

---

---

# ОЦЕНКА ГЕНЕТИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД ПУДОЖГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА

И.Г. Быстров<sup>1</sup>, Ю.М. Астахова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского»  
*Старомонетный пер., 31, Москва, Россия, 119017*

<sup>2</sup>Инженерный факультет  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Миклухо-Макля, 6, Москва, Россия, 117198*

В статье описаны результаты изучения Пудожгорского месторождения титаномагнетитовых руд методами математической статистики.

**Ключевые слова:** руды черных металлов, минеральный состав, качество сырья, титаномагнетит, математическая статистика.

В настоящей работе на примере руд Пудожгорского месторождения, относящегося к благороднометалльно-титаномагнетитовому типу, рассматриваются возможности применения математического аппарата для определения генетических параметров рудо- и минералообразования и их влияния на минералого-технологические особенности ценных компонентов с прогнозированием технологических свойств последних.

Сегодня в связи с неуклонным ростом доступности информационных технологий математический аппарат становится незаменимым инструментом для решения основных задач научных и производственных исследований в геологии — открытия новых месторождений, вовлечения в промышленный оборот новых труднообогатимых и нетрадиционных типов руд в короткие сроки и с минимальными затратами.

Титаномагнетитовые месторождения магматического генезиса являются одним из наиболее перспективных типов железорудного, ванадиевого, титанового, благороднометалльного, а в некоторых случаях и редкометалльного сырья.

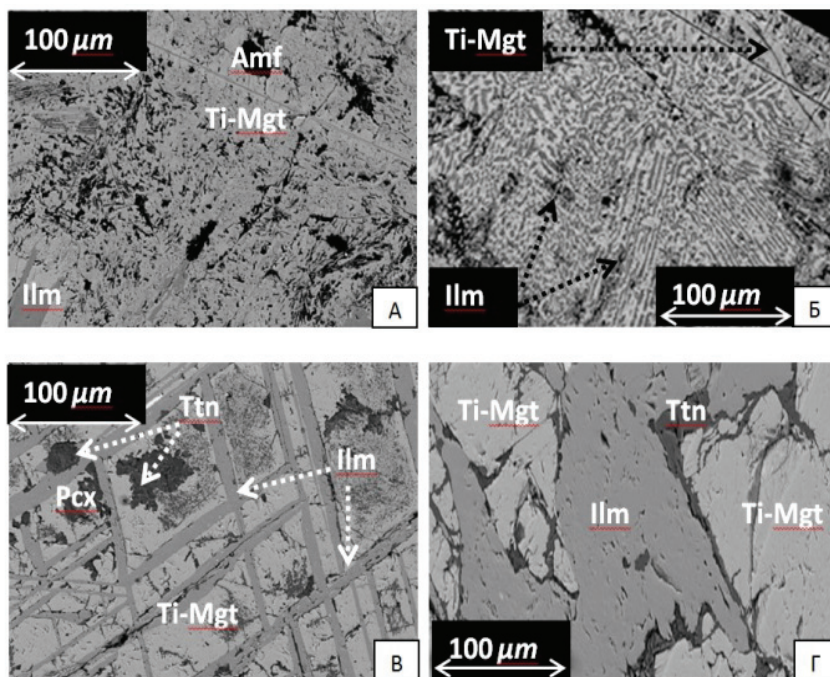
Пудожгорское месторождение с оруденением стратиформного типа комплексных Fe-Ti-V титаномагнетитовых руд с совмещенной Au-Pt-Pd минерализацией, расположенное на восточном берегу Онежского озера Пудожгорского района Республики Карелия, относится к категории суперкрупных уникальных объектов [4]. Оно приурочено к дифференцированному пологопадающему пластовому интрузиву кварцевых долеритов — субформация габбро-титаномагнетит-доририновая трапповой толеит-базальтовой формации, по классификации Ю.А. Кузнецова. Подробно особенности геологического строения района и морфологии интрузива даны в работе [4].

