



## РАЗВИТИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ДОСТУПНОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

М. Ю. Харитонов, Н. А. Мацко

С использованием вероятностного подхода разработана модель оценки доступности месторождений с учетом влияния сроков от момента открытия месторождения до начала его освоения. Предложено трактовать этот срок как интегральный показатель, отражающий влияние различных качественных и трудноформализуемых факторов, таких как инвестиционный климат, институциональные условия, уровень конкуренции и др. Представлены результаты моделирования. Установлено влияние сроков до начала освоения на вероятность вовлечения в разработку месторождений меди для минерально-сырьевых баз России, США, Канады. Для этих стран эмпирически установлены зависимости скорости изменения доступности месторождений от сроков с открытия месторождения до начала его освоения. Для России и США зависимости отрицательные, для Канады скорость изменения доступности практически не зависит от указанных сроков. Приведены смоделированные траектории доступности для некоторых медьсодержащих месторождений России. Установлено, что через 15–30 лет при существующем соотношении осваиваемых и резервных объектов доступность месторождений будет падать.

**Ключевые слова:** минеральные ресурсы, доступность месторождений, вероятность освоения, время до начала освоения.

## PROBABILISTIC APPROACH TO ASSESSMENT OF AVAILABILITY OF MINERAL DEPOSITS

M. Yu. Kharitonova, N. A. Matsko

Probabilistic approach was used to develop the model appraising availability of mineral deposits considering the discovery to the development date period. The authors propose to consider this period as the integral index showing an impact of various qualitative and hardly formalizable factors, such as an investment climate, institutional conditions, level of competition etc. The modeling results are given. The period before development date was found to have an impact on the possibility to involve copper deposits in development in Russia, the U.S.A, and Canada. Dependence of a deposit availability change rate on the discovery to development date period was empirically stated for these countries. In Russia and the U.S.A. these dependences are negative, and in Canada the availability change rate barely depends on the discovery to development date period. The authors exemplify the above conclusions by availability tracks of several deposits in Russia. It was discovered that in 15–30 years availability of deposits will decrease at the present developed to reserve targets ratio.

**Keywords:** mineral resources, availability of deposits, development possibilities, period before development date.

В настоящее время существует потребность в оценке сырьевого потенциала и инвестиционной привлекательности отдельных объектов недропользования. Такие оценки необходимы при принятии управленческих решений в минерально-сырьевом секторе экономики и будут способствовать их максимально эффективному использованию.

На доступность ресурсов влияет множество факторов, которые постоянно меняются во времени. Желательно располагать инструментом, позволяющим производить быструю оценку доступности в любой момент времени при изменении параметров, влияющих на величину доступности ресурсов: прежде всего качество полезных ископаемых, объемы запасов, горнотехнические параметры разработки, наличие инфраструктуры и другие параметры, определяющие уровень затрат, необходимых для освоения данных ресурсов, и зависящие в том числе от стадии освоения месторождения. Кроме того, существуют и другие факторы, не связанные напрямую с эффективностью освоения конкретных запасов, характеризующие общие условия недропользования в регионе: например, особенности инвестиционного климата и институциональные условия в регионе, уровень конкуренции и др.

Технико-экономическая оценка (ТЭО) эффективности освоения месторождений с помощью традиционных показателей (NPV, PI, IRR и др.), в которых учет фактора времени осуществляется с помощью процедуры дисконтирования, — затратный и трудоемкий процесс. При этом не всегда удается учесть изменение во времени большого числа влияющих на эффективность факторов. С другой стороны, для проведения ТЭО проекта требуются маркетинговые исследования и прогнозирование цен.

Для прогнозирования цен имеются разнообразные подходы. Обычно используют метод трендов или теории волнового развития экономики: теорию длинных волн Н. Д. Кондратьева, инновационную теорию Й. Шумпетера, ценовую теорию У. Ростоу и др. Так, фундаментальная модель Хотеллинга предсказывает общее повышение цен в долгосрочной перспективе [4]. Согласно правилу Хотеллинга, траектория добычи должна быть тако-



ва, что результирующая цена ресурса растет в постоянном темпе, равном ставке процента. Некоторые авторы показывают, что цены на минеральное сырье в длительные интервалы времени имеют тенденцию к снижению [3, 8], другие – что изменение цены на металлы имеет U-образную форму в отличие от монотонного возрастания, предсказываемого простой моделью Хотеллинга [5, 6]. Имеются теоретические модели, которые устанавливают U-образную форму цены на ресурсы, и многочисленные доказательства этих гипотез [7].

