УДК 622.271.3

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

С.И.ФОМИН, *д-р техн.наук*, *профессор*, *fominsi@mail.ru.*
Е.И.БАЗАРОВА, *аспирант*, *bazarova_ei@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «*Горный*», *Санкт-Петербург*, *Россия*

В статье рассмотрен анализ чувствительности, связанный с выявлением зависимости: насколько сильно изменится эффективность или показатель карьера при заданном изменении одного из исходных параметров. Чем сильнее эта зависимость, тем выше риск реализации проекта. Показана цель анализа чувствительности – выявление важнейших факторов – критических переменных, способных наиболее серьезно повлиять на результаты реализации проекта, и проверка воздействия последовательных (одиночных) изменений факторов на эти результаты проекта. Анализ чувствительности по своему содержанию является однофакторным анализом. Производительность, как основной показатель работы горного предприятия, характеризует интенсивность отработки месторождения и определяется по горно-техническим и экономическим факторам. Доказано, что степень влияния различных параметров на производительность карьера характеризуется коэффициентом эластичности. Проведенный анализ чувствительности проектных показателей позволил установить степень влияния различных параметров на производительность карьера, отрабатывающего рудное крутопадающее месторождение, характеризуемую коэффициентом эластичности.

***Ключевые слова*:** проектирование, карьер, анализ чувствительности, коэффициент эластичности, параметры карьера, месторождение, проектный риск.

Цель анализа чувствительности – выявление важнейших факторов – критических переменных, способных наиболее серьезно повлиять на результаты реализации проекта, и проверка воздействия последовательных (одиночных) изменений факторов на эти результаты проекта. Анализ чувствительности по своему содержанию является однофакторным анализом. Базой при отборе факторов для количественного анализа являются результаты проведенного качественного анализа.

Анализ чувствительности связан с выявлением зависимости: насколько сильно изменится эффективность или показатель карьера при заданном изменении одного из исходных параметров. Чем сильнее эта зависимость, тем выше риск реализации проекта.

При относительном анализе чувствительности сравнивается относительное влияние исходных переменных (при их изменении на фиксированную величину, например на 10 %) на результирующие показатели проекта. Этот анализ позволяет определить наиболее существенные для проекта исходные переменные; их изменение должно контролироваться в первую очередь. В ходе анализа рассчитываются относительные величины – эластичности, отражающие, насколько сильно изменяется величина критериального проектного показателя при единичном изменении риск-переменной. Завершает анализ чувствительности ранжирование риск-переменных в зависимости от величин эластичностей: чем больше значение эластичности, тем сильнее эта зависимость и тем более рискованным для реализации проекта является данный фактор [2, 8-10].

Анализ чувствительности происходит при последовательно единичном изменении каждой переменной: только одна из переменных меняет свое значение (на 10 %), на основе этого пересчитывается новая величина используемого критерия или показателя. После этого оценивается процентное изменение критерия по отношению к базисному случаю и рассчитывается показатель чувствительности, представляющий собой отношение процентного

изменения критерия к изменению значения переменной на 1 % (так называемая эластичность изменения показателя). Таким же образом исчисляются показатели чувствительности по каждой из остальных переменных.

Затем, на основании выполненных расчетов, происходит экспертное ранжирование переменных по степени важности (например, очень высокая, средняя, невысокая) и экспертная оценка прогнозируемости (предсказуемости) значений переменных (например, высокая, средняя, низкая). Далее эксперт может построить матрицу чувствительности, позволяющую выделить наименее и наиболее рискованные для проекта переменные (показатели).

Один из наиболее важных показателей при проектировании карьеров – производительность карьера. Производительность, являющаяся одним из главных показателей работы карьера, характеризует интенсивность отработки месторождений и зависит от горно-технических и экономических факторов, от ситуации на рынках минерального сырья. Создание методологии проектирования и развитие теории определения производительности карьеров связано с прогрессом в развитии открытого способа разработки месторождений.

