

## Возможность расчёта содержания попутных компонентов в минералах хибинских апатито-нефелиновых руд по данным рядового опробования

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

<sup>1</sup>Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, konoplyova55@mail.ru

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, geoksc@geoksc.apatity.ru

**Аннотация.** В статье показана принципиальная возможность определения содержания попутных компонентов в апатите, нефелине, титаните и магнетите по результатам рядового опробования пород и руд хибинских месторождений. Предлагаемая методика может существенно упростить подсчёт запасов попутных компонентов в апатито-нефелиновых рудах.

**Ключевые слова:** попутные полезные ископаемые, апатито-нефелиновые руды, апатит, нефелин, титанит, магнетит.

## Possibility of calculation of trace elements concentrations in minerals of the Khibiny apatite-nepheline ores according to ordinary sampling

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

<sup>1</sup>Nanomaterials Research Centre KSC RAS, Apatity, konoplyova55@mail.ru

<sup>2</sup>Geological institute KSC RAS, Apatity, geoksc@geoksc.apatity.ru

**Abstract.** The article shows the possibility of calculation of trace elements concentrations in apatite, nepheline, titanite and magnetite, according to ordinary sampling of apatite-nepheline ores. The offered procedure can essentially simplify the estimation of reserves of trace elements in apatite-nepheline ores.

**Key words:** trace elements, apatite-nepheline ores, apatite, nepheline, titanite, magnetite.

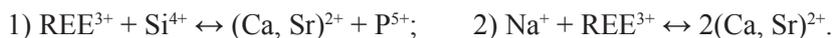
В балансе запасов апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений помимо основного компонента  $P_2O_5$  учтены запасы попутных полезных ископаемых II группы (нефелина, титанита и титаномагнетита) и III группы ( $SrO$ ,  $REE_2O_3$  и  $F$  в апатите;  $Al_2O_3$ ,  $Ga_2O_3$ ,  $Rb_2O$  и  $Cs_2O$  в нефелине;  $TiO_2$  и  $Nb_2O_5$  в сфене;  $Fe_{общ}$  и  $TiO_2$  в титаномагнетите). Рядовое опробование керн разведочных скважин включает в себя определение содержаний  $P_2O_5$ ,  $Al_2O_{3общ}$ ,  $Al_2O_{3к.р.}$  (кислотно-растворимого) и  $TiO_2$ . Такой набор компонентов позволяет достаточно уверенно оценить количество основных минералов в породах продуктивной толщи. Содержание апатита связано прямой функциональной зависимостью с содержанием  $P_2O_5$  ( $C_{Ап} = 2.451 \times C_{P_2O_5}$ ). Основными минералами-концентраторами алюминия в продуктивной зоне месторождений являются нефелин (87-97 %) и полевошпат (1-11 %)  $Al_2O_{3общ}$ . Содержание  $Al_2O_{3к.р.}$  позволяет оценивать содержание нефелина в породах. Соответственно, разность  $Al_2O_{3общ}$  и  $Al_2O_{3к.р.}$  ( $\Delta Al_2O_3$ ) характеризует степень полевошпатовости пород. Диоксид титана концентрируется, главным образом, в титаните (59-86 %) и титаномагнетите (4-30 %).

Методика подсчёта запасов минералов в апатит-нефелиновых рудах по уравнениям регрессии от компонентов рядового опробования давно вошла в практику работы Мурманской ГРЭ и АО «Апатит». Но природные связи в минеральной системе Хибинского массива гораздо глубже. Как показали наши комплексные геолого-минералогические исследования, изменение состава минералов в пределах Хибинского массива происходит закономерно и взаимосогласованно (Иванюк и др., 2009). Учитывая это качество минеральной системы, мы сделали попытку оценить изменение состава промышленно-ценных минералов в зависимости от состава пород по основным компонентам рядового опробования.

Для выполнения работы использованы результаты анализов монофракций минералов и рядового опробования, приведённые в отчётах по детальной разведке хибинских месторождений.

