

## Статистический подход к прогнозу обогатимости руд (на примере железистых кварцитов Костомукшского рудного поля)

Захарова А.А.<sup>1</sup>, Войтеховский Ю.Л.<sup>1,2</sup>, Компанченко А.А.<sup>2</sup>, Шibaева Д.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, zakharova.alena27614@gmail.com

<sup>2</sup> Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

<sup>3</sup> Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

**Аннотация.** В статье рассматривается применение статистического подхода, основанного на подсчете вероятностей межзерновых контактов, для характеристики обогатимости руд на примере железистых кварцитов Костомукшского рудного поля. По минеральному составу и структурно-текстурным особенностям руды делятся на легко- и труднообогатимые. Расчеты по двум компонентам показали четкие различия в соотношении числа контактов: для легкообогатимых руд характерны близкие значения вероятностей контактирования и повышенное число контактов рудный минерал-матрица. Труднообогатимые руды характеризуются разбросом в соотношении контактов и повышенным количеством контактов матрица-матрица, что ухудшает извлечение. При расчетах по трем компонентам дополнительно выявлены особенности раскрытия сростков: структура  $S_3^2$  характерна для руд с крупными и свободными зернами магнетита в сростаниях с кварцем, в то время как структура  $S_3^1$  наблюдается для руд с мелкозернистым магнетитом и большим количеством силикатов, что усложняет процесс обогащения. Таким образом, предлагаемый статистический подход применим для прогноза обогатимости руд, при этом расчеты по двум компонентам отражают общие закономерности обогащения, а расчеты по трем компонентам характеризуют особенности раскрытия минеральных сростков.

**Ключевые слова:** технологическая минералогия, прогноз обогатимости, межзерновые контакты, матрица вероятностей, железистые кварциты, Костомукшское рудное поле.

## Statistical approach to the forecast of ore dressing (on the example of ferruginous quartzites of the Kostomuksha ore field)

Zakharova A.A.<sup>1</sup>, Voytekhovsky Yu.L.<sup>1,2</sup>, Kompanchenko A.A.<sup>2</sup>, Shibaeva D.N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, zakharova.alena27614@gmail.com

<sup>2</sup> Geological Institute KSC RAS, Apatity

<sup>3</sup> Mining Institute KSC RAS, Apatity

**Abstract.** The article considers the application of a statistical approach based on the calculation of the probabilities of intergranular contacts to characterize the washability of ores on the example of ferruginous quartzites of the Kostomuksha ore field. The ores are divided into refractory and free-milling according to the mineral composition and structural and textural features. Calculations for two components showed clear differences in the ratio of the number of contacts: for free-milling ores, close values of contact probabilities and an increased number of ore mineral-matrix contacts are typical. Refractory ores are characterized by a spread in the ratio of contacts and an increased number of matrix-matrix contacts, which impairs extraction. The calculations for three components additionally revealed features of unlocking: the  $S_3^2$  structure is typical for ores with large and free magnetite grains intergrown with quartz, while the  $S_3^1$  structure is observed for ores with fine-grained magnetite and a large amount of silicates, which complicates the enrichment process. Thus, the proposed statistical approach is applicable for predicting the washability of ores, while the calculations for two components reflect the general patterns of enrichment, and the calculations for three components characterize the features of the unlocking of mineral aggregates.

**Keywords:** technological mineralogy, forecast of ore dressing, intergranular contacts, probability matrix, ferruginous quartzites, Kostomuksha ore field.

### Введение

Одна из важнейших задач технологической минералогии – прогноз обогатимости руд на основе параметров, влияющих на процесс обогащения и определяющих его схему. Один из таких параметров – структурно-текстурные особенности руд, определяемые крупностью зерен, характером межзерновых границ и однородностью распределения минералов, содержащих полезный ком-

понент. С точки зрения структуры особенно важен характер сростаний с другими минералами, поскольку в ходе обогащения необходимо добиться максимального раскрытия сростков для получения качественного концентрата (Изоитко, 1997).

В статье (Чантурия и др., 2012) подробно рассматриваются различные подходы к получению высококачественного магнетитового концентрата. Основные проблемы при обогащении железных руд – наличие вредных примесей и недостаточное качество концентрата, связанное с наличием сростков или свободных зерен нерудных минералов (Чантурия и др., 2012). Сегодня актуально применение предварительного концентрирования, в ходе которого удаляется часть пустых пород, что снижает энергозатраты на дробление и измельчение руды (Shibaeva et al., 2021).