Производительность, как основной показатель работы горного предприятия, характеризует интенсивность отработки месторождения и определяется по горно-техническим и экономическим факторам. Производительность карьера по полезным ископаемым зависит от объемов запасов, включенных в конечный контур карьера, от времени отработки месторождения, конструктивных и эксплуатационных возможностей горно-транспортного оборудования, организации производства и т.д.

В общем случае производительность карьера по полезному ископаемому [3]

$$A_p = \frac{dG_p}{dT} = \frac{d}{dT}\int_0^T f_p(T)\,dT\ , \qquad (1)$$

где G_p – запасы полезного ископаемого в контурах карьера, т; T – продолжительность отработки месторождения открытым способом, лет; $f_p(T)$ – функция, характеризующая динамику изменения производительности карьера по полезному ископаемому во времени.

Для конкретного месторождения проблематично задать функции f_i (T), так как при этом необходимо задавать и учитывать множество сложным образом взаимосвязанных факторов. При этом методы определения производительности карьера, т.е. задания функции $f_i(T)$, объединены в две основные группы [1, 2]: по горно-техническим возможностям; по экономическим факторам. Каждый из перечисленных методов имеет свою область применения. В современной практике исследований и проектирования для повышения надежности принятия решений необходимо использование совместно нескольких методов определения производительности карьеров. Однако в вышеприведенных методах не учитываются факторы рынка рассматриваемого вида минерального сырья.

Зависимость ориентировочного значения производительности рудников при разработке крутопадающих залежей, с учетом потерь и разубоживания, имеет вид [1]

$$A_p = h_0 S \frac{1-\eta}{1-\rho}, \qquad (2)$$

где h_0 – скорость понижения добычных работ, м/год; S – горизонтальная площадь залежи полезного ископаемого (в геологических контурах в пределах карьера), м^2; η – коэффициент потерь полезного ископаемого; ρ – коэффициент объемного разубоживания.

Методы, основанные на анализе возможностей развития горных работ в глубину и в горизонтальном направлении, учитывают размеры залежей, запасы полезных ископаемых, мощность и состав покрывающих пород, способ вскрытия, систему разработки, направление развития горных работ, применяемое погрузочное и транспортное оборудование, т.е. почти все горно-геологические и технологические факторы [1-3].

На базе данных карьеров-аналогов или путем расчета определяют возможную скорость углубки карьера. Когда углубка ведется по рудному телу, скорость ее равна скорости понижения добычных работ. При этом горизонтальная площадь залежи полезного ископаемого (в геологических контурах в пределах карьера)

$$S = hL_{бл}(\mathrm{ctg}\varphi + \mathrm{ctg}\beta), \tag{3}$$

где h – высота уступа, м; $L_{бл}$ – длина экскаваторного блока, м; β – угол углубки, град.; φ – угол борта карьера, град.

Таким образом, зависимость для определения производительности по горно-техническим факторам [4, 11]

$$A_р = h_0 h L_{бл}(\mathrm{ctg}\varphi + \mathrm{ctg}\beta)\frac{1-\eta}{1-\rho}. \tag{4}$$

Возможно неявное влияние ширины рабочей площадки на угол углубки:

$$\beta = \mathrm{arctg}\frac{B + h\mathrm{ctg}\alpha}{h}, \tag{5}$$

где α – угол откоса уступа, град.

Производительность карьера зависит от ряда параметров и показателей. Исходные данные для анализа чувствительности показателей:

Параметр	h_0, м/год	h, м	$L_{бл}$, м	B, м	β, град.	φ, град.	η	ρ
Начальное значение	8	20	1800	45	80	15	0,032	0,079
Приращение	1	1	200	5	2	1	0,004	0,007

Требуется определить степень влияния каждого из факторов на производительность карьера A_p в течение рассматриваемого периода (7 лет) отработки карьера.

Для определения степени влияния этих факторов-аргументов на величину A_p оцениваем размах их значений, затем принимаем средние значения и по ним определяем среднее A_p.

