

УДК 543.062:549:622.7

Корреляционные связи между компонентами вещественного состава в апатит-нефелиновых рудах Хибинского массива (Кольский полуостров)

В. В. Марчевская*, У. В. Корнеева

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7258-4952>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
04.02.2020;

получена
после доработки
11.06.2020

Ключевые слова:

apatite-nepheline
ores,
hypergenic processes,
mineral composition,
chemical composition,
correlation,
regression equation

Рядовые апатит-нефелиновые руды месторождений Хибинского щелочного массива близки по набору рудообразующих минералов и отличаются их количественным соотношением. Особое место среди апатит-нефелиновых руд занимают руды тектонически разрушенных зон, широко распространенных на хибинских апатит-нефелиновых месторождениях. Руды зон разрушения представляют собой продукт вторичных изменений рядовых руд и характеризуются присутствием тонкодисперсных вторичных минералов, представленных гидратированными слюдами, цеолитами и глинистыми минералами. В водной среде они образуют коллоидные осадки с активными поверхностными свойствами. Этот факт, а также образующиеся на поверхности зерен апатита тонкие пленки глинистых и других минералов, обуславливают снижение степени гидрофобности фторапатита и нарушение селективности апатитовой флотации. По данным аналитических определений химических компонентов руд, их минералогического состава выполнен корреляционно-регрессионный анализ соотношения компонентов вещественного состава руд. Результаты корреляционно-регрессионного анализа показывают, что наличие гипергенно измененных руд, относящихся к труднообогатимым, можно идентифицировать по пониженным значениям отношений оксидов натрия и калия, а также натрия и алюминия относительно их средних. В связи с наличием во всех отработываемых рудах продуктов изменения нефелина выявлена наиболее устойчивая корреляционная связь нефелина с оксидом натрия, а не с оксидами алюминия, в отличие от принятого ранее мнения. Установленная очень высокая корреляционная связь фторапатита, нефелина, титанита соответственно с оксидами фосфора, натрия, титана, а также статистическая значимость коэффициентов корреляции и регрессии позволяют определять содержания этих минералов по приведенным в статье уравнениям регрессии.

Для цитирования

Марчевская В. В. и др. Корреляционные связи между компонентами вещественного состава в апатит-нефелиновых рудах Хибинского массива (Кольский полуостров). Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 2. С. 173–181. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-173-181.

Correlation between the material constitution components in apatite-nepheline ores of the Khibiny Rock Massif (the Kola Peninsula)

Valentina V. Marchevskaya*, Uliana V. Korneeva

*Mining Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7258-4952>

Article info

Received
04.02.2020;

received in revised
11.06.2020

Key words:

apatite-nepheline ore,
hypergenic processes,
mineral composition,
chemical composition,
correlation,
regression equation

Abstract

Raw apatite-nepheline ores of the Khibiny alkaline massif are similar in terms of the set of ore-forming minerals and differ in their quantitative ratio. A special place among apatite-nepheline ores is occupied by ores of tectonically destroyed zones, which are widespread in the Khibiny apatite-nepheline deposits. Destruction zone ores are product of secondary changes in raw ores and are characterized by the presence of finely dispersed secondary minerals represented by hydrated micas, zeolites and clay minerals. In the aquatic environment they form colloidal sediments with active surface properties. This fact, as well as thin films of clay and other minerals formed on the surface of apatite grains, cause a decrease in the degree of hydrophobicity of fluorapatite and deterioration of the selectivity of apatite flotation. According to the analytical determinations of the chemical components of the ores and their mineralogical composition, a correlation-regression analysis of the ratio of the components of the material composition of the ores has been performed. The results of correlation-regression analysis have shown that the presence of hypergenically changed ores related to difficult-to-treat ones can be identified by lower ratios of sodium and potassium oxides, as well as sodium and aluminum relative to their average. The presence of products of nepheline change in all ores processed has allowed revealing the most stable correlation between nepheline and sodium oxide, rather than aluminum oxides, in contrast to the earlier opinion. The very high correlation relationship between fluorapatite, nepheline, and titanite and the oxides of phosphorus, sodium, and titanium, respectively, and the statistical significance of the correlation and regression coefficients allow determining the content of these minerals using the regression equations presented in the paper.

For citation

Marchevskaya, V. V. et al. 2020. Correlation between the material constitution components in apatite-nepheline ores of the Khibiny Rock Massif (the Kola Peninsula). *Vestnik of MSTU*, 23(2), pp. 173–181. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-173-181.

Введение

Хибинский щелочной массив, расположенный в центральной части Кольского полуострова, представляет собой крупнейшую интрузию нефелиновых сиенитов, мельтейгит-уртитов и апатит-нефелиновых пород. Месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива являются ведущей сырьевой базой для производства фосфатных удобрений в России. По количеству разведанных запасов фосфора эти месторождения занимают лидирующие позиции на мировом рынке. В настоящее время разведаны десять уникальных по минералогическому и химическому составам месторождений апатит-нефелиновых руд: Кукисвумчорр, Юкспор, Плато Расвумчорр, Апатитовый цирк, Коашвинское, Ньюрпахк, Олений ручей, Эвслогчорр, Куэльпор, Партомчорр. Из них первые шесть эксплуатируются ОАО "Апатит", Олений ручей разрабатывает ЗАО "Северо-Западная Фосфорная Компания". Остальные месторождения находятся в резерве (Пожиленко и др., 2002; Новые..., 1982; Непряхин и др., 2015; Мельников, 2015).

Апатит-нефелиновые руды разрабатываемых месторождений характеризуются разнообразием текстурных разновидностей, различающихся содержанием апатита от 16–20 % в бедных природных типах руд до 70–75 % в наиболее богатых (Новые..., 1982; Голованов и др., 1984).