Изменение доступности месторождений во времени было рассмотрено в работе [2]. В ней авторы оценивали динамику изменения доступности исходя из вероятных сроков, в течение которых цена на продукцию превысит требуемый для освоения уровень. Для прогноза цен использовался довольно надежный метод инерционности изменения цен на минеральное сырье.

Несмотря на большой объем исследований, достоверность методов прогнозирования цен на невозобновляемые ресурсы остается низкой.

Для экспресс-оценки доступности месторождений полезных ископаемых с учетом влияния трудноформализуемых факторов разработан подход, в котором количественной мерой доступности запасов полезных ископаемых является вероятность их вовлечения в разработку [1]. Для применения подхода не требуется прогнозирования цен на минеральное сырье в течение длительного времени. Он позволяет без трудоемких технико-экономических расчетов оценить доступность месторождений полезных ископаемых, расположенных в одном регионе.

Суть подхода заключается в разработке экономико-математических моделей, в которые входят следующие показатели: содержание полезных компонентов в рудах, их запасы, булева переменная, которая характеризует степень промышленного освоения месторождений, а также срок нахождения запасов на государственном балансе до начала его официального освоения. Введение в модель последнего параметра позволило учесть влияние многих упомянутых трудноформализуемых факторов.

### Теоретическая модель

Информация о запасах руд и среднем содержании полезных компонентов наносится на диаграмму «запас – содержание». Выделяются разрабатываемые и резервные на сегодняшний день месторождения. С использованием процедуры логит-регрессии определяется функция принадлежности объектов к классам разрабатываемых и неразрабатываемых, т.е. определяется переменная ( $P$ ) в зависимости от размеров запасов, содержания полезных компонентов в руде и срока от открытия месторождения до начала его освоения. Уравнение имеет вид

$$P = \frac{\exp(b_0 + b_1\alpha + b_2S + b_3T)}{1 + \exp(b_0 + b_1\alpha + b_2S + b_3T)}, \quad (1)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты модели;  $\alpha$  – содержание полезного компонента в руде, г/м<sup>3</sup>;  $S$  – запасы руды, тыс. м<sup>3</sup>;  $T$  – срок от открытия месторождения до начала его освоения, лет.

Для резервных месторождений здесь и ниже подразумевается срок от момента открытия месторождения до момента его оценки. Модель строится для конкретной региональной сырьевой базы. Коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_3$  определяются статистически, прогнозируется значение зависимой переменной  $P$ . Она определена по формуле (1), изменяется в интервале [0,1] и, по сути, представляет собой вероятность вовлечений месторождений в разработку. Уравнение (1) позволяет рассчитать эту вероятность с учетом срока до начала его разработки, который в данной задаче служит интегральным показателем, отражающим влияние различных неучтенных в явном виде факторов, в том числе качественных и трудноформализуемых (инвестиционный климат, институциональные условия, уровень конкуренции и др.).

Путем дифференцирования выражения (1) получаем скорость изменения вероятности освоения месторождения при росте срока от открытия месторождения до начала его освоения при прочих равных условиях:

$$P' = \frac{dP}{dt} = \frac{e^{b_0}\alpha^{b_1}S^{b_2}T^{b_3-1}}{(1 + e^{b_0}\alpha^{b_1}S^{b_2}T^{b_3})^2}. \quad (2)$$

Тем самым мы имитируем ситуацию, когда влияние не учтенных в модели факторов усиливается по сравнению с влиянием на доступность объемных показателей.