Таким образом, одной из задач технологической минералогии является разработка методик, которые позволяют разделять руды по степени обогатимости на ранних этапах геологоразведочных работ с целью снижения затрат на процесс обогащения.

Ранее одним из авторов (Ю.В.) предложена методика строгого определения структур на основе статистики межзерновых контактов. С точки зрения математики горная порода (руда) представляет собой автоморфизм (отображение в себя) слагающих ее минеральных видов, который управляется симметрической матрицей  $P_{ij}$  вероятностей межзерновых контактов (Захарова и др., 2022). Структурный тип определяется по диагональной форме матрицы  $P_{ij}$ . Принцип номенклатуры: структура  $S_n^m$  соответствует такой диагональной матрице, в которой на  $n$  позициях стоят  $m$  положительных элементов (1).

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} q_{11} & & & \\ & q_{22} & & \\ & & \dots & \\ & & & q_{nn} \end{bmatrix} \rightarrow S_n^m \quad (1)$$

В ходе предыдущих исследований на основе предлагаемой методики выявлены закономерности между типами структур и степенью обогатимости руды для апатит-нефелиновых руд Хибинского массива (Захарова и др., 2022). Цель данной работы – продолжение исследования подобных закономерностей на примере железных руд Костомукшского рудного поля.

### **Материалы и методы**

В ходе работы исследованы железистые кварциты Костомукшского (ТКШ-руды) и Корпангского (ЛКШ-руды) месторождений (21 шлиф). Костомукшское рудное поле расположено в северо-западной части Республики Карелия в пределах Карельского кратона Балтийского щита (Геология СССР, 1960). Более подробно геология региона рассмотрена в статье (Slabunov et al., 2006). Залежи железистых кварцитов приурочены к верхнеархейской гимольской серии (возраст около 2.7 млрд. лет), представленной кристаллическими сланцами, амфиболитами, плагиопорфирами и сильно метаморфизованными интрузиями ультраосновных и основных пород (Геология СССР, 1960; Костомукшский рудный район..., 2015; Shibaeva et al., 2021). Структура рудного поля представляет собой синклинальную складку шириной 4–7 км, осложненную дополнительными складками различного масштаба (Кривцов, 1991). Рудоносная толща образует дугообразную структуру, обращенную выпуклой частью на юго-запад (Геология СССР, 1960).

Костомукшские руды относятся к упорным и в основном представлены тонкополосчатыми образцами с мелкозернистым магнетитом в сростках. Руды Корпангского месторождения легкообогатимы и представлены образцами со свободными зёрнами магнетита среднего размера (Костомукшский рудный район..., 2015; Shibaeva et al., 2021).

Рудные минералы в шлифах представлены в основном магнетитом, встречаются зерна пирита, халькопирита, пирротина и пентландита. Породообразующий минерал – кварц, второстепенные – амфиболы, биотит, мусковит. Вторичные изменения: карбонаты, хлоритизация, ожелезнение. Структуры лепидо- и нематогранобластовые, текстуры полосчатые, массивные, реже шпировые (рис. 1).

