

УДК 338.012:553.3.072

**М.Ю. ХАРИТОНОВА**, канд. техн. наук, научный сотрудник Института химии и химической технологии СО Российской академии наук, г. Красноярск, Российская Федерация

**Н.А. МАЦКО**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института системного анализа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРУДНО ФОРМАЛИЗУЕМЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ВОВЛЕЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В РАЗРАБОТКУ

С использованием вероятностного подхода разработана модель оценки доступности месторождений с учетом влияния сроков от момента открытия месторождения до начала его освоения. Введение в модель этого параметра позволило учесть влияние многих трудно формализуемых факторов. Исследовано влияние сроков до начала освоения месторождений на вероятность их вовлечения в разработку для минерально-сырьевых баз меди России, США, Канады. Для этих стран эмпирически установлены зависимости прироста доступности месторождений от сроков с момента открытия месторождения до начала его освоения.

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

Как известно, на конференции в Рио-де-Жанейро устойчивое развитие провозглашено "Повесткой дня на XXI век". Важная роль при этом отводится изъятию из окружающей среды природных ресурсов. В этой связи особое место отводится минерально-сырьевым ресурсам, эксплуатация которых приводит к масштабным воздействиям на окружающую среду.

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 влияют 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. Это, прежде всего, качество полезных ископаемых, объемы запасов, горнотехнические параметры разработки, наличие инфраструктуры и другие параметры, определяющие уровень инвестиций, необходимых для

освоения данных ресурсов, и зависящие, в том числе, от стадии освоения месторождения. Кроме того, существуют другие влияющие 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 другие.

Технико-экономическая оценка 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 учесть изменение во времени большого числа влияющих на эффективность факторов не всегда удается. С другой стороны, для проведения технико-экономической оценки 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 другие. Так, фундаментальная модель Хот-

телинга предсказывает общее повышение цен в долгосрочной перспективе [1]. Согласно правилу Хотеллинга, траектория добычи должна быть такова, что результирующая цена ресурса растет постоянным темпом, равным ставке процента. Некоторые авторы показывают, что цены на минеральное сырье на длительных интервалах времени имеют тенденцию к снижению [2, 3]. Другие отмечают, что на длительных промежутках времени изменение цены на металлы имеет U-образную форму в отличие от монотонного возрастания, предсказываемого простой моделью Хотеллинга [4, 5]. Имеется целый ряд теоретических моделей, которые устанавливают U-образную форму цены на ресурсы и многочисленные доказательства этих гипотез [6].

Изменение доступности месторождений во времени было рассмотрено в [7], где динамику изменения доступности авторы оценивали 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 наличие обширных исследований, достоверность методов прогнозиро-

вания цен на невозобновляемые ресурсы остается низкой.

Для экспресс-оценки доступности месторождений полезных ископаемых с учетом влияния трудно формализуемых факторов разработан подход, в котором количественной мерой доступности запасов полезных ископаемых является вероятность их вовлечения в разработку [8]. Для применения подхода не требуется прогнозирование цен на минеральное сырье в течение длительного промежутка времени, он позволяет без проведения трудоемких технико-экономических расчетов оценить доступность месторождений полезных ископаемых, расположенных в одном регионе.

Суть подхода заключается в разработке экономико-математических моделей, в которые входят показатели – содержание полезных компонентов в рудах, их запасы, булева переменная, которая характеризует степень промышленного освоения месторождений, а также параметр – срок нахождения запасов на государственном балансе до начала его официального освоения.

Введение в модель такого параметра, как срок от момента открытия месторождения до его вовлечения в разработку позволила учесть влияние многих упомянутых выше трудно формализуемых 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, то есть 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.