Запасы руды, подсчитанные по промышленным категориям, составляют 316,7 млн т при содержании Fe 28,9%, TiO<sub>2</sub> 8,14%, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,43%. Среднее содержание благородных элементов, принятое для расчета прогнозных ресурсов, —

0,928 г/т. На месторождении выделяются относительно богатые руды с содержаниями > 25% Fe, 8,45% TiO<sub>2</sub> (рудный горизонт) и бедные при 20—25% Fe, 6,4% TiO<sub>2</sub> (подрудный горизонт) [4].

Главным минералом рассматриваемых руд является *титаномагнетит* (Fe<sup>+2</sup>, Mg, Mn)(Fe<sup>+3</sup>, Ti, V, Al, Cr)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, размер зерен всех разновидностей которого, по данным оптико-геометрического анализа, в рудах проб варьирует от 0,2 до 6 мм. Основная масса титаномагнетитов по горизонтам приурочена к крупности 1+0,25 мм. Средний размер выделений минерала в целом по горизонтам рудного тела достаточно близок и составляет 0,50 мм.

Характеризуя непосредственно особенности состава титаномагнетита, следует иметь в виду, что магнетит, являющийся его основой, никогда не отвечает формуле Fe<sup>+2</sup>Fe<sup>+3</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Обычно отношение FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в нем несколько меньше 1 [1] и является функцией температуры образования и окислительно-восстановительного потенциала (частично отношение может уменьшаться за счет мартитизации или из-за окисления Fe<sup>+2</sup> в ходе анализа). Существенный вклад в минералого-технологические особенности магматогенных титаномагнетитов вносит характерный для системы FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> распад твердых растворов, продукты которого представлены тонкими выделениями изоморфных рядов минералов группы шпинелей, гематита и ильменита. При этом также необходимо учитывать влияние захваченных в процессе кристаллизации минералов матрицы, чаще всего алюмосиликатов, и продуктов эволюции отмеченных выше шпинелей, с наложенными процессами лейкоксенизации, маггемитизации, титанитизации (рис. 1).



**Рис. 1.** Титаномагнетит Пудожгорского месторождения:

А, Б — подрудный горизонт, В, Г — рудный горизонт. Микрозонд, изображение в обратно-рассеянных электронах. Ti-Mgt — титаносодержащий магнетит, Ilm — ильменит, Ttn — титанит, Amf — амфибол, Pcx — пироксен

*Нерудные минералы* представлены различными типами силикатов (пироксенами, амфиболами, плагиоклазами, слюдами и др.) и продуктами их изменений в связи с проявлением наложенных процессов метасоматоза в связи с трещиноватостью и образованием сложных форм прорастаний одних минералов другими.

При изучении нерудной минерализации, проводимой с использованием высококоразрешающей электронной микроскопии и РСМА, нами установлены моноклинная разновидность Рх-авгита, описанного в работе [4], Рх-диопсид-геденбергитового ряда и подтверждена видовая принадлежность амфиболов, широко распространенных в рудах месторождения, а также впервые обнаружен титанит.

Принципиальное понимание вопросов, касающихся как генетических, так и минералого-технологических особенностей титаномагнетитов руд месторождения, значительно повышается за счет установления взаимосвязей между отдельными компонентами, в первую очередь между химическими элементами, слагающими минеральные индивиды, агрегаты, и впоследствии руды. Для выявления этих связей использовался программный пакет Statistica.