### Попутные компоненты в апатите

В хибинском апатите реализуются две основные схемы изоморфных замещений:



Обе они отвечают за изменение состава апатита при переходе от вмещающих пород к апатит-нефелиновым рудам, т.е. возрастание количества апатита ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) в ийолит-уртитовых и апатит-нефелиновых рудах сопровождается его очищением от примесных Na, REE и Si в пользу Ca, Sr и P. В отношении Ca и Sr проявлена специализация, соответственно, мелких и крупных месторождений: на крупных месторождениях (Кукисвумчорр-Юкспор, Расвумчорр, Коашва) очищение апатита от REE и Si сопровождается увеличением содержания Ca, а на мелких – Sr. Поэтому, чем богаче руда (выше содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) и крупнее месторождение, тем меньше стронция в составе апатита (Коноплева и др., 2013).

Ещё в 1985 году при изучении апатита из руд месторождений Олений Ручей и Коашва был установлен закономерный характер изменения количества изоморфных примесей SrO,  $\text{REE}_2\text{O}_3$  и F в апатите от содержания  $\text{P}_2\text{O}_5$  в руде (Иванов, 1987). Тогда же было сделано предположение, что существует единая закономерная связь компонентов в составе апатита, характерная для всех месторождений Юго-восточного рудного поля, а возможно и для всех хибинских апатитовых месторождений. Графики, приведённые на рисунке 1 показывают, что это предположение оказалось верным.

Общее количество  $\text{REE}_2\text{O}_3$  и SrO в апатите увеличивается при возрастании доли ийолит-уртитов в массе руды (обратно пропорционально содержанию апатита), так что переход к добыче всё более бедных руд на всё более глубоких горизонтах может сопровождаться увеличением содержания этих компонентов в апатитовом концентрате.