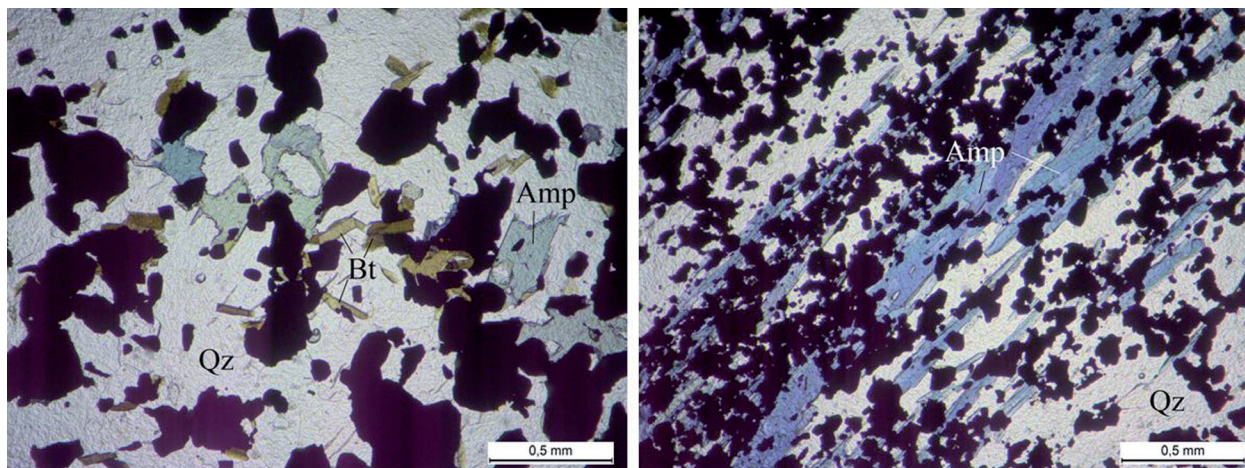


Рис. 1. Примеры шлифов легкообогатимых (ЛКШ, слева) и труднообогатимых (ТКШ, справа) руд, николи II. Обозначения минералов даны по (Whithey et al., 2010).

Fig. 1. Examples of thin sections of free-milling ores (left) and refractory ores (right), nicols II. Mineral designations are given according to (Whithey et al., 2010).

Петрографические исследования и панорамная съемка проведены на поляризационном микроскопе Leica, подсчет межзерновых границ осуществлен вручную с использованием программы ArcGIS. Все операции с матрицами автоматизированы.

### Обсуждение результатов

В ходе исследования железистые кварциты анализировались по двум (рудный минерал и матрица) и трем компонентам (рудный минерал, кварц и матрица). Результаты для двух компонентов представлены на рисунке 2. ТКШ-руды распределены по диаграмме равномерно и тяготеют к вершине р (М-М), что связано с большим числом контактов амфиболов и биотита. Присутствие большого числа силикатов делает руду более вязкой, что усложняет процесс обогащения. Расположение фигуративных точек свидетельствует об изменении соотношения межзерновых контактов в пределах одного типа руды, что также влияет на обогатимость. Основная часть ЛКШ-руд расположена на середине ребра диаграммы близко друг к другу, что говорит о примерно одинаковых характеристиках руд. В данном случае увеличивается число контактов Р-М (больше свободных зерен рудного минерала), что делает руду более легкообогатимой. Таким образом, результаты расчетов для двух компонентов отражают общие особенности обогатимости руд на основе соотношения различных типов контактов и согласуются с технологическими данными.

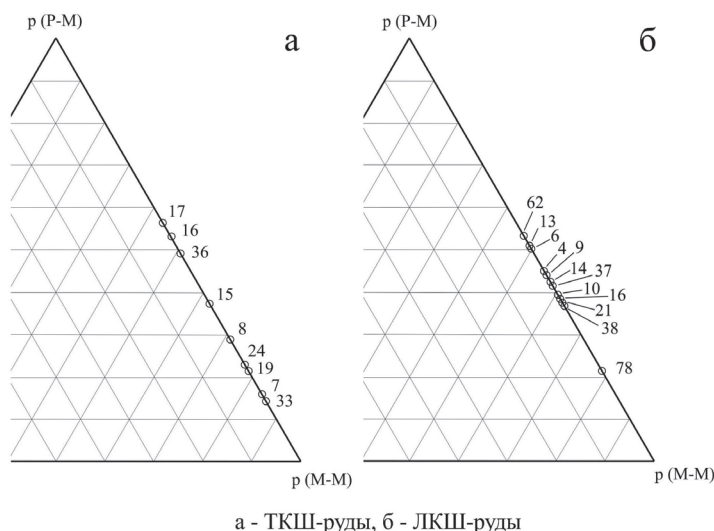


Рис. 2. Фрагменты барицентрических диаграмм. Обозначения: Р – рудный минерал, М – матрица. Контакты Р-Р не учитывались.

Fig. 2. Fragments of barycentric diagrams. Designations: P – ore mineral, M – matrix. P-P contacts were not taken into account.

Следующим этапом исследования был расчет по трем компонентам, результаты представлены в таблице 1. Получены два структурных типа из трех возможных, причем и для ЛКШ-руд, и для ТКШ-руд характерны оба типа структур, что связано с присутствием двух типов железистых кварцитов I и II, которые выделяются на основе структурно-вещественных особенностей (Shibaeva et al., 2021).

