

## Два подхода к прогнозированию минералого-технологических свойств руды: *in situ* versus в режиме реального времени

Калашников А.О.<sup>1</sup>, Коноплева Н.Г.<sup>2</sup>, **Иванюк Г.Ю.**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, kalashnikov@geoksc.apatity.ru

<sup>2</sup> Центр наноматериаловедения ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, n.konopleva@ksc.ru

**Аннотация.** Представлено два подхода к предсказанию минералого-технологических свойств руд месторождений, проведено их сравнение. Ядром обоих подходов является построение регрессионных моделей, связывающих химический состав и минералого-технологические свойства руд. Оба метода опробованы на рудах Ковдорского бадделейт-апатит-магнетитового месторождения (Мурманская область).

**Ключевые слова:** геометаллургическое моделирование, оптимизация переработки руды, умное горнорудное предприятие.

## Two approaches to prediction of mineralogical and technological properties of ores: *in situ* versus real-time mode

Kalashnikov A.O.<sup>1</sup>, Konopleva N.G.<sup>2</sup>, **Ivanyuk G.Yu.**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Geological Institute KSC RAS, Apatity, kalashnikov@geoksc.apatity.ru

<sup>2</sup> Nanomaterials Research Centre KSC RAS, Apatity, n.konopleva@ksc.ru

**Abstract.** Two approaches to prediction of mineralogical and technological properties of ores are presented and compared. Development of set of regression models converting chemical composition to mineral and technological properties of ore is a core of the both approaches. Both methods were tested on the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit, the Murmansk Region.

**Key words:** geometallurgical modelling, mineral processing optimization, intelligent mining.

Оптимизация технологии переработки комплексных руд и повышение качества и разнообразия производимых концентратов напрямую связаны с точностью прогнозирования свойств минерального вещества, поступающего на перерабатывающее предприятие, таких как: содержание рудных минералов и вредных минералов-примесей, их химический состав, средний размер зерен, взаимоотношения с другими минералами и т.п. В настоящее время параллельно развиваются два подхода к прогнозированию качества руды. Первый восходит к традиционному подсчету запасов месторождения – это моделирование распределения в пространстве (*in situ*) требуемых параметров, в чем-то аналогичное построению рудных тел по содержанию рудных компонентов (т.е. по химическому составу пород). Второй подход состоит в определении требуемых параметров непосредственно в транспортируемой рудной массе – во взорванном выемочном блоке, в кузове самосвала, в рудодприёмнике, т.е. в технологическом рудном потоке в режиме реального времени (Boogaart van den Tolosana-Delgado, 2018; Lishchuk et al., 2020). Этот подход связан с бурным развитием вычислительной техники и аналитических методов с конца 20-го века, поскольку основан на вычислении нужных параметров по косвенным данным, например, по результатам экспрессного рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) пород. Нашим коллективом развиваются оба подхода. В таблице 1 сравниваются общие схемы реализации этих двух подходов.

Как видно, оба подхода методологически аналогичны. Ядром обоих подходов является п. 3 – создание набора регрессионных моделей, связывающих химический состав пород (результаты разведочного опробования) и минералого-технологические параметры, требуемые технологией обогащения. Главное отличие подходов заключается в различии объемов руды, для которых вычисляются технологические параметры: в первом – для блоков блочной модели месторождения, во втором – для транспортируемых в текущий момент «элементарных объемов» руды. Построение регрессионной модели с приемлемой точностью и оптимальным набором независимых признаков – это самостоятельная исследовательская задача для каждого рудного объекта. По нашим предва-

рительным данным, такая задача может быть решена для большинства эндогенных месторождений (Коноплева и др., 2013; Калашников, Иванюк, 2019а; Коноплева, Калашников, Иванюк, 2019), поскольку для них характерна высокая взаимосвязанность всех структурно-вещественных параметров (Горяинов, Иванюк, 2001; Иванюк и др., 2009). Тем не менее, возможно, что не для каждого объекта решение существует.

Таблица 1. Сравнение схем реализации двух подходов к прогнозированию минералого-технологических свойств руды: *in situ* и «в режиме реального времени».

Table 1. A comparison of flowsheet of the two approaches to prediction of mineralogical and technological properties of ores: *in situ* and real-time mode.

№	In situ	Режим реального времени
1	Разведочное опробование, определение химического состава пород	То же
2	Эталонное опробование с прецизионным определением минералого-технологических свойств пород	То же
3	Создание набора регрессионных моделей, связывающих (1) и (2)	То же
4	Применение модели (3) к точкам опробования (1)	–
5	Интерполяция (4) в блочную модель месторождения	–
6	Задание граничных минералого-технологических параметров в соответствии с требованиями технологии обогащения	То же
7	Определение технологических типов руд в блочной модели (5) по граничным параметрам (6)	Определение технологического типа руд по регрессионной модели (3) в режиме реального времени в элементарном объеме руды (например, в кузове самосвала)
8	Визуализация в виде 3D модели технологических типов руд	Автоматическая выдача решения о технологическом пути элементарного объема руды (7) администратору рудного потока

Пример реализации первого подхода – построение минералого-технологической (геометаллургической) модели Ковдорского бадделеит-апатит-магнетитового месторождения (все технологические ограничения условны) – показан на рисунке 1. В рамках второго подхода нами разработана принципиальная схема реализации процесса, а также создан набор регрессионных моделей для прогнозирования минералого-технологических свойств руды на примере Ковдорского месторождения (Калашников, Иванюк, 2019 а).