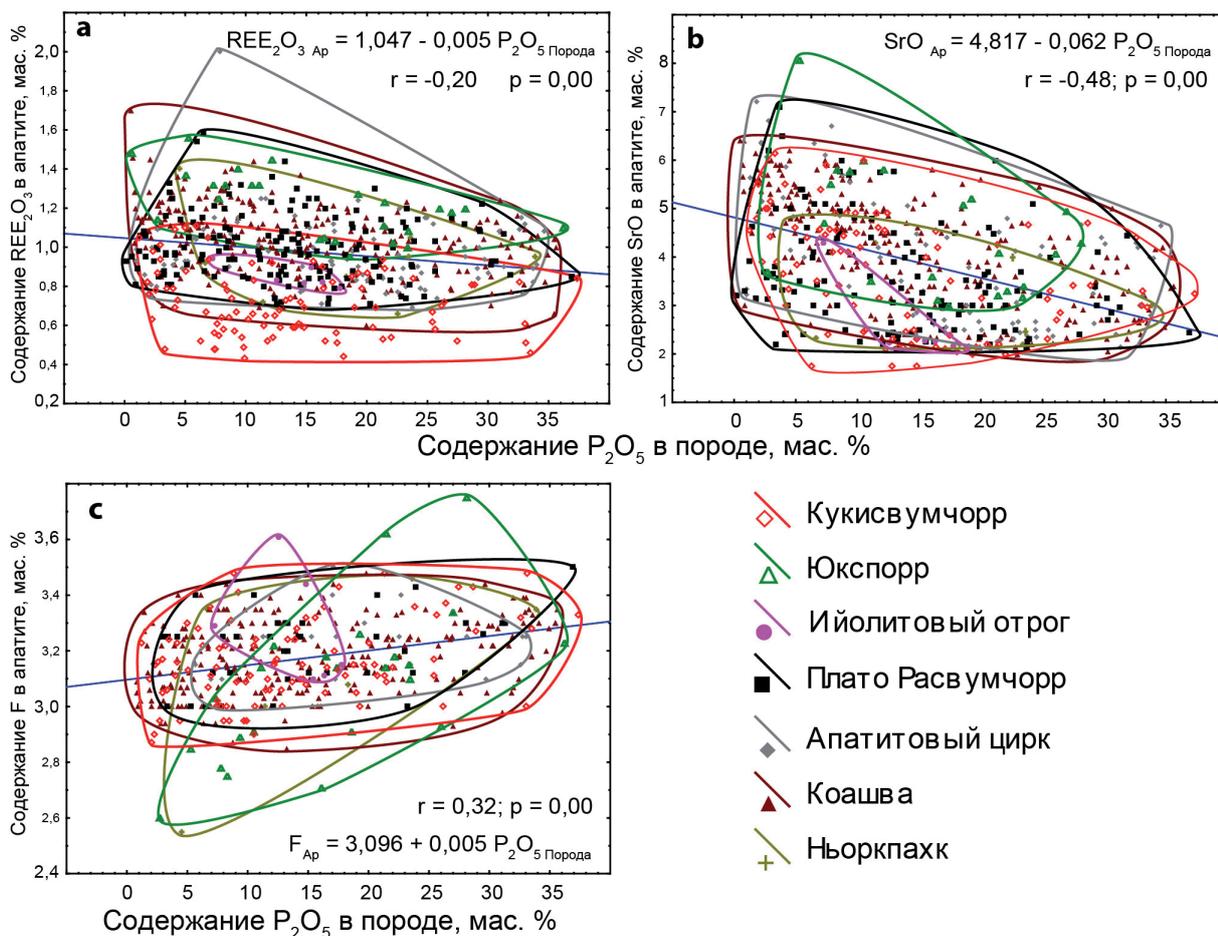


Рис. 1. Зависимость содержаний  $\text{REE}_2\text{O}_3$  (a), SrO (b) и F (c) в апатите от содержания  $\text{P}_2\text{O}_5$  в породе.

Fig. 1.  $\text{REE}_2\text{O}_3$  (a), SrO (b) and F (c) concentrations in apatite vs.  $\text{P}_2\text{O}_5$  contents in the rock.