Используя зависимость (4), заменяем значение одного аргумента, оставляя средние значения всех остальных:

$$A_p = 8 \cdot 20 \cdot 1800 \cdot (0{,}176 + 3{,}73) \cdot \frac{1-0{,}032}{1-0{,}079} = 1{,}181 \text{ млн м}^3\text{/год}.$$

В таблице представлены значения степени влияния параметров и показателей, в том числе и неявных, на производительность. По данным таблицы строим график зависимости $A_p = f(h_0, h, L_{бл}, \beta, \varphi, B)$. Чтобы выразить степень влияния различных факторов на производительность карьера в количественной форме, используется коэффициент эластичности, характеризующий степень реагирования функции на степень изменения аргумента [1, 12],

$$\varepsilon = \frac{100}{n-1}\sum_{1}^{n-1}\frac{\Delta y_i x_i}{\Delta x_i y_i}, \tag{6}$$

где n – число точек на кривой; y_i – значение функции в i-й точке; Δy_i – приращение функции в i-й точке; x_i – значение аргумента в i-й точке; Δx_i – приращение аргумента в i-й точке.

На рисунке представлен график зависимости относительного изменения производительности карьера от относительного отклонения параметров карьера.

По степени влияния на исследуемый параметр можно выделить три типа данных:

• низкая степень влияния (от 0 до 40 %) – угол углубки;

• средняя степень влияния (от 41 до 90 %) – ширина рабочей площадки;

• высокая степень влияния (свыше 91 %) – угол откоса борта карьера, высота уступа, длина экскаваторного блока.

Степень влияния параметров и показателей на производительность карьеров

Параметр	Единица измерения	Годы							ε, %
		1	2	3	4	5	6	7	
h_0 A_p	м/год млн м^3/год	5 0,738	6 0,886	7 1,03	8 1,181	9 1,329	10 1,476	11 1,624	+ 99,48
h A_p	м млн м^3/год	17 1,003	18 1,063	19 1,122	20 1,181	21 1,240	22 1,299	23 1,358	+100,0
$L_{бл}$ A_p	м млн м^3/год	1200 0,787	1400 0,919	1600 1,05	1800 1,181	2000 1,312	2200 1,443	2400 1,575	+100,0
B A_p	м млн м^3/год	30 1,757	35 1,833	40 1,908	45 1,181	50 2,059	55 2,135	60 2,211	+82,5
β A_p	град. млн м^3/год	74 1,214	76 1,203	78 1,192	80 1,181	82 1,171	84 1,16	86 1,149	–36,1
φ A_p	град. млн м^3/год	12 1,476	13 1,363	14 1,266	15 1,181	16 1,108	17 1,042	18 0,984	–93,47