Модель строится для конкретной региональной сырьевой базы. Коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_3$  определяются статистически и прогнозируется значение зависимой переменной  $P$ . Переменная  $P$ , определенная по формуле (1), изменяется на интервале [0,1] и по сути представляет собой вероятность вовлечений месторождений в разработку. Уравнение (1) позволяет рассчитать вероятность вовлечения месторождения в эксплуатацию с учетом срока до начала его разработки, который в данной задаче служит интегральным показателем, отражающим влияние различных неучтенных факторов, в том числе качественных и трудно формализуемых, таких как 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:

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

Тем самым мы имитируем ситуацию, когда влияние неучтенных в модели факторов

усиливается по сравнению с влиянием на доступность объемных показателей.

Модели оценки доступности (1) были опробованы на примере сырьевых баз медьсодержащих месторождений России, золотосодержащих месторождений (рудных и россыпных) Красноярского края, меднопорфириновых месторождений мира, 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 учитывался тот факт, что медьсодержащие месторождения России в большинстве своем полиметаллические, а в некоторых меди немного (около 0,6%), зато в больших количествах присутствуют попутные компоненты золото, серебро и др., цена которых значительно превышает цену меди. Поэтому доступность определялась для запасов, определяемых эквивалентным содержанием меди, т.е. содержанием меди, пересчитанным с учетом ценности всех полезных компонентов. В таблице 1 приведены коэффициенты логит-моделей.

Таблица 1. Параметры логит-моделей

Сырьевая база	Коэффициенты модели			
	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>
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<sub>3</sub> демонстрируют убывающую зависимость, то есть с увеличением вклада неучтенных 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:

$$P = 1,01 - 0,58 \text{ Lg}(T) - \text{Россия},$$

$$P = 1,64 - 0,78 \text{ Lg}(T) - \text{Канада},$$

$$P = 1,79 - 0,85 \text{ Lg}(T) - \text{США}.$$

Полученные зависимости между доступностью и сроками до начала освоения месторождений 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. То есть в любой сырьевой базе не обязательно в первую очередь осваиваются высокоценные месторождения, а низко ценные – находятся в резерве. Иногда вовлечение в разработку не самого лучшего с точки зрения эффективности разработки месторождения обусловливается социальными проблемами, спросом на региональном уровне, возможностями и эффективностью использования альтернативных источников сырья. Но в целом полученные результаты для исследуемых сырьевых баз подтвердили гипотезу о разработке месторождений в направлении от лучших к худшим.

С использованием уравнения (2) получены эмпирические зависимости (рисунок 1) скорости изменения доступности от срока с момента открытия месторождения до начала его освоения (T) для медьсодержащих месторождений России, США, Канады.

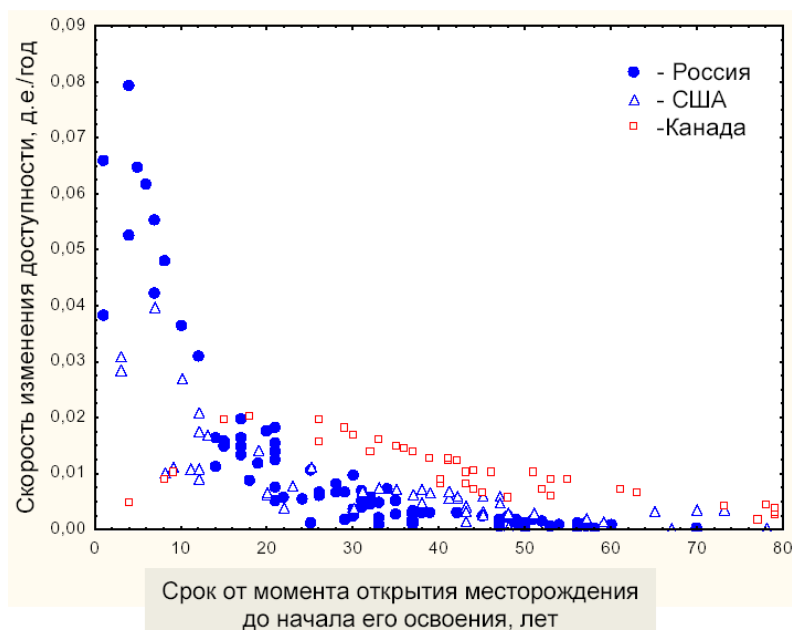


Рисунок 1 - Зависимость прироста доступности от срока с момента открытия месторождения до начала его освоения