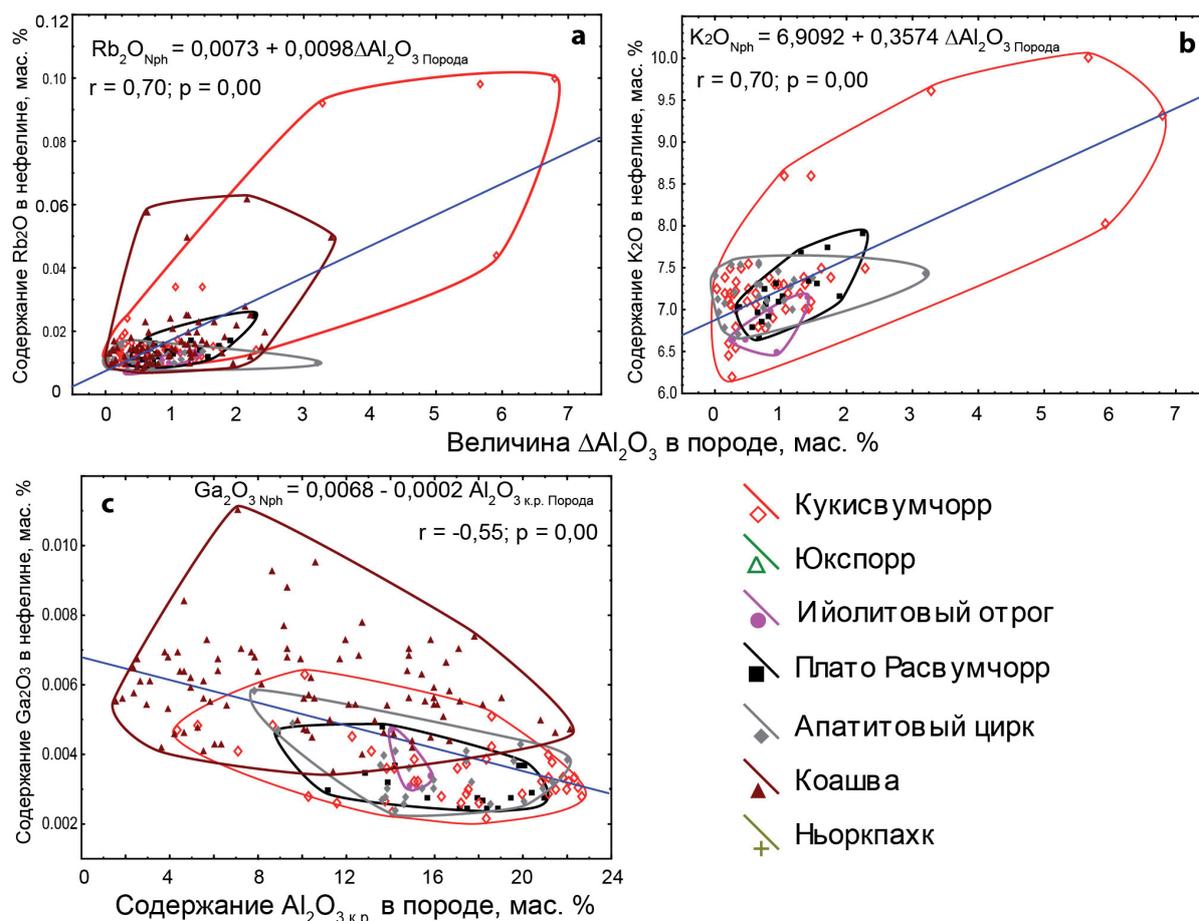


Рис. 2. Зависимости содержаний Rb<sub>2</sub>O (а) и K<sub>2</sub>O (б) в нефелине от величины ΔAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в породе и Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в нефелине от содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3 к.р.</sub> в породе.

Fig. 2. Rb<sub>2</sub>O (a) and K<sub>2</sub>O (b) concentrations in nepheline vs. ΔAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents in the rock and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentrations (c) in nepheline vs. Al<sub>2</sub>O<sub>3 a.s.</sub> contents in the rock.

Концентрация фтора в апатите связана прямо пропорциональной зависимостью с содержанием P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (апатита) в породе: чем беднее руда, тем меньше фтора в составе апатита.

### Попутные компоненты в нефелине

Вторым по значимости и востребованности промышленно ценным минералом является нефелин, концентрирующий в себе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Rb<sub>2</sub>O и Cs<sub>2</sub>O. Содержание алюминия в нефелине определяется изоморфизмом по известной схеме:



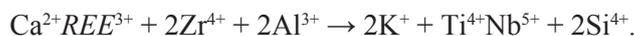
сопровождающей уменьшение температуры кристаллизации минерала (Яковенчук и др., 2010). Это означает, что в наиболее поздних фойдолитах и апатит-нефелиновых рудах нефелин содержит повышенное относительно вмещающих нефелиновых сиенитов количество алюминия и калия (а также Ga и Rb, которые скоррелированы с калием [ $r = 0.21$  и  $r = 0.8$  соответственно]), и Cs).

При изучении нефелина из пород месторождений Олений Ручей и Коашва была выявлена высоко значимая положительная корреляционная зависимость между содержанием рубидия в нефелине и количеством полевого шпата в породе (Иванов, 1987). На рисунке 2 показаны зависимости содержаний Rb<sub>2</sub>O (рис. 2 а) и K<sub>2</sub>O (рис. 2 б) в нефелине от величины ΔAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в породе. Положительная корреляция этих параметров показывает, что вовлечение в отработку бедных руд с высоким содержанием полевошпатсодержащих ийолит-уртитов приведёт к увеличению содержания Rb<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O в составе нефелинового концентрата.

Для оценки содержания галлия в нефелине можно использовать его связь с содержанием  $Al_2O_{3к.р.}$  (нефелина) (рис. 2с). Сложнее обстоит дело с оценкой содержания  $Cs_2O$  в нефелине. При обработке имеющегося массива данных по составу нефелина удалось установить значимую корреляционную связь содержания  $Cs_2O$  только с содержанием  $Rb_2O$  в нефелине ( $r = 0.71$ ).

### Попутные компоненты в титаните

Изменение состава хибинского титанита при переходе от нефелиновых сиенитов к фойдолитам и апатито-нефелиновым породам определяется изоморфизмом по сложной схеме:



В результате, титанит апатито-нефелиновых руд и ийолит-уртитов оказывается заметно обогащённым титаном и, в меньшей степени, ниобием по сравнению с титанитом нефелиновых сиенитов (Иванюк и др., 2016).