По набору минералов типичные руды месторождений, характеризующиеся сравнительно высокой флотационной способностью, практически однотипны и отличаются лишь количественным соотношением рудообразующих минералов. Ранее считалось, что руды и породы Хибинских месторождений состоят из шести основных породообразующих минералов, в сумме составляющих 95 % массовых: апатит, нефелин, полевые шпаты, сфен, титаномагнетит, пироксены (Новые..., 1982; Голованов и др., 1984; Коробов и др., 1999). Из второстепенных и аксессуарных минералов в рудах присутствуют: слюды, канкринит, содалит, натролит, лампрофиллит и другие (Голованов и др., 1984; Дудкин и др., 1964).

Особое место среди апатит-нефелиновых руд занимают руды разрушенных зон. Они распространены на всех месторождениях, особенно на Юкспорском и Апатитовый цирк, их образование связано с химическими и физическими процессами в зонах выветривания. Этим рудам свойственны изменения первичных минералов, в первую очередь нефелина. При разрушении нефелина образуются вторичные минералы: гидрослюды, цеолиты и глинистые минералы, представленные преимущественно тонкодисперсными частицами. В водной среде они образуют коллоидные осадки с активными поверхностными свойствами. Содержание P_2O_5 в измененных рудах зон разлома обычно выше, чем в рядовых, что объясняется химической стойкостью фторапатита, а также изменением и замещением других минералов и выносом части продуктов из зон разрушения. В гипергенно измененных рудах на поверхности зерен апатита образуются тонкие пленки глинистых минералов и примазки других минералов, в первую очередь оксидов железа, обуславливающие снижение степени гидрофобности фторапатита и, соответственно, ухудшение его флотационных свойств (Голованов и др., 1984; Дудкин и др., 1964; Дудкин, 1960; Розанова, 1962; Корнеева и др., 2018; 2019).

С расширением фронта добычи разнообразие апатит-нефелиновых руд, поступающих на обогатительные фабрики, возрастает. Таким образом, детальное изучение состава и технологических свойств апатит-нефелиновых руд является актуальной задачей, имеющей как научное, так и практическое значение.

Цель работы – выявление устойчивых корреляционных связей между основными компонентами минерального и химического состава апатит-нефелиновых руд.

Материалы и методы

Обеспечение стабильных условий обогащения руд переменного состава, в том числе апатит-нефелиновых, качества получаемых концентратов, а также минимизации потерь может быть достигнуто путем осуществления оперативного контроля вещественного состава перерабатываемых руд и продуктов обогащения на всех стадиях производства (Чантурия и др., 2014).

Поскольку определение минерального состава не может быть выполнено экспрессно, одним из способов решения данной задачи является установление корреляционных связей между основными компонентами вещественного состава апатит-нефелиновых руд и их отношениями.

Исследования вещественного состава апатит-нефелиновых руд выполнены на материале 38 проб, отобранных на эксплуатируемых месторождениях Хибинского массива. Химический состав руд основных компонентов – оксидов фосфора, алюминия, титана, натрия, калия, кальция, стронция, кремния, магния, марганца, железа общего, фтора – определен атомно-абсорбционным, фотоколориметрическим и рентгеноспектральными методами. Для проведения количественного элементного анализа использовались атомно-абсорбционные спектрофотометры КВАНТ-2А, PERKIN ELMER, фотоколориметры КФК-2, UNICO 1200 (США), рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного действия ARL Advant'X (Швейцария).

Определения минерального состава руд выполнены на порошковом рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (Германия).

По результатам определений выполнен корреляционно-регрессионный анализ соотношения компонентов вещественного состава руд.

Результаты и обсуждение

По результатам аналитических определений установлено, что корреляционные связи между компонентами химического состава руд, а также химического и минерального составов описываются линейными зависимостями вида $C_y = a + bC_x$, где C_y – содержание минерала или химического компонента; C_x – содержание химического компонента руд; a, b – коэффициенты.

Наиболее тесные корреляционные связи наблюдаются между содержаниями компонентов, входящих в состав фторапатита: оксидов фосфора, кальция и стронция, фтора. Коэффициент парной корреляции содержания оксида фосфора с содержанием оксида кальция и стронция, фтора изменяется от 0,90 до 0,95 при достоверности аппроксимации 0,81–0,90 (табл. 1, рис. 1–3). Следует отметить, что более тесно оксид фосфора связан с суммарным содержанием фтора и оксида стронция, что вполне объяснимо. Несколько ниже значения коэффициента корреляции между содержаниями оксидов кальция, фтора и стронция – от 0,88 до 0,90. Существует достаточно устойчивая обратная корреляционная связь содержания элементов, входящих в состав фторапатита, с содержаниями оксидов кремния, алюминия, калия и натрия, а также железа общего: значения коэффициентов корреляции составляют от –0,64 до –0,92.

Оксид алюминия общего имеет наиболее высокую прямую связь с оксидами кремния и калия и обратную с компонентами, входящими в состав фторапатита. Корреляционная связь оксидов алюминия и натрия слабее за счет ее нарушения в гипергенно измененных рудах вследствие выноса части натриевых продуктов из зон разрушения. Двоокись титана наиболее тесно связана с железом и оксидом марганца.

В процессе анализа выявлено, что в рудах из зон разрушения нарушаются соотношения содержаний оксидов натрия и калия, а также натрия и алюминия общего. При среднем значении отношения содержаний оксидов натрия и калия в рядовых рудах 2,2 в гипергенно измененных рудах оно снижается до 0,5–1. Второе отношение соответственно снижается от 0,5 до 0,2 и менее. Выявленные изменения соотношений могут служить в качестве индикатора руд из зон разрушения.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между химическими компонентами апатит-нефелиновых руд
Table 1. Correlations between chemical components in apatite-nepheline ores