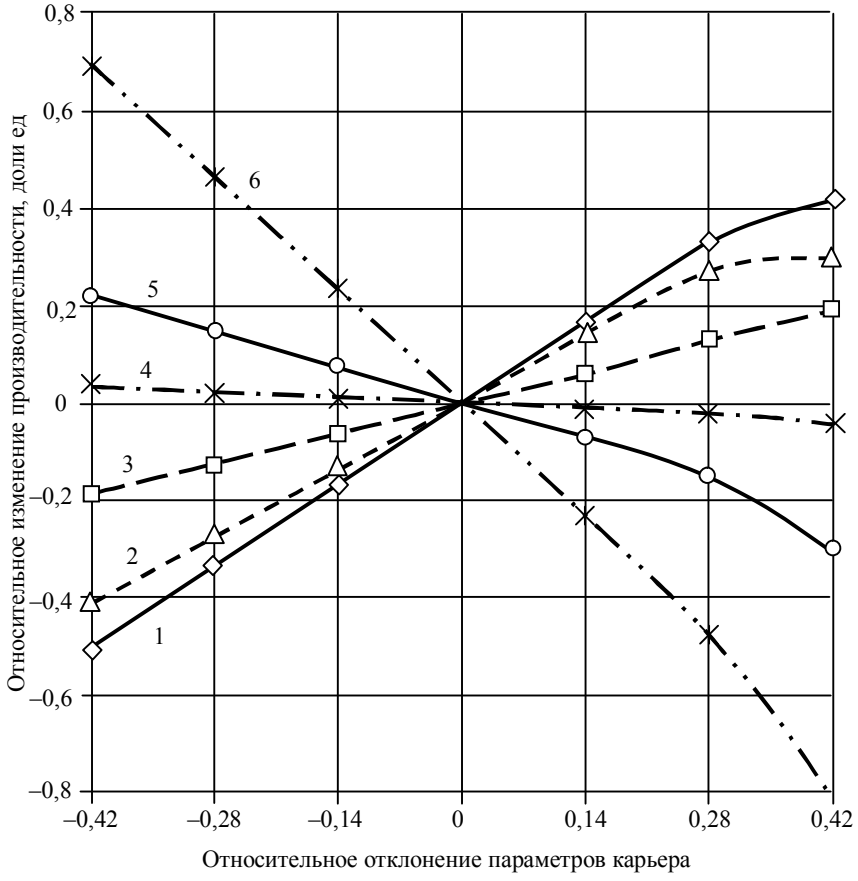


График зависимости относительного изменения производительности карьера от относительного отклонения параметров карьера

1 – линия углубки; 2 – длина экскаваторного блока; 3 – высота уступа; 4 – ширина рабочей площадки; 5 – угол откоса борта; 6 – угол углубки

Таким образом, степень влияния различных параметров на производительность карьера характеризуется коэффициентом эластичности. Проведенный анализ чувствительности проектных показателей позволил установить степень влияния различных параметров на производительность карьера, отрабатывающего рудное крутопадающее месторождение, характеризуемую коэффициентом эластичности [11, 12].

Для результатов реализации проекта карьера наибольшую значимость имеют скорость понижения добычных работ, высота уступа, длина экскаваторного блока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арсентьев А.И.* Производительность карьеров / Санкт-Петербургский горный институт. СПб, 2002. 85 с.

2. *Трубецкой К.Н.* Проектирование карьеров: Учеб. для вузов: В 2 т. / К.Н.Трубецкой, Г.Л.Краснянский, В.В.Хронин. М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. Т.1. 519 с.

3. *Фомин С.И.* Производительность карьеров и спрос на минеральное сырье. СПб: Изд-во «Тема», 1999. 169 с.

4. *Фомин С.И.* Оценка эффективности инвестирования открытой разработки сложноструктурных месторождений / С.И.Фомин, П.Б.Кава // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 5. С.312-316.

5. *Фомин С.И.* Оценка риска принятия решений при проектировании карьеров / С.И.Фомин, А.С.Семенов // Записки Горного института. 2007. Т.173. С.56-60.

6. *Фомин С.И.* Оценка эффективности принятия проектных решений / С.И.Фомин, Д.В.Пасынков, А.С.Семенов // Записки Горного института. 2009. Т.180. С.12-15.

7. *Hill J.H.* Geological and economical estimate of mining projects. London, 1993. 85 p.

8. *Hustrulid W.A.* Open Pit Mine Planning & Design / W.A.Hustrulid, M.E.Kuchta // CRC Press. 2006. 971 p.

9. *Hustrulid W.A.* Open Pit Mine: Planning & Design / W.A.Hustrulid, M.E.Kuchta. Rotterdam, Brookfield, VT: A.A.Balkema, 1998. 735 p.

10. *Schröder D.L.* Large surface miners – applications and cost calculations // Krupp Fördertechnik GmbH, Essen, Germany, February, 1999. P.1-6.

11. *Fomin S.I.* The Mining technology of a thick overburden layer covering a group of flat dipping coal seams // S.I.Fomin, D.A.Vedrova // Mine planning and equipment selection. Dresden, Germany, Springer. 2013. Vol.1. P.75-81.