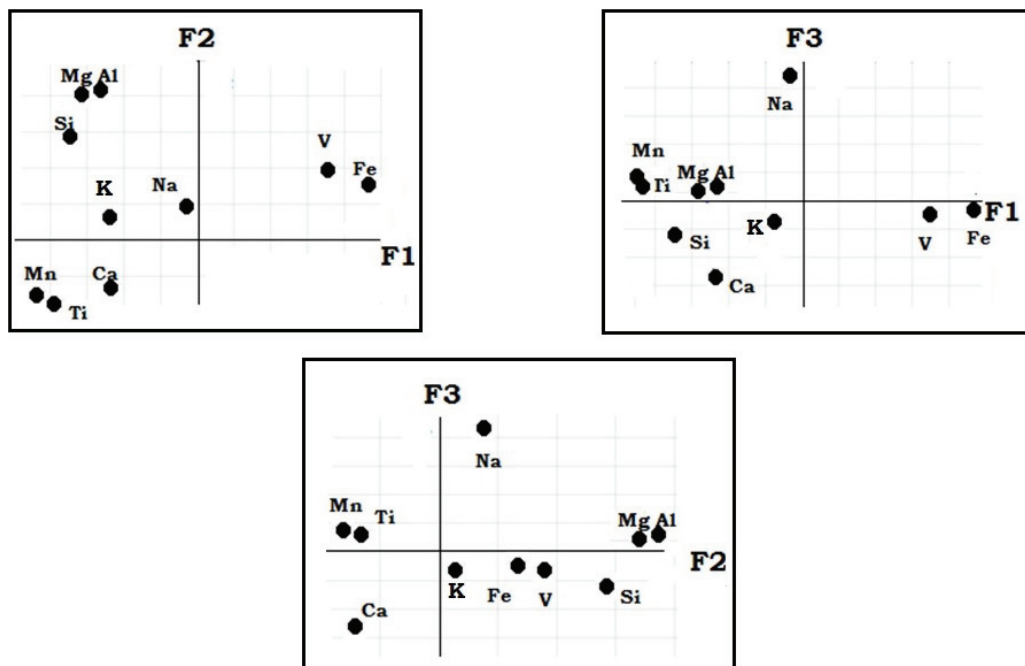
Информацию о неоднородности титаномагнетитов и взаимосвязях слагающих их элементов дает корреляционный анализ. Теснота и направленность связей между парами признаков определяется величиной и знаком корреляции  $r$  (табл. 1). Взаимосвязь пары признаков считается установленной (при уровне значимости 0,05), если абсолютное значение коэффициента корреляции превышает величину 0,20, с помощью критерия  $t$  [5] с учетом числа проб (в нашем случае 98). Так, оценка корреляционной матрицы элементного состава титаномагнетитов рудного тела в целом (данные МРСА) по критерию Фишера позволила нам выявить обратные связи между Ti—Fe ( $r = -0,97$ ), Ti—V ( $r = -0,63$ ) и прямую связь между V—Fe ( $r = 0,69$ ), а также средние связи Ti—Si ( $r = 0,38$ ), Ti—Ca ( $r = 0,35$ ) и сильную прямую связь Mn—Ti ( $r = 0,92$ ), при этом между элементами, отнесенными в разные группы, наблюдается сильная обратная связь. Вероятнее всего, это связано с понижением общего содержания Fe в минерале вследствие выделения как продукта РТР ильменита с его последующим переходом в титанит. Прямая корреляционная связь Fe—V явно указывает на вхождение V в виде изоморфной примеси в магнетит, а также на наличие собственной Fe—V фазы — кульсонита, диагностируемого в единичных наблюдениях. Интересна также слабая обратная связь K с Fe—Ti—V ( $r \approx -0,30$ ) при такой же прямой с Si и чуть меньшей с Al ( $r = 0,25$ ), которая указывает на потерю ценных компонентов титаномагнетитом при образовании слюд.