| Компоненты | P ₂ O ₅ | F | Al ₂ O _{3общ} | TiO ₂ | Fe _{общ} | K ₂ O | Na ₂ O | SiO ₂ | CaO | MgO | MnO | SrO |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------|-----------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|
| P ₂ O ₅ | 1 | 0,922 | –0,801 | –0,222 | –0,730 | –0,700 | –0,643 | –0,922 | 0,946 | –0,516 | –0,404 | 0,901 |
| F | 0,922 | 1 | –0,806 | –0,116 | –0,485 | –0,774 | –0,666 | –0,820 | 0,878 | –0,349 | –0,246 | 0,807 |
| Al ₂ O _{3общ} | –0,801 | –0,806 | 1 | –0,333 | 0,276 | 0,841 | 0,626 | 0,760 | –0,909 | 0,157 | –0,096 | –0,813 |
| TiO ₂ | –0,222 | –0,116 | –0,333 | 1 | 0,568 | –0,333 | 0,003 | 0,033 | 0,099 | 0,319 | 0,629 | –0,062 |
| Fe _{общ} | –0,730 | –0,485 | 0,276 | 0,568 | 1 | 0,260 | 0,342 | 0,625 | –0,525 | 0,760 | 0,877 | –0,646 |
| K ₂ O | –0,700 | –0,774 | 0,841 | –0,333 | 0,260 | 1 | 0,194 | 0,807 | –0,835 | 0,048 | –0,057 | –0,681 |
| Na ₂ O | –0,643 | –0,666 | 0,626 | 0,003 | 0,342 | 0,194 | 1 | 0,604 | –0,779 | 0,384 | 0,156 | –0,760 |
| SiO ₂ | –0,922 | –0,820 | 0,760 | 0,033 | 0,625 | 0,807 | 0,604 | 1 | –0,919 | 0,487 | 0,344 | –0,851 |
| CaO | 0,946 | 0,876 | –0,909 | 0,099 | –0,525 | –0,835 | –0,779 | –0,919 | 1 | –0,413 | –0,236 | 0,886 |
| MgO | –0,516 | –0,404 | 0,157 | 0,319 | 0,760 | 0,048 | 0,384 | 0,487 | –0,413 | 1 | 0,632 | –0,493 |
| MnO | –0,404 | –0,246 | –0,096 | 0,629 | 0,877 | –0,057 | 0,156 | 0,344 | –0,236 | 0,632 | 1 | –0,360 |
| SrO | 0,901 | 0,807 | –0,813 | –0,062 | –0,646 | –0,681 | –0,760 | –0,851 | 0,886 | –0,493 | –0,360 | 1 |

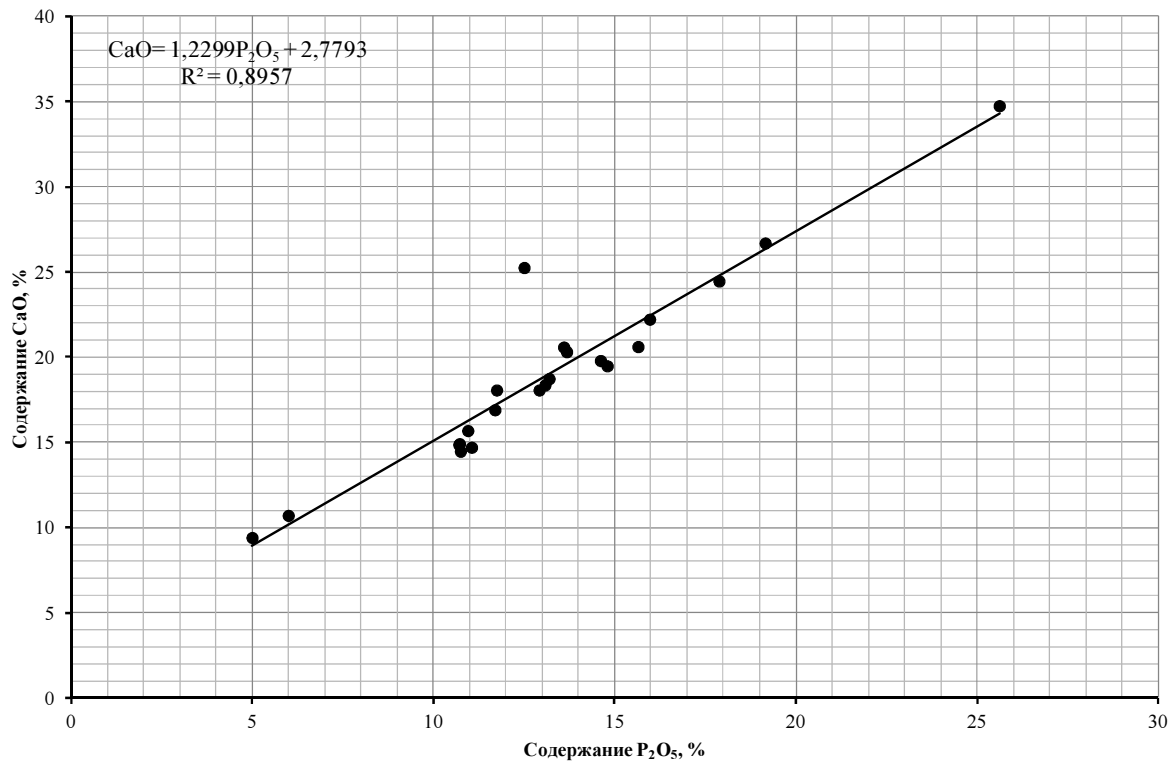


Рис. 1. Корреляционная связь содержаний оксидов фосфора и кальция
Fig. 1. Correlation between phosphorus and calcium oxides contents