12. *Fomin S.I.* Risk analysis method for opencast mining project // Annual. University of mining and geology St. Ivan Rilski. Sofia, 2012. Part 2. Vol.55. P.23-28.

REFERENCES

1. *Arsent'ev A.I.* Proizvoditel'nost' kar'erov (*Opencast mine output*). Sankt-Peterburgskij gornyj institut. St Petersburg, 2002, p.85.

2. *Trubeckoj K.N.*, *Krasnjanskij G.L.*, *Hronin V.V.* Proektirovanie kar'erov (*Open-cast mining design*). Moscow: Izd-vo Akademii gornyh nauk, 2001. Vol.1, p.519.

3. *Fomin S.I.* Proizvoditel'nost' kar'erov i spros na mineral'noe syr'e (*Opencast output and demand for mineral raw materials*). *St Petersburg*: Izd-vo «Tema», 1999, p.169.

4. *Fomin S.I*, *Kava P.B.* Ocenka jeffektivnosti investirovanija otkrytoj razrabotki slozhnostrukturnyh mestorozhdenij. (*Investment performance evaluation of open cast mining at complex structural deposits*). Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2011. N 5, p.312-316.

5. *Fomin S.I.*, *Semenov A.S.* Ocenka riska prinjatija reshenij pri proektirovanii kar'erov (*Risk evaluation of decision-making for open cast projects*). Zapiski Gornogo instituta. 2007. Vol.173, p.56-60.

6. *Fomin S.I.*, *Pasynkov D.V.*, *Semenov A.S.* Ocenka jeffektivnosti prinjatija proektnyh reshenij (*Project decision-making performance evaluation*). Zapiski Gornogo instituta. 2009. Vol.180, p.12-15.

7. *Hill J.H.* Geological and economical estimate of mining projects. London, 1993, p.85.

8. *Hustrulid W.A.*, *Kuchta M.E.* Open Pit Mine Planning & Design. CRC Press. 2006, p.971.

9. *Hustrulid W.A.*, *Kuchta M.E.* Open Pit Mine: Planning & Design. Rotterdam, Brookfield, VT: A.A.Balkema, 1998, p.735.

10. *Schröder D.L.* Large surface miners – applications and cost calculations. Krupp Fördertechnik GmbH, Essen, Germany, February, 1999, p.1-6.

11. *Fomin S.I.*, *Vedrova D.A.* The Mining technology of a thick overburden layer covering a group of flat dipping coal seams. Mine planning and equipment selection. Dresden, Germany, Springer. 2013. Vol.1, p.75-81.

12. *Fomin S.I.* Risk analysis method for opencast mining project. Annual. University of mining and geology St. Ivan Rilski. Sofia, 2012. Part 2. Vol.55, p.23-28.

OPENCAST MINE PARAMETERS SENSITIVITY ANALYSIS AT PRELIMINARY STUDY OF A MINING PROJECT

S.I.FOMIN, *Dr. of Engineering Sciences*, *Professor*, *fominsi@mail.ru*
E.I.BAZAROVA, *Postgraduate student*, *bazarova_ei@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*

The article describes sensitivity analysis, aimed at variables dependence detection: to what extent open cast mine ultimate efficiency or performance will be affected when one of the key input variables is changed. The stronger the dependence effect, the higher the project implementation risk. The sensitivity analysis objective is demonstrated – principle factors identification – critical variables, capable of having a serious influence on the project implementation results, and impact verification of progressive (single) factorial changes. Sensitivity analysis in its content is a single-factor analysis. Output, as a basic performance indicator of an open cast mine, characterizes mine development intensity and is determined by mining-engineering and economic factors. It is proved that the impact degree from various parameters on the open cast mine output is characterized by elasticity ratio. The project indicators sensitivity analysis, which was carried out, allowed to establish the impact degree that various parameters have on the open cast mine output, which takes place in a high-angle ore deposit, characterized by elasticity ratio.

Key words: designing, open cast mine, sensitivity analysis, elasticity ratio, mine parameters, deposit, project risk.