Эти два подхода не являются взаимоисключающими, и, по-видимому, наилучший результат будет достигаться при их совместном использовании. Предсказание свойств руды *in situ* позволяет оптимизировать разработку месторождения на стадии планирования на временных интервалах месяц–год и более. Выдача рекомендаций о технологическом пути руды в режиме реального времени направлена на краткосрочное планирование и повышение точности оперативного управления рудопотоком. В целом, оба этих подхода вписываются в концепцию интеллектуального горнорудного предприятия (Li, Zhan, 2018) и могут стать точкой интеграции геолого-минералогического знания, горнообогатительной технологии и экономического анализа в рамках работы горнорудного предприятия.

Исследования проводились в рамках научной темы ГИ КНЦ РАН 0226-2019-0051, а также были частично поддержаны Российским Научным Фондом, грант 16-17-10173.

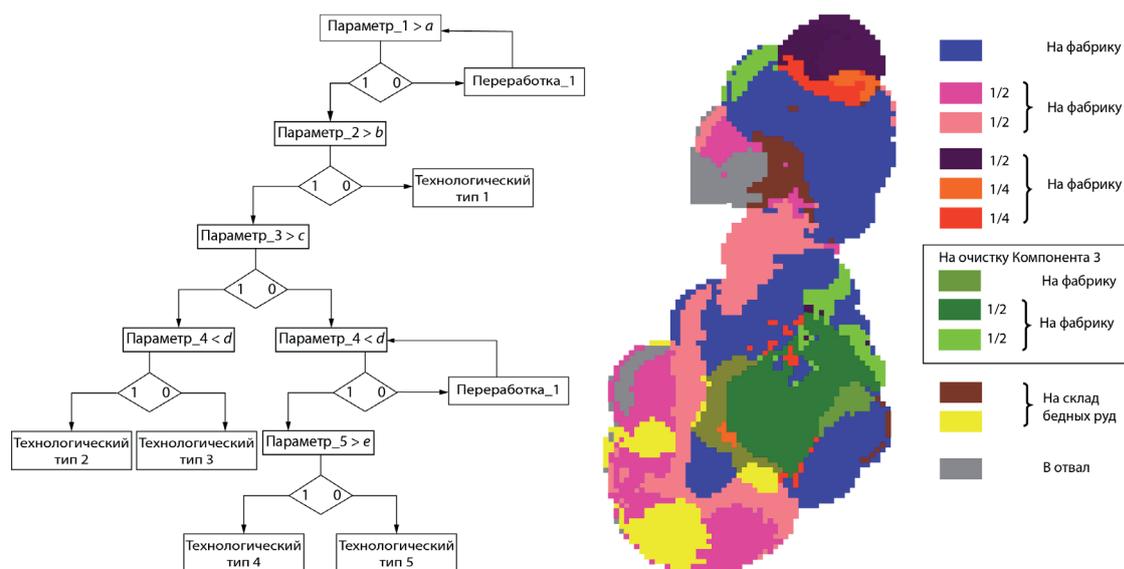


Рис. 1. Прогнозирование минералого-технологических свойств руды in situ Ковдорского бадделеит-апатит-магнетитового месторождения: условная блок-схема переработки руды (слева) и геометаллургическая модель (справа) (по (Иванюк и др., 2017; Калашников, Иванюк, 2019 б)).

Fig. 1. Prediction of mineralogical and technological properties in situ of ores of the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit: a conditional mineral processing flowchart (left) and geometallurgical model (right) (after (Ivanyuk et al., 2017; Kalashnikov, Ivanyuk, 2019 b)).

## Литература

1. Li J.-guo, Zhan K. Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment // Engineering. 2018. Т. 4. № 3. С. 381–391.
2. Boogaart K.G. van den, Tolosana-Delgado R. Predictive Geometallurgy: An Interdisciplinary Key Challenge for Mathematical Geosciences // Handbook of Mathematical Geosciences. Cham: Springer International Publishing. 2018. С. 673–686.
3. Lishchuk V. и др. Towards integrated geometallurgical approach: Critical review of current practices and future trends // Miner. Eng. 2020. Т. 145. С. 106072.
4. Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. Москва. Изд-во: ГЕОС. 2001. 312 с.
5. Иванюк Г.Ю. и др. Самоорганизация рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых. Москва: ГЕОКАРТ–ГЕОС. 2009. 392 с.
6. Иванюк Г.Ю. и др. Трёхмерное минералогическое картирование Ковдорского фоскорит-карбонатитового комплекса // Юбилейный съезд Российского минералогического общества «200 лет РМО». Санкт-Петербург: РМО. 2017. С. 384–386.
7. Калашников А.О., Иванюк Г.Ю. Предсказание состава рудных минералов по химическому составу руды с помощью искусственных нейронных сетей (на примере Ковдорского бадделеит-апатит-магнетитового месторождения, Мурманская область) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019 а. Т. S37. № 11. С. 485–492.
8. Калашников А.О., Иванюк Г.Ю. Поливариантное 3D геометаллургическое моделирование многокомпонентных месторождений: место встречи геолога, обогатителя и экономиста // Цифровые технологии в горном деле. Апатиты: Горный институт Кольского НЦ РАН. 2019 б.
9. Коноплева Н.Г., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Михайлова Ю.А. Типоморфизм фторапатита в Хибинском щелочном массиве (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2013. № 3. С. 65–83.
10. Коноплева Н.Г., Калашников А.О., Иванюк Г.Ю. Возможность расчёта содержания попутных компонентов в минералах хибинских апатито-нефелиновых руд по данным рядового опробования // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. Т. 16. С. 283–287.