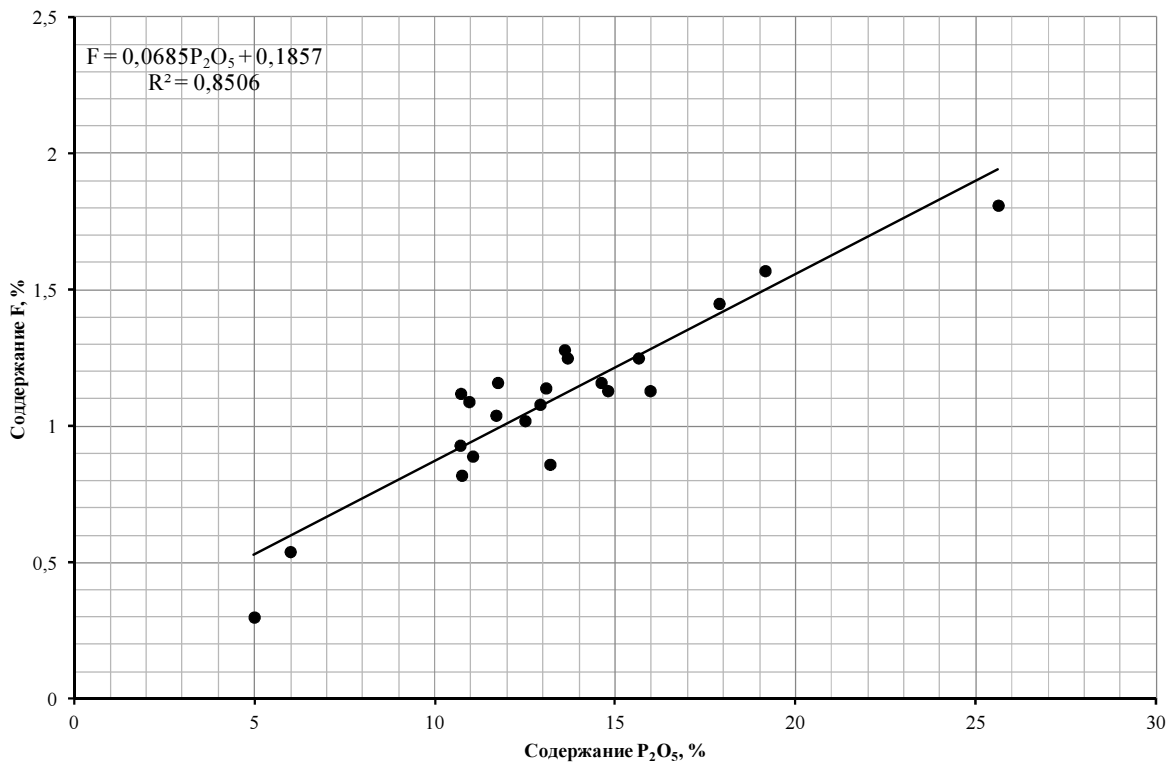


Рис. 2. Корреляционная связь содержаний оксида фосфора и фтора
Fig. 2. Correlation between phosphorus and fluorine oxides contents

По результатам рентгенофазового анализа в рудах исследованных проб определено от 20 до 30 минералов в различном процентном соотношении.

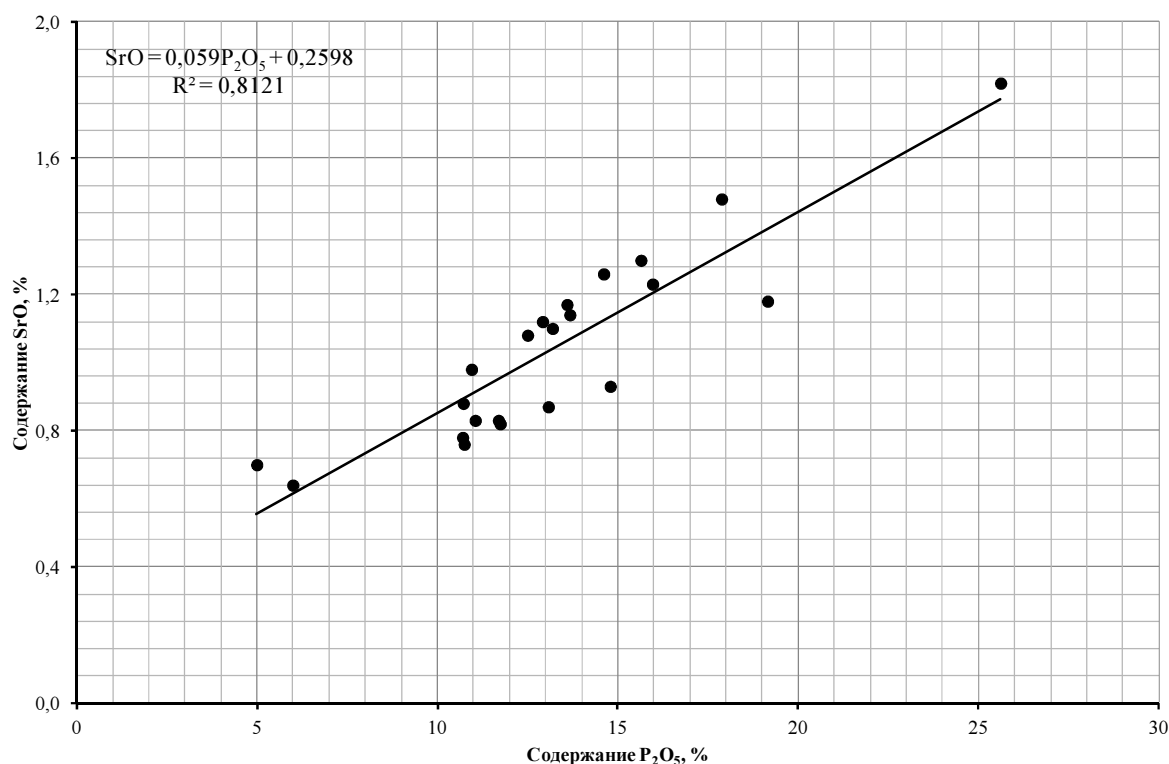


Рис. 3. Корреляционная связь содержаний оксидов фосфора и стронция
Fig. 3. Correlation between phosphorus and strontium oxides contents

Главными минералами всех проб являются фторапатит, нефелин, пироксены (эгирин, эгирин-авгит), калиевые полевые шпаты (ортоклаз, микроклин), амфиболы (арфведсонит и рихтерит), слюды антит-флогопитового ряда. К второстепенным минералам относятся титанит, магнетит титанистый, лампрофиллит и некоторые вторичные минералы – содалит, канкринит, натролит.

