

---

---

# 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 минерало-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.

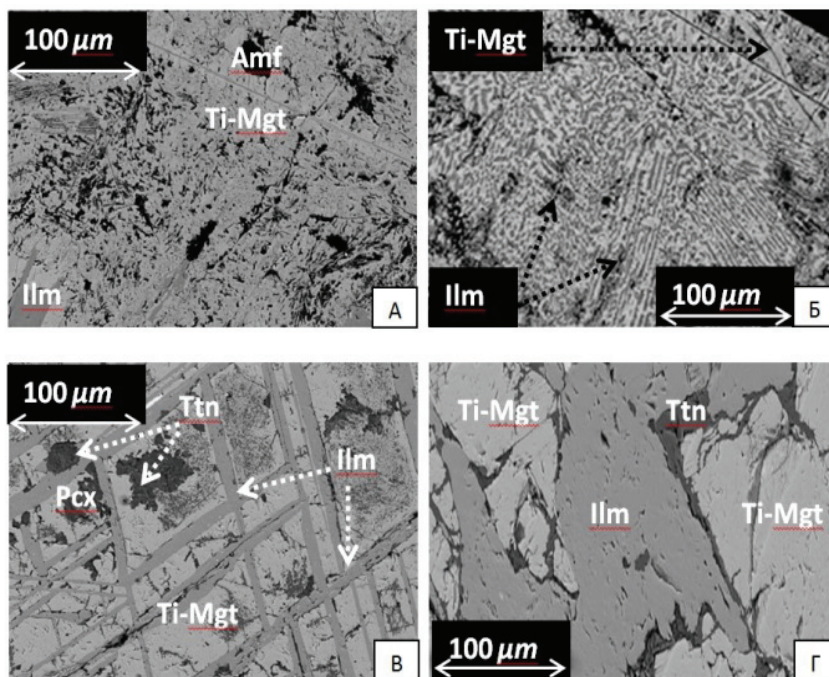
Пудожгорское месторождение с оруденением стратиформного типа комплексных Fe-Ti-V титаномагнетитовых руд с совмещенной Au-Pt-Pd минерализацией, расположенное на восточном берегу Онежского озера Пудожгорского района Республики Карелия, относится к категории суперкрупных уникальных объектов [4]. Оно приурочено 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.

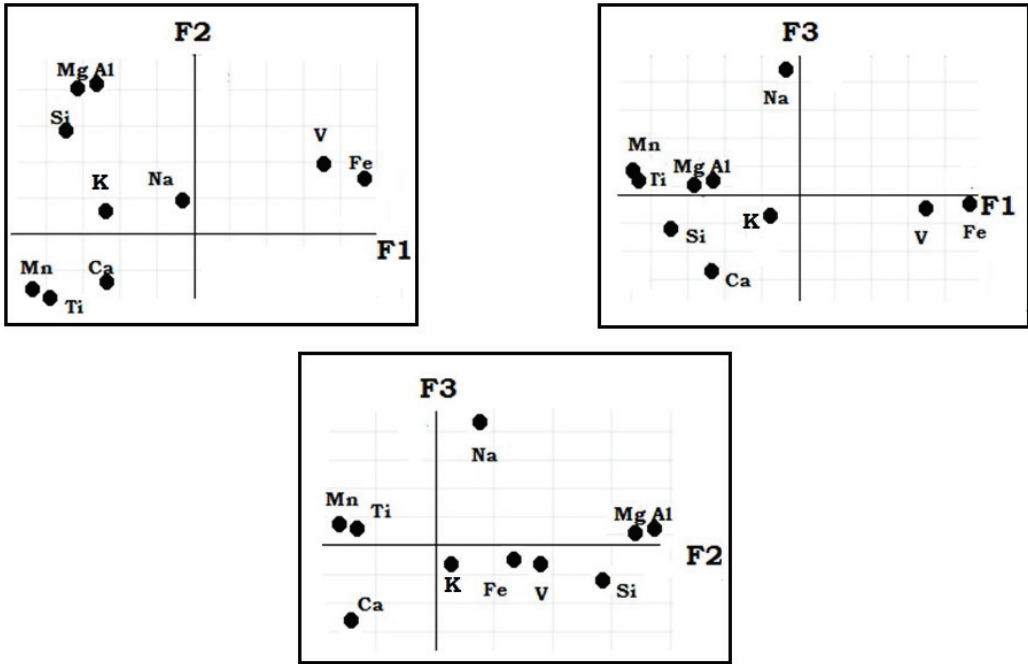
Информацию о неоднородности титаномагнетитов и взаимосвязях слагающих их элементов дает корреляционный анализ. Теснота и направленность связей между парами признаков определяется величиной и знаком корреляции  $r$  (табл. 1). Взаимосвязь пары признаков считается установленной (при уровне значимости 0,05), 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 признаков 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 признаков нагрузки 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 автотометасоматоза, 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-плаггиоклазов 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.