Таблица 1

Корреляционная матрица химического состава Ti-Mgt по глубине рудного пласта (1)

|    | K     | Na    | Mg          | Al          | Si           | Ca           | Ti           | V            | Mn           | Fe           |
|----|-------|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| K  |       | 0,00  | -0,09       | 0,25        | 0,31         | -0,26        | -0,28        | -0,30        | 0,17         | -0,30        |
| Na | 0,00  |       | 0,12        | 0,10        | -0,02        | -0,19        | 0,02         | -0,06        | 0,02         | -0,06        |
| Mg | -0,09 | 0,12  |             | <b>0,82</b> | <b>0,73</b>  | -0,03        | 0,20         | -0,15        | 0,18         | -0,27        |
| Al | 0,25  | 0,1   | <b>0,82</b> |             | <b>0,78</b>  | -0,03        | 0,18         | -0,11        | 0,20         | -0,27        |
| Si | 0,31  | -0,02 | <b>0,73</b> | <b>0,78</b> |              | 0,39         | 0,38         | -0,2         | 0,37         | <b>-0,47</b> |
| Ca | -0,26 | -0,19 | -0,03       | -0,03       | 0,39         |              | 0,35         | -0,36        | 0,33         | <b>-0,42</b> |
| Ti | -0,28 | 0,02  | 0,20        | 0,18        | 0,38         | 0,35         |              | <b>-0,63</b> | <b>0,92</b>  | <b>-0,97</b> |
| V  | -0,30 | -0,06 | -0,15       | -0,11       | -0,20        | -0,36        | <b>-0,63</b> |              | <b>-0,68</b> | <b>0,69</b>  |
| Mn | 0,17  | 0,02  | 0,18        | 0,20        | 0,37         | 0,33         | <b>0,92</b>  | <b>-0,68</b> |              | <b>-0,90</b> |
| Fe | -0,30 | -0,06 | -0,27       | -0,27       | <b>-0,47</b> | <b>-0,42</b> | <b>-0,97</b> | <b>0,69</b>  | <b>-0,90</b> |              |

Наиболее принципиально, как отмечено в работе [3], особенности химического состава руд и минералов можно охарактеризовать, используя с факторный анализ. Факторный анализ с использованием метода главных компонент, проведенный по данным химического состава образцов титаномагнетита, отобранных с разных глубин рудной залежи, позволил выделить изменения, происходившие с рудным минералом по всей глубине интрузива. При рассмотрении веса факторов (рис. 2, табл. 2) видно, что в процессе формирования элементного состава титаномагнетита участвуют три фактора, несущих более 82% общей дисперсии.



**Рис. 2.** Диаграммы распределения по факторам факторных нагрузок содержаний основных компонентов в рудах и породах Пудожгорского месторождения

Таблица 2

**Факторные нагрузки, собственные значения и веса факторов**

| Признак              | Факторные нагрузки |              |               |
|----------------------|--------------------|--------------|---------------|
|                      | F1                 | F2           | F3            |
| K                    | 0,189              | -0,095       | -0,234        |
| Na                   | 0,119              | 0,062        | <b>-0,839</b> |
| Mg                   | 0,086              | <b>0,919</b> | -0,122        |
| Al                   | 0,072              | <b>0,942</b> | -0,097        |
| Si                   | 0,286              | <b>0,872</b> | -0,241        |
| Ca                   | 0,440              | 0,041        | <b>0,658</b>  |
| Ti                   | <b>0,940</b>       | 0,131        | 0,035         |
| V                    | <b>-0,807</b>      | -0,022       | -0,008        |
| Mn                   | <b>0,936</b>       | 0,123        | 0,017         |
| Fe                   | <b>-0,947</b>      | -0,218       | -0,051        |
| Собственные значения | 3,609              | 2,577        | 1,223         |
| Вес фактора, %       | 40,099             | 28,638       | 13,587        |

Величины собственных значений и веса факторов показывают, что значения исследуемых характеристик титаномагнетитов определяются преимущественно на 40,1% действием одного фактора F1. Анализ признаковой структуры фактора F1 показывает, что нагрузка этого фактора заключается в значительном понижении содержания Fe и V в минерале, под влиянием и Mn и Ti и в меньшей степени Ca и Si. Такой набор признаков и характер их действия позволяет предполагать, что фактор F1 отражает процесс выделения собственных фаз из прототитаномагнетита, содержащего магнетит с примесями ильменита, титанита, ульвита и др.