Кроме вышеперечисленных минералов, в апатит-нефелиновых рудах некоторых проб присутствуют многочисленные вторичные минералы: гидрослюды (в основном иллит и гидромусковит), второй минерал цеолитов филлипсит и глинистые минералы (монтмориллонит, бейделлит, каолинит), образованные под действием постмагматических процессов в зонах разрушений путем замещения первичных минералов, в основном нефелина.

При изучении взаимосвязи минерального и химического составов в апатит-нефелиновых рудах установлено, что фторапатит очень тесно коррелирует с оксидом фосфора, коэффициент корреляции близок к 1, что еще раз подтверждает тот факт, что единственным концентратором фосфора в апатит-нефелиновых рудах является фторапатит. Соответственно, фторапатит также тесно связан с оксидами кальция, стронция и фтором прямой зависимостью с коэффициентами корреляции 0,86–0,95 и обратной с оксидами кремния, алюминия, калия, натрия и железом общим с коэффициентами корреляции 0,68–0,95. Для нефелина наиболее характерна связь с компонентами, входящими в его состав, – оксидами натрия ($r = 0,94$ при достоверности аппроксимации $R^2 = 0,88$) и алюминия кислоторастворимого ($r = 0,91$), причем в отличие от существовавшего ранее мнения, связь с оксидом натрия значительно более устойчивая, поскольку кислоторастворимый алюминий содержится в продуктах распада нефелина в зонах гипергенеза: гидрослюдах и глинистых минералах, что подтверждено расчетами. С алюминием общим нефелин связан значительно слабее из-за присутствия компонента в других алюмосиликатах. Титанит очень тесно связан с двуокисью титана ($r = 0,95$ при достоверности аппроксимации 0,89), связь ильменита с TiO_2 значительно слабее ($r = 0,73$), хотя по принятой классификации является высокой (Корнеева и др., 2019). Значения коэффициентов корреляции магнетита титанистого с двуокисью титана и железом общим практически одинаковы – около 0,7. Связь остальных минералов с химическими компонентами значительно слабее: значения коэффициентов корреляции почти везде не превышают 0,5 (табл. 2, рис. 4–6).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между компонентами химического и минерального состава апатит-нефелиновых руд
Table 2. Correlations between chemical and mineral compounds in apatite-nepheline ores

| Минералы | Химические компоненты | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------------------------------|--------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|
| | P ₂ O ₅ | F | Al ₂ O _{3,общ} | Al ₂ O _{3,кр} | TiO ₂ | Fe _{общ} | K ₂ O | Na ₂ O | SiO ₂ | CaO | MgO | MnO | SrO |
| Фторапатит | 0,996 | 0,919 | -0,787 | -0,665 | -0,230 | -0,740 | -0,676 | -0,654 | -0,920 | 0,948 | -0,541 | -0,434 | 0,858 |
| Нефелин | -0,594 | -0,656 | 0,655 | 0,912 | -0,059 | 0,186 | 0,234 | 0,940 | 0,581 | -0,759 | 0,250 | -0,060 | -0,613 |
| Пироксены | -0,423 | -0,346 | 0,187 | 0,354 | 0,218 | 0,351 | 0,317 | 0,167 | 0,517 | -0,422 | 0,221 | 0,387 | -0,219 |
| Амфиболы | -0,223 | -0,060 | 0,004 | -0,078 | 0,013 | 0,364 | 0,190 | -0,056 | 0,462 | -0,250 | 0,344 | 0,362 | -0,108 |
| Полевые шпаты | -0,507 | -0,694 | 0,591 | 0,323 | -0,192 | 0,261 | 0,704 | 0,019 | 0,511 | -0,620 | 0,154 | 0,061 | -0,657 |
| Канкринит | -0,423 | -0,356 | 0,174 | 0,174 | 0,325 | 0,461 | 0,248 | 0,187 | 0,294 | -0,232 | 0,143 | 0,179 | -0,196 |
| Содалит | -0,354 | -0,256 | 0,165 | 0,401 | 0,230 | 0,303 | 0,195 | 0,228 | 0,229 | -0,179 | 0,152 | 0,256 | -0,110 |
| Цеолиты | -0,359 | -0,347 | 0,331 | 0,018 | -0,016 | 0,203 | 0,549 | -0,167 | 0,387 | -0,353 | -0,177 | -0,080 | -0,406 |
| Титанит | -0,182 | -0,134 | -0,313 | -0,249 | 0,945 | 0,481 | -0,242 | -0,073 | 0,050 | 0,109 | 0,209 | 0,564 | -0,047 |
| Ильменит | 0,062 | 0,119 | -0,521 | -0,413 | 0,728 | 0,358 | -0,394 | -0,245 | -0,029 | 0,306 | 0,350 | 0,575 | 0,048 |
| Магнетит титанистый | -0,315 | -0,165 | -0,098 | 0,020 | 0,694 | 0,644 | -0,261 | 0,315 | 0,229 | -0,110 | 0,651 | 0,772 | -0,295 |
| Лампрофиллит | -0,083 | -0,276 | 0,079 | -0,066 | -0,082 | -0,058 | 0,262 | -0,348 | 0,187 | -0,167 | 0,097 | -0,047 | -0,271 |
| Слюды | -0,043 | 0,071 | -0,170 | -0,469 | 0,249 | 0,395 | 0,159 | -0,546 | 0,052 | 0,165 | 0,295 | 0,454 | -0,078 |
| Гидрослюды | -0,017 | -0,069 | 0,070 | -0,272 | -0,136 | 0,097 | 0,367 | -0,499 | 0,060 | -0,005 | 0,014 | 0,009 | -0,162 |
| Глинистые минералы | 0,031 | 0,000 | -0,161 | -0,260 | 0,140 | 0,193 | 0,048 | -0,317 | -0,045 | 0,022 | 0,099 | 0,283 | 0,162 |

