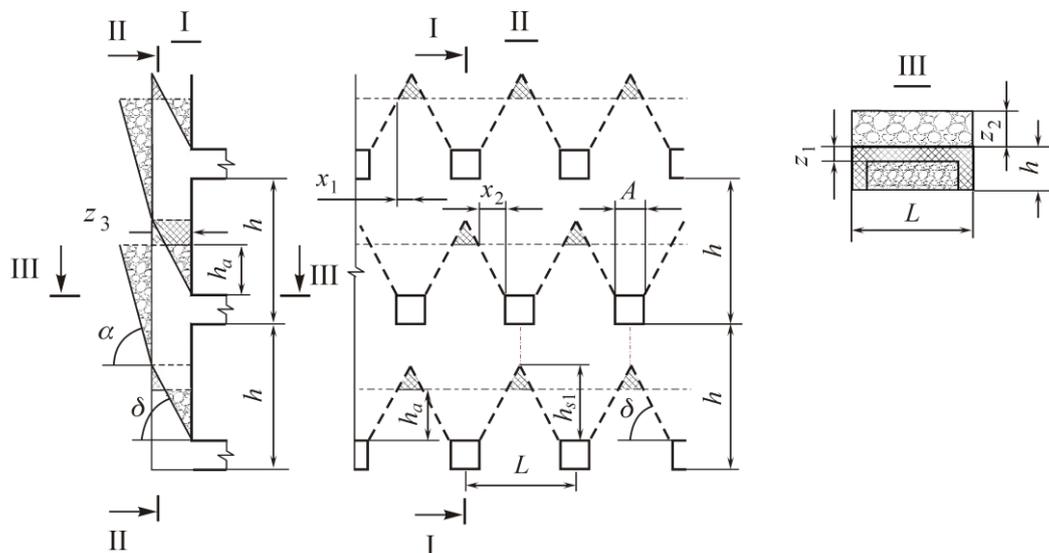


Рис. 2. Принципиальная расчетная схема к графоаналитическому определению показателей извлечения руды при варианте системы разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском

Аналитические расчеты графоаналитическим методом выполняются на объем отбитой секции при максимальном развитии фронта очистных работ, ограниченной в плане шириной выпускаемого слоя  $n$  и расстоянием между буро-доставочными выработками  $L$ , по высоте — несколькими подэтажами  $3h$  или двумя слоями. Основные допущения и ограничения, принятые в исследованиях в соответствии с практикой ведения горных работ [7–10]: угол выпуска (откоса отбитой руды)  $\alpha = 70–75^\circ$ ; угол откоса стенок ромбовидного слоя  $\delta = 55–65^\circ$ ; угол наклона поверхности воронки выпуска обрушенных пород —  $78–82^\circ$ .

На основе приведенных данных путем геометрической параметризации устанавливаются объемы выпущенной руды и породы, потери не отбитой и отбитой руды в днище горизонта доставки с учетом вероятного возврата временных потерь вышележащих слоев от их объема на уровне 25–40% [8, 11–13].

### Методика расчета.

1. Высота откоса между буро-доставочными ортами / штреками, м:

$$h_{sl} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \delta (L - A), \quad (1)$$

где  $\delta$  — угол откоса стенок ромбовидного слоя, град;  $L$  — расстояние между буро-доставочными ортами / штреками, м;  $A$  — ширина выработки выпуска (буро-доставочного орта / штрека), м.

2. Максимальная высота рудного откоса, м:

$$h_m = n \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где  $n$  — толщина (ширина) отбиваемого слоя, м

3. Геометрические параметры потерь в торце буро-доставочной выработки определяются в зависимости от величины заглубления выпуска  $L_g$  через высоту  $h_a$ , м (рис. 2):

$$h_a = h_m - L_g, \quad (3)$$

Условие  $L_g \geq h_m$  обуславливает отсутствие потерь руды в почве буро-доставочных выработок.

4. Высота выпускаемого слоя на подэтажах определяется в соответствии с принятыми граничными условиями (согласно принципиальной схеме рис. 2) из уравнения:

$$(z_2 L + z_3 (2x_2 + A)) - (2nx_1 + z_1 (2x_2 + A)) = 0, \quad (4)$$

где

$$x_1 = \frac{h_{sl} - h_a}{\operatorname{tg} \delta} \quad \text{м}, \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{1}{2} (L - A) - \frac{h_{sl} - h_a}{\operatorname{tg} \delta} \quad \text{м}, \quad (6)$$

$$z_1 = n - \frac{h_a}{\operatorname{tg} \delta} \quad \text{м}, \quad (7)$$

$$z_2 = \frac{h - h_{sl} - h_a}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{м}, \quad (8)$$

$$z_3 = \frac{h_a}{\operatorname{tg} \delta} \quad \text{м}. \quad (9)$$

5. Определение потерь.