Модели оценки доступности (1) были опробованы на примере медьсодержащих месторождений России, золотосодержащих месторождений (рудных и россыпных) Красноярского края, меднопорфировых месторождений США, Канады, Чили. Модели хорошо описывают данные, статистически значимы и показывают адекватность в описании реальных процессов.

### Обсуждение результатов расчетов

В данной статье представлены результаты моделирования для медьсодержащих месторождений с открытым способом разработки. При построении моделей учитывалось, что большинство медьсодержащих месторождений России полиметаллические, а в некоторых меди немного (около 0,6 %), зато в больших количествах присутствуют попутные компоненты (золото, серебро и др.), цена которых значительно выше, чем меди. Поэтому доступность определялась для запасов, определяемых эквивалентным (пересчитанным с учетом всех полезных компонентов) содержанием меди. В таблице приведены коэффициенты логит-моделей.



Параметры логит-моделей

Сырьевая база	Коэффициент модели			
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Россия	-0,92	1,02	0,29	-1,56
США	2,57	3,06	0,61	-1,13
Канада	5,26	0,12	0,41	-2,12

Отрицательные коэффициенты  $b_3$  демонстрируют убывающую зависимость, т. е. с увеличением вклада неучтенных (в явном виде) в модели факторов доступность запасов снижается. Моделирование вероятности вовлечения запасов в разработку позволило получить эмпирические зависимости между доступностью использования ресурсов и сроками от открытия месторождений до начала их освоения для месторождений различных стран: Россия –  $P = 1,01 - 0,58\lg(T)$ , Канада –  $P = 1,64 - 0,78\lg(T)$  и США –  $P = 1,79 - 0,85\lg(T)$ .

Полученные зависимости для рассматриваемых сырьевых баз вполне логичны: до начала освоения более доступных месторождений проходит меньше времени, чем для менее доступных, которые вовлекаются в освоение, когда лучших объектов в резерве нет. Хотя на практике такая связь между сроками до начала освоения месторождения и доступностью наблюдается не всегда. В любой сырьевой базе не обязательно в первую очередь осваиваются высокоценные месторождения, а менее ценные находятся в резерве. Иногда вовлечение в разработку не самого лучшего с точки зрения эффективности разработки месторождения обуславливается социальными причинами, спросом на региональном уровне, возможностями и эффективностью использования альтернативных источников сырья. Но в целом полученные результаты показали, что для исследуемых сырьевых баз гипотеза о разработке месторождений в направлении от лучших – к худшим подтвердилась эмпирически.

С использованием уравнения (2) получены эмпирические зависимости (рис. 1) скорости изменения доступности от срока с момента открытия месторождения до начала его освоения ( $T$ ) для медьсодержащих месторождений России, США, Канады. Для России  $P' = 0,0731 - 0,0436\lg(T)$ .

Видна сильная зависимость (коэффициент корреляции 0,75) для сырьевой базы меди России: чем больше срок от открытия месторождения до начала его разработки, тем меньше скорость изменения его доступности. В соответствии с предложенной трактовкой срока до начала освоения месторождения это означает, что прирост вероятности вовлечения запасов в разработку снижается по мере усиления влияния трудноформализуемых факторов. Если в течение 15–20 лет после открытия месторождения решение о его освоении не принимается, то требуется либо создание новых технологий (что приведет к повышению значимости параметров содержание – объем), либо существенные вложения в инфраструктуру, создание благоприятных условий для привле-

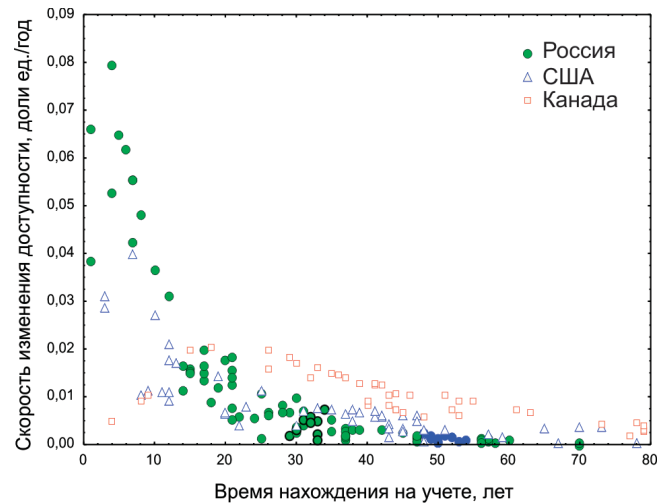


Рис. 1. Зависимость прироста доступности от срока от открытия месторождения до начала его освоения  
1 – Россия; 2 – США; 3 – Канада