Фактор F2 несет в себе 28,6% информации о рассматриваемом минерале. Анализ признаковых нагрузок этого фактора показывает, что он имеет значимую положительную связь с Si, Al и Mg и слабые отрицательные связи с Fe и V. Такая признаковая структура фактора F2 позволяет предполагать, что он отражает влияние на состав титаномагнетита включений первичного магнезиевого алюмосиликата, захваченного магмой в процессе кристаллизации, а также влиянием на минерал более позднего магнезиевого алюмосиликата, с частичным замещением железа на магний в процессе автотитаномагнетизации, и, вероятно, диффузионной миграцией железа.

Фактор F3 несет в себе небольшую долю информации (13,6%). Его интерпретация позволяет предположить, что F3 отражает взаимный метасоматический процесс изменения состава титаномагнетитов и сопутствующих им Ca- и Na-плагиоклазов вмещающей породы и в меньшей степени влияние K входящего в состав развивающихся по захваченным амфиболам и алюмосиликатам слюд.

Факторный анализ, проведенный отдельно для образцов подрудного и рудного горизонтов (табл. 3, 4) с учетом предложенного в работе [2] растрового измерения методом МРСА показал соответствие ранее выделенных влияющих факторов как на весь пласт, так и на его отдельные горизонты. При этом удалось разделить F3 на два фактора — натриевый и кальциевый, имеющих примерно равное значение. Также в рудном горизонте подтвердилась слабая связь K и Si.

Таблица 3

**Факторные нагрузки, собственные значения и веса факторов (рудный горизонт)**

| Признак              | Факторные нагрузки |              |              |              |
|----------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
|                      | F1                 | F2           | F3           | F4           |
| K                    | 0,110              | -0,058       | -0,206       | -0,134       |
| Na                   | 0,100              | 0,003        | <b>0,975</b> | 0,128        |
| Mg                   | 0,089              | <b>0,952</b> | 0,005        | -0,007       |
| Al                   | -0,002             | <b>0,956</b> | 0,116        | 0,042        |
| Si                   | 0,035              | <b>0,967</b> | -0,261       | 0,099        |
| Ca                   | -0,195             | 0,096        | 0,136        | <b>0,956</b> |
| Ti                   | <b>0,957</b>       | -0,037       | -0,054       | -0,039       |
| V                    | <b>-0,789</b>      | -0,019       | -0,177       | 0,189        |
| Mn                   | <b>0,941</b>       | 0,028        | 0,016        | -0,053       |
| Fe                   | <b>-0,931</b>      | -0,155       | -0,124       | 0,158        |
| Собственные значения | 3,348              | 2,791        | 1,088        | 1,056        |
| Вес фактора, %       | 37,195             | 31,014       | 12,087       | 11,731       |

Примечание: корреляционные связи являются значимыми ( $\beta = 0,05$ ) для  $N = 58$  при их абсолютном значении не менее 0,211.

Таблица 4

**Факторные нагрузки, собственные значения и веса факторов  
(подрудный горизонт)**

| Признак              | Факторные нагрузки |              |              |              |
|----------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
|                      | F1                 | F2           | F3           | F4           |
| K                    | 0,100              | -0,055       | -0,014       | -0,127       |
| Na                   | -0,165             | 0,064        | -0,124       | <b>0,976</b> |
| Mg                   | 0,126              | <b>0,917</b> | 0,024        | 0,076        |
| Al                   | 0,101              | <b>0,949</b> | 0,012        | 0,020        |
| Si                   | 0,406              | 0,546        | <b>0,690</b> | 0,003        |
| Ca                   | 0,402              | -0,130       | <b>0,848</b> | -0,221       |
| Ti                   | <b>0,914</b>       | 0,116        | 0,280        | -0,117       |
| V                    | <b>-0,870</b>      | -0,120       | -0,098       | 0,097        |
| Mn                   | <b>0,925</b>       | 0,089        | 0,232        | -0,115       |
| Fe                   | <b>-0,894</b>      | -0,174       | -0,343       | 0,114        |
| Собственные значения | 3,628              | 2,126        | 1,471        | 1,056        |
| Вес фактора, %       | 40,314             | 23,625       | 16,348       | 11,738       |