5.1. Объем руды, обусловленный высотой откосами  $V_{rs}$  (объем фигуры выпуска) в пределах слоя, м<sup>3</sup>:

$$V_{rs} = \frac{h_{sl}^2 (4h_{sl} + 3A \operatorname{tg} \delta)}{6 \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (10)$$

5.2. Объем, выпускаемой породы  $V_r$  (объем фигуры выпуска высотой, соответствующей параметру заглупления днища или высоте останковки выпуска слоя) в пределах слоя, м<sup>3</sup>:

$$V_r = \frac{h_{sl}^2(4h_{sl} + 3A \operatorname{tg} \delta)}{6 - \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (11)$$

5.3. Объем выпуска руды  $V_o$  в пределах слоя, м<sup>3</sup>:

$$V_o = V_{rs} - V_r. \quad (12)$$

5.4. При выпуске горной массы следует учитывать различие в объемном весе руды и вмещающих пород в целике и в разрыхленном состоянии, оказывающих влияние на величину потерь.

При соблюдении условия

$$\frac{1}{2}(L - A) \operatorname{tg} \delta - L_g > 0 \Rightarrow V_{op} = \frac{(0.5(L - A) \operatorname{tg} \delta - L_g)^2}{2 \operatorname{tg} \delta} n \left( 1 - \frac{1}{K_p} \right) \text{ м}^3, \quad (13)$$

если (13) не выполняется,  $V_{op} = 0$ . Здесь  $V_{op}$  — потери руды в целике, м<sup>3</sup>;  $K_p$  — коэффициент разрыхления руды, д. ед.

5.5. Общий объем потерь для слоя составит, м:

$$VP = Ln(h_{sl} - h_a) - V_o + V_{op}. \quad (14)$$

6. Определение разубоживания. Объем пустых пород с торца выпускаемого слоя представлен фигурой, близкой к форме призмы. Исходя из этого, объем примешиваемых пустых пород  $VR$  может быть найден из выражения:

$$VR = \frac{0.5L(h + h_a - h_{sl})}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (15)$$

7. Определение потерь  $P$  и разубоживания  $R$  по системе разработки, д. ед.

$$P = \frac{VP}{nLh} (1 - 0.45), \quad (16)$$

$$R = \frac{VR}{nLh + VR - V_r}, \quad (17)$$

0.45 — прогнозный показатель (коэффициент) возврата части временных потерь от выпуска вышележащих подэтажей.

В практике отработки рудных месторождений системой подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды наибольшее распространение получила высота подэтажа  $h = 18.0 - 22.0$  м, что обусловлено возможностями производительного бурения, а также качеством и ценностью добываемых руд. Для верификации представленной методики определения показателей извлечения при  $h = 20$  м с учетом возврата части остатков руды вышележащего подэтажа в объеме 45 % от их количества установлены в зависимости от расстояний между буродоставочными выработками, следующие значения показателей извлечения:  $P = 11.7 - 14.8$  %,  $R = 17.9 - 22.4$  %. Коэффициент корреляции между расчетными данными и значениями потерь и разубоживания для аналогичных и близких параметров, имеющих место быть на действующих предприятиях [12 – 14] составляет не менее 90 %.

На этапе предпроектных исследований методика графоаналитического моделирования показателей полноты и качества извлечения запасов позволяет оперативно осуществлять сравнительные оценки вариантов систем подэтажного обрушения с различными параметрами.

## ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм графоаналитического определения показателей извлечения при освоении одного из вариантов системы разработки подэтажного обрушения с послыйным торцовым выпуском руды. Его отличает простота использования в инженерных расчетах при обосновании параметров геотехнологии. Представленная в методике расчетная схема определения потерь и разубоживания руды позволяет оперативно и гибко реагировать на изменение горно-геологических условий при эксплуатации месторождений посредством варьирования параметрами системы подэтажного обрушения и прогнозировать их оптимальные значения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Wolfson P. M.** Substantiation of Optimal Designs of Development Systems with Collapse and End Ore Discharge, *Mining Journal*, 2010, no. 7, pp. 55–56. (in Russian) [**Вольфсон П. М.** Обоснование оптимальных конструкций систем разработки с обрушением и торцовым выпуском руды // Горный журнал. — 2010. — № 7. — С. 55–56.]
2. **Yang Y. K., Ma Y. R., J, C. X., Kang T. H., and Guo X. Y.** Effect of mining thickness on overburden movement and underground pressure characteristics for extrathick coal seam by sublevel caving with high bottom cutting height, *Advances in Civil Engineering*, 2018, no. 6871820.
3. **Xia Zhiyuan, Tan Zhuoying, and Miao Yonggang.** Damage Evolution Mechanism of Extraction Structure During Mining Gently Dipped Orebody by Block Caving Method, *Geotechnical and geological engineering*, 2020, vol. 38, issue 4, pp. 3891–3902.
4. **Navarro Juan, Schunnesson Hakan, Ghosh Rajib et al.** Application of drill-monitoring for chargeability assessment in sublevel caving, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2019, vol. 119, pp. 180–192.
5. **Yu Kunpeng, Ren Fengyu, Chitombo Gideon et al.** Optimum Sublevel Height and Drift Spacing in Sublevel Cave Mining Based on Random Medium Theory, *Mining metallurgy & exploration*, 2020, vol. 37, issue 2, pp. 681–690.
6. **Savich I. N. and Zenko D. K.** Substantiation of the parameters of the development system with sublevel caving at the end ore production, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2004, no. 4, pp. 219–221. (in Russian) [**Савич И. Н., Зенько Д. К.** Обоснование параметров системы разработки с подэтажным обрушением при торцовом выпуске руды // ГИАБ. — 2004. — № 4. — С. 219–221.]
7. **Malofeev D. Ye.** Development of the theory of ore release under collapsed rocks, *Monograph*, Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publishing House, 2007, 171 pp. (in Russian) [**Малофеев Д. Е.** Развитие теории выпуска руды под обрушенными породами. Монография. — Красноярск: Изд-во СФУ, 2007. — 171 с.].
8. **Freidin A. M., Neverov S. A.** Modeling of the area-end technology of ore production under the collapsed rocks, *Journal of Mining Science*, 2005, no. 5, pp. 50–61. (in Russian) [**Фрейдin А. М., Неверов С. А.** Моделирование площадно-торцовой технологии выпуска руды под обрушенными породами // ФТПРПИ. — 2005. — № 5. — С. 50–61.]
9. **Neverov A. A., Neverov S. A., Konurin A. I., Nikolsky A. M., and Tishkov M. V.** Assessment of the sustainability of the workings of the excavation block at the bottom release of ore by self-propelled machinery, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 2019, vol. 19, issue 1.3, pp. 95–102.
10. **Kulikov V. V.** Ore release, Moscow, Nedra, 1980. (in Russian) [**Куликов В. В.** Выпуск руды. — М.: Недра, 1980.]

11. **Savich I. N. and Zenko D. K.** Substantiation of the parameters of the development system with sublevel caving at the end ore production, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2004, no. 4, pp. 219–221. (in Russian) [**Савич И. Н., Зенько Д. К.** Обоснование параметров системы разработки с подэтажным обрушением при торцевом выпуске руды // ГИАБ. — 2004. — № 4. — С. 219–221.]
12. **Zagirov N. Kh., Malofeev D. E., Gildeev A. M. and Shereshevich A. S.** Development system with caving with a rhomboidal shape of the bottom and linear-end ore discharge, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 13–16. (in Russian) [**Загиров Н. Х., Малофеев Д. Е., Гильдеев А. М., Шерешевич А. С.** Система разработки с обрушением с ромбоидальной формой забоя и линейно-торцовым выпуском руды // ГИАБ. — 2012. — № 2. — С. 13–16.]
13. **Neverov S. A. and Neverov A. A.** Magazine ore at sublevel caving, *Bulletin of Kuzbass State Technical University*, 2009, no. 10, pp. 21–26. (in Russian) [**Неверов С. А., Неверов А. А.** Магазинирование руды при подэтажном обрушении // Вестник КузГТУ. — 2009. — № 10. — С. 21–26.]
14. **Savich I. N. and Mustafin V. I.** Prospects for application and substantiation of design solutions for storey and sublevel end ore production, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. S1, pp. 419–429. (in Russian) [**Савич И. Н., Мустафин В. И.** Перспективы применения и обоснование проектных решений при этажном и подэтажном торцевом выпуске руды // ГИАБ. — 2015. — № S1. — С. 419–429.]