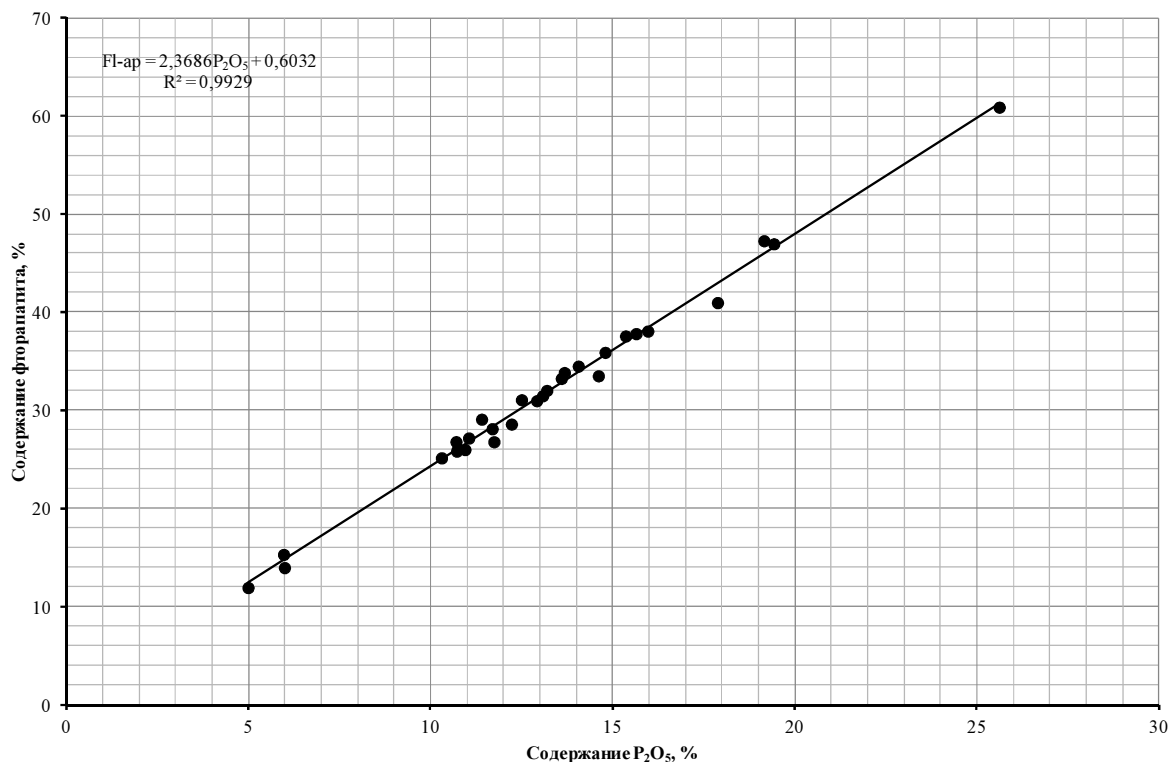


Рис. 4. Корреляционная связь содержаний фторапатита и оксида фосфора
Fig. 4. Correlation between fluorapatite and phosphorus oxide contents

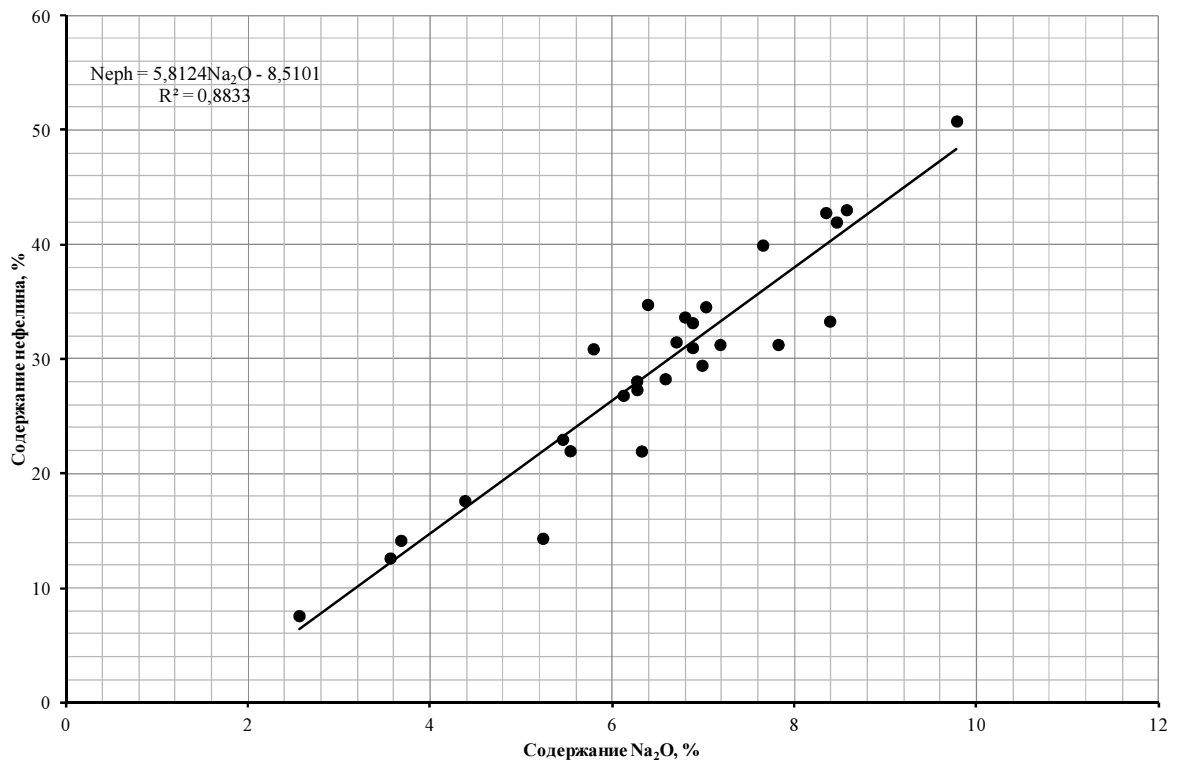


Рис. 5. Корреляционная связь содержаний нефелина и оксида натрия
Fig. 5. Correlation between nepheline and sodium oxide contents