Таблица 1. Структурные типы для железных руд при расчетах по трем компонентам.  
Table 1. Structural types for iron ores for the calculations of three components.

ЛКШ-руды		ТКШ-руды	
№ шлифа	Структура	№ шлифа	Структура
4	$S_3^2$	7	$S_3^1$
6	$S_3^1$	8	$S_3^1$
9	$S_3^2$	15	$S_3^2$
10	$S_3^2$	16	$S_3^2$
13	$S_3^1$	17	$S_3^1$
14	$S_3^1$	19	$S_3^2$
16	$S_3^2$	24	$S_3^1$
21	$S_3^2$	33	$S_3^2$
37	$S_3^1$	36	$S_3^1$
38	$S_3^1$		
62	$S_3^1$		
78	$S_3^1$		

Структура  $S_3^1$  характерна для шлифов либо с мелкозернистым магнетитом в сростках, либо для шлифов с большим количеством амфиболов и биотита. Магнетит также наблюдается в виде пойкилитовых вростков в амфиболах. Подобные особенности влияют на раскрытие сростков: мелкозернистый магнетит требует дополнительного измельчения, а наличие силикатов делает руду более вязкой и усложняет флотацию (Абрамов, 2004; Северов, 2011).

Таким образом, аналогично исследованию апатит-нефелиновых руд (Захарова и др., 2022), расчет для трех компонентов характеризует особенности раскрытия минеральных сростков. Структура  $S_3^1$  характерна для руд, структурно-вещественные особенности которых усложняют процесс обогащения, в то время как структура  $S_3^2$  наблюдается для руд с крупными и свободными зернами магнетита в сростках преимущественно с кварцем.

### **Заключение**

В ходе работы исследованы железистые кварциты Костомукшского рудного поля, представленные легко- и труднообогатимыми рудами. Рассчитаны вероятности межзерновых контактов для двух и трех компонентов. Показано, что структурный тип руды определяется ее структурно-текстурными особенностями и модальным составом. Расчеты по двум компонентам отражают общие закономерности обогащения на основе соотношения межзерновых контактов. Расчеты по трем компонентам дополнительно характеризуют особенности раскрытия сростков рудного минерала с другими. Результаты согласуются с геологическими и технологическими характеристиками руд. Предлагаемый статистический подход можно использовать для прогнозирования обогатимости руд, что особенно актуально на ранних этапах геологоразведочных работ.

### **Литература**

1. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Учебник для вузов. М. Изд-во: МГГУ. 2004. Т. II. 510 с.



2. Геология СССР. Карельская АССР. Т. XXXVII. Ч. I, II (ред. К.О. Кратц). М. Изд-во: Госгеолтехиздат, 1960.
3. Захарова А.А., Войтеховский Ю.Л. Методика прогнозирования обогатимости апатитовых руд (Кировский рудник, Кольский полуостров) // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 27–30. DOI: 10.17580/or.2022.01.05.
4. Изюитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб. Изд-во: Наука. 1997. 532 с.
5. Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерагения) (отв. ред. В.Я. Горьковец, Н.В. Шаров). Петрозаводск. Изд-во: КНЦ РАН. 2015. 322 с.
6. Кривцов А.И., Яковлев П.Д. Структуры рудных полей и месторождений, металлогения и прогноз рудоносности: учеб. для вузов. М. Изд-во: Недра. 1991. 383 с.
7. еверов В.В. Разработка процесса обратной флотации железистых кварцитов с использованием катионных и неионогенных собирателей. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. М. 2011.
8. Чантурия Е.Л., Гзогян С.Р. Современное состояние теории и практики получения высококачественных магнетитовых концентратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № S4-22. С. 3–31.
9. Shibaeva D.N., Kompanchenko A.A., Tereschenko S.V. Analysis of the Effect of Dry Magnetic Separation on the Process of Ferruginous Quartzites Disintegration // Minerals. 2021. V. 11. No 8. DOI: 10.3390/min11080797.
10. Slabunov A.I., Lobach-Zhuchenko S.B., Bibikova E.V. et al. The Archean of the Baltic Shield: Geology, Geochronology, and Geodynamic Settings // Geotectonics. 2006. V. 40. No 6. P. 409–433. DOI: 10.1134/S001685210606001X.
11. Whitney D., Evans B. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist. 2010. V. 95. P. 185–187.