*Примечание:* корреляционные связи являются значимыми ( $\beta = 0,05$ ) для  $N = 40$  при их абсолютном значении не менее 0,25.

Таким образом, приведенные выше данные показывают, что аппарат математической статистики применим даже для таких сложных и труднообогатимых руд как магматогенные титаномагнетиты. Для руд Пудожгорского месторождения установлен явный антагонизм Fe—V с Ti, что позволяет предположить возможность попутного выделения обогащенного титаном концентрата, наличие же кульсонита должно снизить затраты на получение V из железного концентрата. Для оценки генетических особенностей руд огромное значение играет взаимовлияние титаномагнетита и нерудных минералов, в первую очередь плагиоклазов, а также постепенное и пока слабо проявленное разубоживание руд под воздействием образующихся К- алюмосиликатов.

Использование различных методов математической геологии и минералогии на разных уровнях исследования вещества помогает составить более полную картину условий образования и эволюции вещества, дать прогнозную оценку минералого-технологических особенностей руд, тем самым минимизировав затраты при их обработке.

За помощь, советы, и поддержку авторы выражают благодарность профессору, доктору геолого-минералогических наук Б.И. Пирогову.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Годовиков А.А. Минералогия. — М.: Недра, 1975. [*Godovikov A.A. Mineralogiia. — M.: Nedra, 1975.*]
- [2] Пирогов Б.И., Броницкая Е.С., Астахова Ю.М., Волков Е.С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 2. — С. 47—51. [*Pirogov B.I., Bronitskaia E.S., Astakhova J.M., Volkov E.S. Osobennosti veshchestvennogo sostava titanomagnetitovykh rud // Razvedka i okhrana nedr. — 2013. — № 2. — S. 47—51.*]

- [3] *Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.* Технологическая минералогия железных руд. — Ленинград: Наука, 1988. [*Pirogov B.I., Porotov G.S., Kholoshin I.V., Tarasenko V.N.* Tekhnologicheskaiia mineralogiia zheleznykh rud. — Leningrad: Nauka, 1988.]
- [4] *Трофимов Н.Н., Голубев А.И.* Пудожгорское благороднометалльное титаномagnetитовое месторождение. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. [*Trofimov N.N., Golubev A.I.* Pudozhgorskoe blagorodnometallnoe titanomagnetitovoe mestorogdenie. — Petrozavodsk: Karelskii nauchnei tcentr RAN, 2008.]
- [5] *Fisher R.A., Frank Y.* Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research. — London: London Group Ltd., 1963. — 6th ed.: p. 146.

**ASSESSMENT OF GENETIC  
AND MINERALOGO-TECHNOLOGICAL PECULIARITIES  
OF TITANIUM MAGNETITE ORES OF THE PUDOZHGORSKY  
ORE DEPOSIT WITH USE OF MATHEMATICAL APPARATUS**

**I.G. Bystrov<sup>1</sup>, J.M. Astakhova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>FSUE «All-Russian scientific research institute  
of mineral resources named after N.M. Fedorovsky»  
*Staromonetny per., 31, Moscow, Russia, 119017*

<sup>2</sup>Engineering Faculty  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

In article described results of studying of the Pudozhgorsky titanomagnetite's ores by methods of mathstatistics.

**Key words:** ores of ferrous metals, mineral structure, quality of raw materials, titanomagnetit, mathematical statistics.