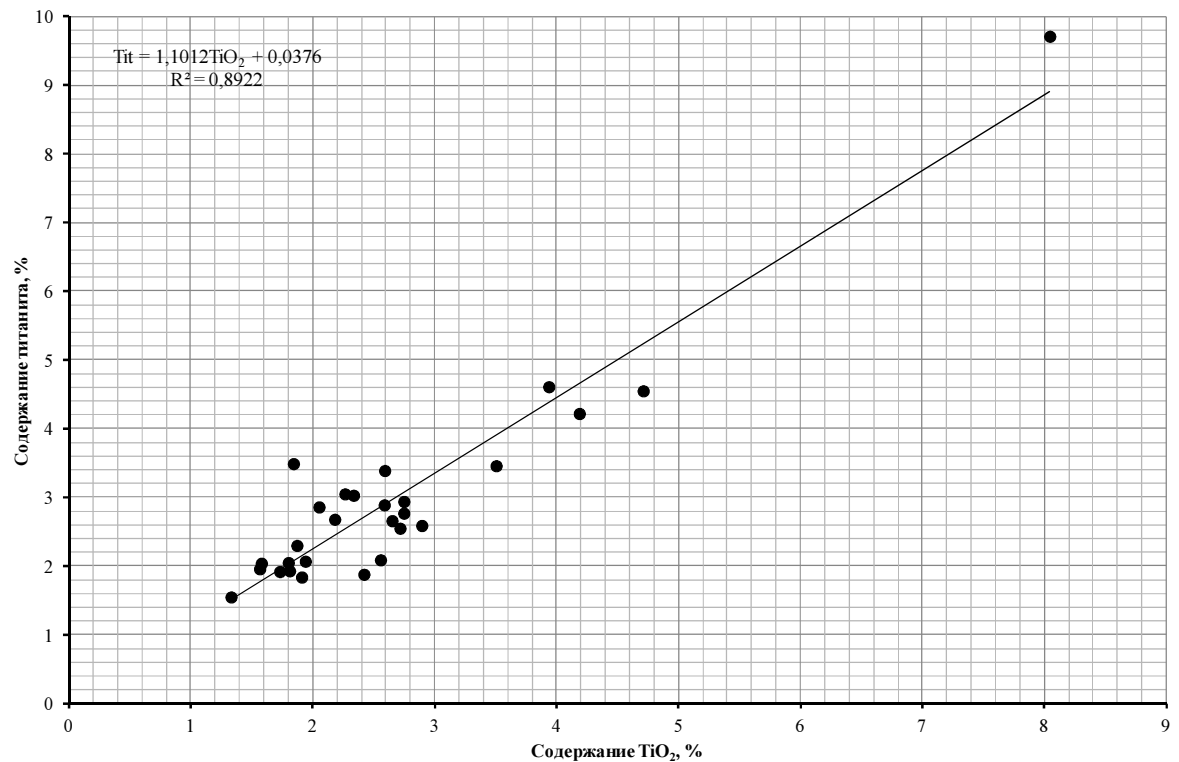


Рис. 6. Корреляционная связь содержаний титанига и двуокиси титана
Fig. 6. Correlation between titanite and titanium dioxide contents

В соответствии с положениями статистической теории значимость коэффициентов парной корреляции и регрессии оценивается по *t*-критерию по приведенной ниже формуле и сравнивается с его критическим табличным значением для доверительной вероятности 95 % при соответствующем числе степеней свободы $n - 2$ (Дэвис, 1990; Urtio et al., 2017). При превышении расчетных значений критерия табличных коэффициенты корреляции и регрессии считаются статистически значимыми, т. е. достоверность вычисленных коэффициентов парной корреляции считается доказанной

$$t_{\text{расч}} = \sqrt{r^2 \cdot \frac{n-2}{1-r^2}},$$

где r – коэффициент парной корреляции; n – количество пар.

По расчетам установлено, что все коэффициенты корреляции как между химическими компонентами, так и компонентами минерального и химического состава апатит-нефелиновых руд, значения которых превышают 0,5, являются статистически значимыми. Это является основанием для определения содержания фаз фторапатита, нефелина, титанита, для которых установлена очень высокая корреляционная связь ($r > 0,9$) соответственно с оксидами фосфора, натрия, титана, по приведенным на рис. 4–6 уравнениям регрессии

$$\text{Fl-ap} = 2,3686\text{P}_2\text{O}_5 + 0,6032;$$

$$\text{Neph} = 5,8124\text{Na}_2\text{O} - 8,5101;$$

$$\text{Tit} = 1,1012\text{TiO}_2 + 0,0376.$$

Заключение

По результатам аналитических определений и корреляционно-регрессионного анализа установлено:

1. Наличие гипергенно измененных руд, характеризующихся пониженной обогатимостью, можно идентифицировать по низким значениям отношений оксидов натрия и калия, а также натрия и алюминия общего относительно средних.

2. Максимальным значением коэффициента корреляции характеризуется связь фторапатита и оксида фосфора, что обусловлено наличием единственного концентратора фосфора в апатит-нефелиновых рудах.

3. Для нефелина наиболее характерна устойчивая связь с оксидом натрия, а не с оксидами алюминия, в отличие от существовавшего ранее мнения.

4. Очень высокая корреляционная связь в апатит-нефелиновых рудах фторапатита, нефелина, титанита соответственно с оксидами фосфора, натрия, титана и статистическая значимость коэффициентов корреляции и регрессии позволяет определять содержания этих минералов по приведенным уравнениям регрессии.