Для России уравнение имеет вид:

$$P' = 0,0731 - 0,0436 * \lg(T).$$

Видна сильная зависимость (коэффициент корреляции 0,75) для сырьевой базы меди России – чем больше срок от открытия месторождения до начала его освоения, тем меньше скорость изменения его доступности. В соответствии с предложенной выше трактовкой срока до начала освоения месторождения это означает, что прирост вероятности вовлечения запасов в разработку снижается по мере роста значимости не учитываемых в модели факторов. Если в течение 15-20 лет после открытия месторождения решение о его освоении не принимается, значит либо необходимо создание новых технологий (что приведет к повышению значимости параметров содержание-объем), либо существенные вложения в инфраструктуру, создание благоприятных условий для привлечения инвестиций и др. (что снизит значимость трудно формализуемых факторов, учитываемых в модели сроками до начала освоения месторождения). Как видно из рисунка 2, спустя 20-30 лет после открытия запасов, доступность их практически не меняется. Аналогичная зависимость для сырьевой базы США.

Интересно, что 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 нашло отражение в модели.

Заметим, на рисунке 1 показана скорость изменения доступности, а не доступность. Доступность месторождений в зависимости от сроков с момента обнаружения месторождения до его разработки позволяет оценивать уравнение (1). Для некоторых медьсодержащих месторождений России она показана на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, 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 находит отражение в более коротких сроках, после которых доступность начинает падать.

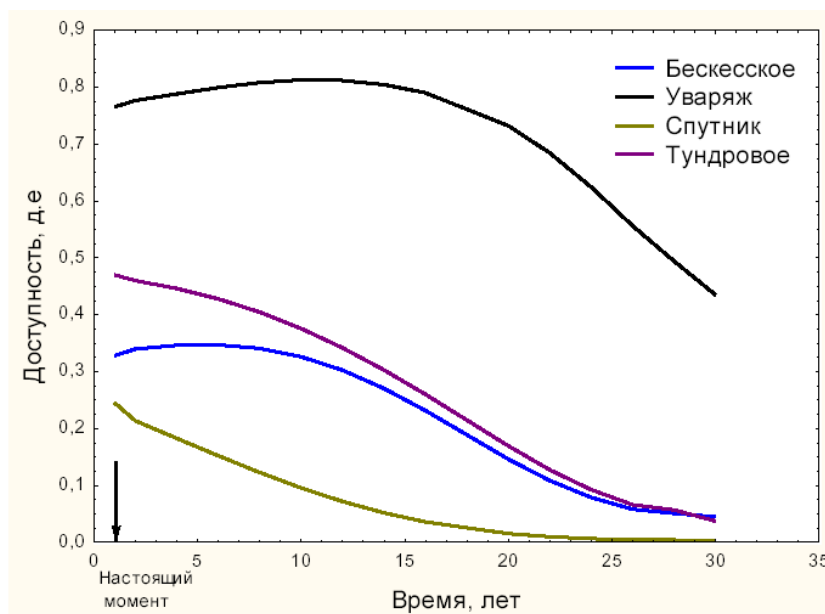


Рисунок 2 - Зависимость доступности запасов от сроков с момента обнаружения месторождения до его разработки

### Выводы

Обеспеченность территории природными ресурсами существенно влияет на сложность достижения целей устойчивого ее развития. Особую роль при этом играет минерально-сырьевой комплекс.