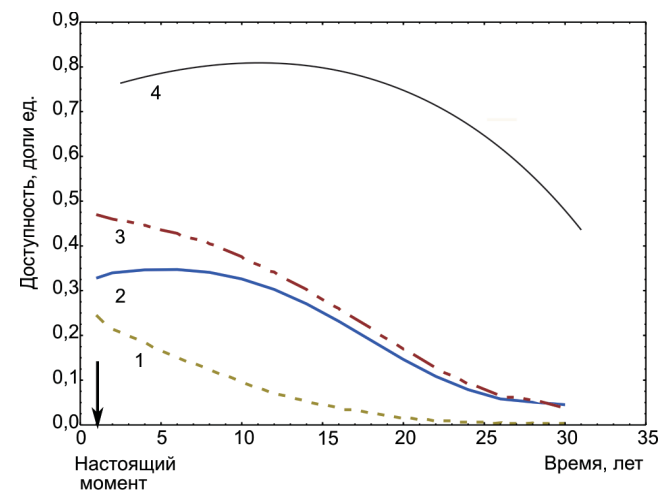


Рис. 2. Зависимость доступности запасов от сроков от обнаружения месторождения до разработки  
1 – Спутник; 2 – Бескесское; 3 – Тундровое; 4 – Уваряжчения инвестиций и др. Это снизит значимость трудноформализуемых факторов, учитываемых в модели сроками до начала освоения месторождения. Как видно из рис. 2, спустя 20–30 лет после открытия запасов доступность их практически не меняется. Для сырьевой базы США зависимость аналогична.

Сырьевая база Канады осваивается таким образом, что скорость изменения доступности практически не зависит от сроков с момента обнаружения месторождения до его освоения. Это связано с особенностями недропользования в Канаде. По оценкам экспертов, инвестиционный климат в горнорудной отрасли здесь достаточно благоприятный и обеспечивает долгосрочные гарантии недропользователям. Это отражено в модели.

Заметим, что на рис. 1 показана скорость изменения доступности, а не сама доступность. Доступность месторождений в зависимости от времени нахождения на балансе (неосвоенными) позволяет оценивать уравнение (1). Для некоторых медьсодержащих месторождений России она показана на рис. 2, из которого видно, что для одних



месторождений доступность сначала возрастает по мере роста срока до вовлечения месторождения в разработку, для других она сразу падает. Спустя 10–15 лет доступность всех минерально-сырьевых объектов рассматриваемой сырьевой базы снижается. Это объясняется тем, что на эффективность одних месторождений неблагоприятные факторы действуют сильнее, чем на эффективность других, что отражается в более коротких сроках, после которых доступность начинает падать.

### Выводы

Выполнены исследования, продолжающие комплекс работ по экспресс-оценке доступности месторождений полезных ископаемых. Для учета качественных и во многих случаях трудноформализуемых факторов, которые существенно влияют на принятие решений о начале освоения месторождений, предложено использовать следующий показатель: срок от открытия месторождения до его разработки.

Эта модель опробована на примере оценки доступности медьсодержащих месторождений России, США и Канады.

Установлены эмпирические зависимости доступности запасов меди от сроков с момента обнаружения месторождений до их разработки. Для всех исследуемых сырьевых баз зависимости убывающие, т. е. с увеличением (на фоне учитываемых при моделировании в явном виде параметров) значимости таких факторов, как, например, инвестиционный климат, институциональные условия, уровень конкуренции и др., доступность запасов снижается.