Библиографический список

- Голованов Г. А., Шифрин С. М., Мырзахметов М. М., Кайтмазов В. А. Бессточная технология обогащения фосфатного сырья. М. : Химия, 1984. 136 с.
- Дудкин О. Б. О механизме образования пленок и примазок на Хибинском апатите в условиях гипергенеза // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1960. Ч. 89, Вып. 5. С. 572–576.
- Дудкин О. Б., Козырева Л. В., Померанцева Н. Г. Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр. М. ; Л. : Наука, 1964. 236 с.
- Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии : в 2 кн. / пер. с англ. ; под ред. Д. А. Родионова. М. : Недра, 1990.
- Корнеева У. В., Марчевская В. В. Проблемы обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений // Будущее Арктики начинается здесь : сб. материалов II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Апатиты, 18–20 апреля 2018 г. Апатиты : Изд-во филиала МАГУ в г. Апатиты, 2018. С. 54–62.
- Корнеева У. В., Марчевская В. В. Распределение по крупности минералов в гипергенно измененных апатит-нефелиновых рудах и продуктах их обогащения // Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием "Будущее Арктики начинается здесь" : тез. докл., Апатиты, 25–26 апреля 2019 г. Апатиты : Изд-во филиала МАГУ в г. Апатиты, 2019. С. 107–109.
- Коровов Б. Л., Томчук Н. П. Минерально-сырьевая база ОАО "Апатит" // Горный журнал. 1999. № 9. С. 19–22.
- Мельников Н. Н. Роль Арктики в инновационном развитии экономики России // Горный журнал. 2015. № 7. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.04>.
- Непряхин А. Е., Беляев Е. В., Карпова М. И., Лужбина И. В. Фосфоритовая составляющая МСБ России в свете новых технологических возможностей // Георесурсы. 2015. № 4. С. 67–74.
- Новые хибинские апатитовые месторождения / под ред. Е. А. Каменева, Д. А. Минеева. М. : Недра, 1982. 182 с.
- Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты : КНЦ РАН, 2002. 359 с.

- Розанова О. А. Флотация апатито-нефелиновых руд разрушенных зон // Обогащение фосфатных руд : сб. ст. М. : Госгортехиздат. 1962. С. 3–28.
- Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные исследования в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 2(350). С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2014.02.01>.
- Uurtio V., Monteiro J. A., Kandola J., Shawe-Taylor J. [et al.]. A tutorial on canonical correlation methods // ACM Computing Surveys. 2017. Vol. 50, Iss. 6. DOI: <https://doi.org/10.1145/3136624>. Article 95.

References

- Golovanov, G. A., Shifrin, S. M., Myrzakhmetov, M. M., Kaitmazov, V. A. 1984. Drainless beneficiation technology for phosphate raw materials. Moscow. (In Russ.)
- Dudkin, O. B. 1960. On the mechanism of the formation of films and adhesions on the Khibiny apatite under the hypergenesis conditions. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, 89(5), pp. 572–576. (In Russ.)
- Dudkin, O. B., Kozyreva, L. V., Pomerantseva, N. G. 1964. Mineralogy of apatite deposits of the Khibiny tundra. Moscow. (In Russ.)
- Davis, J. C. 1990. Statistics and data analysis in geology. In 2 books. Tr. from English, ed. D. A. Rodionov. Moscow. (In Russ.)
- Korneeva, U. V., Marchevskaya, V. V. 2018. Beneficiation problems of apatite-nepheline ores from Khibiny deposits. Proceedings of II All-Russian and Intern. conf. *The future of the Arctic begins here*. 18–20 April, 2018. Apatity, pp. 54–62. (In Russ.)
- Korneeva, U. V., Marchevskaya, V. V. 2019. Distribution on a size of minerals in hypergene-altered apatite-nepheline ores and products of their beneficiation. Proceedings of II All-Russian and Intern. conf. *The future of the Arctic begins here*. 25–26 April, 2019. Apatity, pp. 107–109. (In Russ.)
- Korobov, B. L., Tomchuk, N. P. 1999. Mineral resources base of JSC Apatit. *Mining Journal*, 9, pp. 19–22. (In Russ.)
- Melnikov, N. N. 2015. The role of the Arctic in the innovative development of the Russian economy. *Mining Journal*, 7, pp. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.04>. (In Russ.)
- Nepryakhin, A. E., Belyaev, E. V., Karpova, M. I., Luzhbina, I. V. 2015. Phosphorite component of Russia's mineral raw material base in the terms of new technological capabilities. *Georesursy*, 4, pp. 67–74. (In Russ.)
- New Khibiny apatite deposits. 1982. Eds. E. A. Kamenev, D. A. Mineev. Moscow. (In Russ.)
- Pozhilenko, V. I., Gavrilenko, B. V., Zhirov, D. V., Zhabin, S. V. 2002. Geology of mineral areas of the Murmansk region. Apatity. (In Russ.)
- Rozanova, O. A. 1962. Flotation of apatite-nepheline ores of the destroyed zones. In articles coll. *Enrichment of phosphate ores*. Moscow, pp. 3–28. (In Russ.)
- Chanturiya, V. A., Vaysberg, L. A., Kozlov, A. P. 2014. Promising trends in investigations aimed at all-round utilization of mineral raw materials. *Obogashchenie Rud*, 2(35), pp. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2014.02.01>. (In Russ.)
- Uurtio, V., Monteiro, J. A., Kandola, J., Shawe-Taylor, J. et al. 2017. A tutorial on canonical correlation methods. *ACM Computing Surveys*, 50(6). DOI: <https://doi.org/10.1145/3136624>. Article 95.

Сведения об авторах

Марчевская Валентина Викторовна – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник; e-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7258-4952>

Valentina V. Marchevskaya – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher; e-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7258-4952>

Корнеева Ульяна Валерьевна – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209; Горный институт КНЦ РАН, инженер-исследователь, аспирант; e-mail: ulyana_1988z@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3504-7792>

Uliana V. Korneeva – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, 184209; Mining Institute KSC RAS, Research Engineer, PhD Student; e-mail: ulyana_1988z@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3504-7792>