Выполненные исследования продолжают комплекс работ по экспресс-оценке доступности месторождений полезных ископаемых. Для учета качественных и во многих случаях трудно формализуемых факторов, которые оказывают существенное влияние на принятие решений о начале освоения месторождений, предложено использовать показатель – срок с момента обнаружения месторождения до его разработки.

Разработанная 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, то есть 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 он отрицательно зависит от сроков с момента открытия месторождения до его разработки для России и США, для Канады практически не зависит. Это связано, как с различиями в структурах сырьевых баз, так и в условиях недропользования и социально-экономических процессах этих стран.

### Перечень ссылок

1. Hotelling H.: The Economics of Exhaustible Resources. Journal of Political Economy, Vol. 39, 1931, pp. 64-92.
2. Barnett, Harold J., Morse Chandler: Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1963.
3. Sullivan D.E., Sznopce 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 pp.
4. Pindyck R.S., Rubinfeld D.L. Econometric models and economic forecasts, 4rd ed. N.Y. : McGraw-Hill, 1997. — 631 p.

5. Pindyck R. The optimal exploration and production of nonrenewable resources // Journal of Political Economy. 1978. № 5, vol.86, P. 841-861.
6. Slade, Margaret E., and Henry Thille (1997) 'Hotelling confronts CAPM: A test of the theory of exhaustible resources.' Canadian Journal of Economics 30(3), 685-708, Aug., 1997.
7. Пешков А.А., Мацко Н.А. Доступность минерально-сырьевых ресурсов. М.: Наука, 2004.- 280 с.
8. Kharitonova M.J., Mikhaylov A.G., Matsko N.A. Influence of the time factor on the availability of deposits of nonferrous metals. Resources Policy 38 (2013), pp. 490-495.

*Стаття надійшла до редколегії 23.10.2014 р. російською мовою  
Стаття рекомендована членом редколегії чл.-кор. НАН України А.Г. Шапарем*

**М.Ю. ХАРИТОНОВА\*, Н.А. МАЦКО\*\***

*\*Інститут хімії і хімічної технології СВ РАН, м. Красноярськ, Російська Федерація*

*\*\*Інститут системного аналізу РАН, м. Москва, Російська Федерація*

### **СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ФАКТОРІВ, ЩО ВАЖКО ФОРМАЛІЗУЮТЬСЯ, НА ЙМОВІРНІСТЬ ЗАЛУЧЕННЯ РОДОВИЩ У РОЗРОБКУ**

З використанням ймовірнісного підходу розроблена модель оцінки доступності родовищ із урахуванням впливу строків від моменту відкриття родовища до початку його освоєння. Введення в модель цього параметра дозволило врахувати вплив багатьох факторів, які важко формалізуються. Досліджено вплив строків до початку освоєння родовищ на ймовірність їхнього залучення в розробку для мінерально-сировинних баз міді Росії, США, Канади. Для цих країн емпірично встановлені залежності приросту доступності родовищ від строків з моменту відкриття родовища до початку його освоєння.

**Ключові слова:** мінеральні ресурси, доступність родовищ, імовірність освоєння, час до початку освоєння.

**M. KHARITONOVA\*, N. MATSKO\*\***

*\*Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ICCT SB RAS), Krasnoyarsk, Russia*

*\*\*Institute Of Systems Analysis of Russian Academy of Sciences (ISA RAS), Moscow, Russia*

### **STATISTICAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE DIFFICULT TO FORMALIZE FACTORS ON THE PROBABILITY OF DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS**

Using a probabilistic approach, a model is developed to evaluate the availability of mineral deposits taking into account the influence of time period from the moment of deposits` discovery to the start of its development. Introduction to model this parameter has allowed to take into account the influence of many difficult to formalize factors. The influence of the time period on the likelihood of mineral deposit development was estimated for copper mineral bases of Russia, USA and Canada. For these countries empirical equations were obtained for availability increment depending on the time period from the moment of deposits` discovery to the start of its development.

**Keywords:** mineral resources, the availability of deposits, probability involvement in the development of, the time factor.