Моделирование прироста доступности медьсодержащих месторождений показало, что его зависимость от сроков с момента открытия месторождения до его разработки в России и США отрицательная, а в Канаде практически нулевая. Это связано с различиями как в структурах сырьевых баз, так и в условиях недропользования и социально-экономических процессах этих стран.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мацко, Н. А.** Мезоэкономический подход к оценке доступности сырьевой базы территории [Текст] / Н. А. Мацко, М. Ю. Харитонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. : МГГУ, 2005. – № 10. – С. 142–148.

2. **Пешков, А. А.** Доступность минерально-сырьевых ресурсов [Текст] / А. А. Пешков, Н. А. Мацко. – М. : Наука, 2004. – 280 с.

3. **Barnett, H. J.** Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability [Text] / H. J. Barnett, Ch. Morse. – Baltimore : Johns Hopkins University Press, 1963. – 288 p.

4. **Hotelling, H.** The Economics of Exhaustible Resources [Text] / H. Hotelling // Journal of Political Economy. – 1931. – Vol. 39. – P. 64–92.

5. **Pindyck, R. S.** Econometric models and economic forecasts [Text] / R. S. Pindyck, D. L. Rubinfeld. – N. Y. : McGraw-Hill, 1997. – 631 p.

6. **Pindyck, R. S.** The optimal exploration and production of nonrenewable resources [Text] / R. S. Pindyck // Journal of Political Economy. – 1978. – Vol. 86, N 5. – P. 841–861

7. **Slade, M.** Hotelling confronts CAPM: A test of the theory of exhaustible resources [Text] / M. Slade, H. Thille // Canadian Journal of Economics. – 1997. – Vol. 30(3). – P. 685–708.

8. **Sullivan, D. E.** 20<sup>th</sup> century U.S. mineral prices decline in constant dollars [Text] / D. E. Sullivan, J. L. Sznopek, L. A. Wagner // U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey open file report 00-389. – 1989. – 8 p.

### REFERENCES

1. Matsko N.A., Kharitonova M.Yu. [A mesoeconomic approach to appraisal of the mineral resource base availability]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' – Mining Research Bulletin*, Moscow, MGGU, 2005, no. 10, pp. 142–148. (In Russ.).

2. Peshkov A.A., Matsko N.A. *Dostupnost' mineral'no-syr'evykh resursov* [Availability of mineral resources]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 280 p. (In Russ.).

3. Barnett H.J. Morse Chandler: Scarcity and Growth. *The Economics of Natural Resource Availability*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1963. 288 p.

4. Hotelling H. The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 1931, vol. 39, pp. 64–92.

5. Pindyck R.S., Rubinfeld D.L. Econometric models and economic forecasts, 4<sup>th</sup> ed. N.Y., McGraw-Hill, 1997, 631 p.

6. Pindyck R.S. The optimal exploration and production of nonrenewable resources. *Journal of Political Economy*, 1978, no. 5, vol. 86, pp. 841–861.

7. Slade M., Thille H. Hotelling confronts CAPM: A test of the theory of exhaustible resources. *Canadian Journal of Economics*, 1997, no. 30(3), pp. 685–708.

8. Sullivan D.E., Sznopek J.L., Wagner L.A. 20<sup>th</sup> century U.S. mineral prices decline in constant dollars. *U. S. Department of the Interior. U. S. Geological Survey open file report 00-389*. 1989, 8 p.

© М. Ю. Харитонов, Н. А. Мацко, 2015

**ХАРИТОНОВА Маргарита Юрьевна**, Институт химии и химической технологии СО РАН (ИХХТ СО РАН), Красноярск, науч. сотр., к. т. н. E-mail: margaret.ok@yandex.ru

**МАЦКО Наталья Аркадьевна**, Институт системного анализа РАН (ИСА РАН), Москва, вед. науч. сотр., д. т. н. E-mail: matsko@inbox.ru

**KHARITONOVA Margarita**, PhD, Chemistry and Engineering Chemistry Institute SB RAS (ICCT SB RAS), Krasnoyarsk, Russia. E-mail: margaret.ok@yandex.ru

**MATSKO Natalia**, DSc, System Analysis Institute RAS (SAI RAS), Moscow, Russia. E-mail: matsko@inbox.ru