Содержание  $TiO_2$  в титаните не имеет значимых связей ни с одним компонентом рядового опробования, а вот для содержания  $Nb_2O_5$  в титаните выявлены хоть и слабые, но значимые корреляционные зависимости от содержаний  $P_2O_5$  и  $Al_2O_{3общ.}$  в породе (рис. 3).

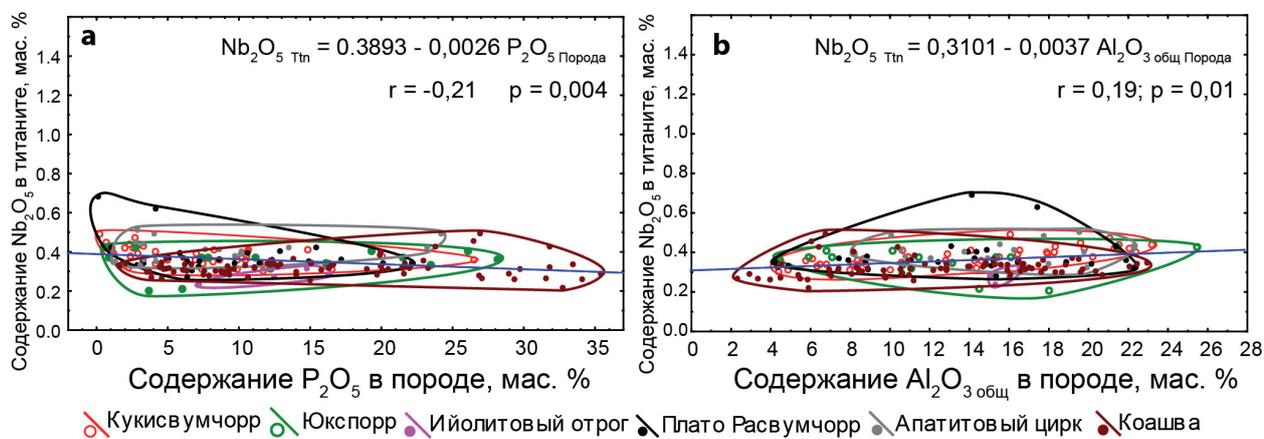


Рис. 3. Зависимость содержания  $Nb_2O_5$  в титаните от содержания  $P_2O_5$  (а) и  $Al_2O_{3общ.}$  (б) в породе.

Fig. 3.  $Nb_2O_5$  concentrations in titanite vs.  $P_2O_5$  (a) and  $Al_2O_3$  (b) contents in the rock.

### Попутные компоненты в титаномagnetите

Хибинский титаномagnetит представляет собой полную серию твёрдых растворов магнетит–ульвошпинель, обычно подвергшихся окси-экссольюционному распаду с выделением ильменита (Иванюк и др., 2006). Содержание диоксида титана в его составе варьирует в широких пределах 3-30 мас. %, что приводит к существенному дефициту железа в хибинском титаномagnetитовом концентрате по сравнению с ковдорским и оленегорским.

Содержание  $Fe_{общ.}$  в магнетите имеет очень слабую, но значимую корреляционную связь с содержанием  $Al_2O_{3общ.}$  в породе (рис. 4а). Такая же слабая, но значимая связь отмечается между содержанием  $TiO_2$  в магнетите и содержанием  $P_2O_5$  в породе (рис. 4б). В большей степени содержание  $TiO_2$  в магнетите зависит от содержания  $TiO_2$  в породе (рис. 4с).

### Выводы

Полученные данные являются предварительными и отражают лишь общие закономерности изменения состава промышленно-ценных минералов. Следует отметить, что использование множественной регрессии, равно как и применение нелинейных моделей, могут существенно повысить точность расчётов (Иванов, 1987). На данном этапе при недостаточном количестве данных о составе минералов по отдельным месторождениям и разновидностям пород мы сочли использование более сложных моделей излишним.

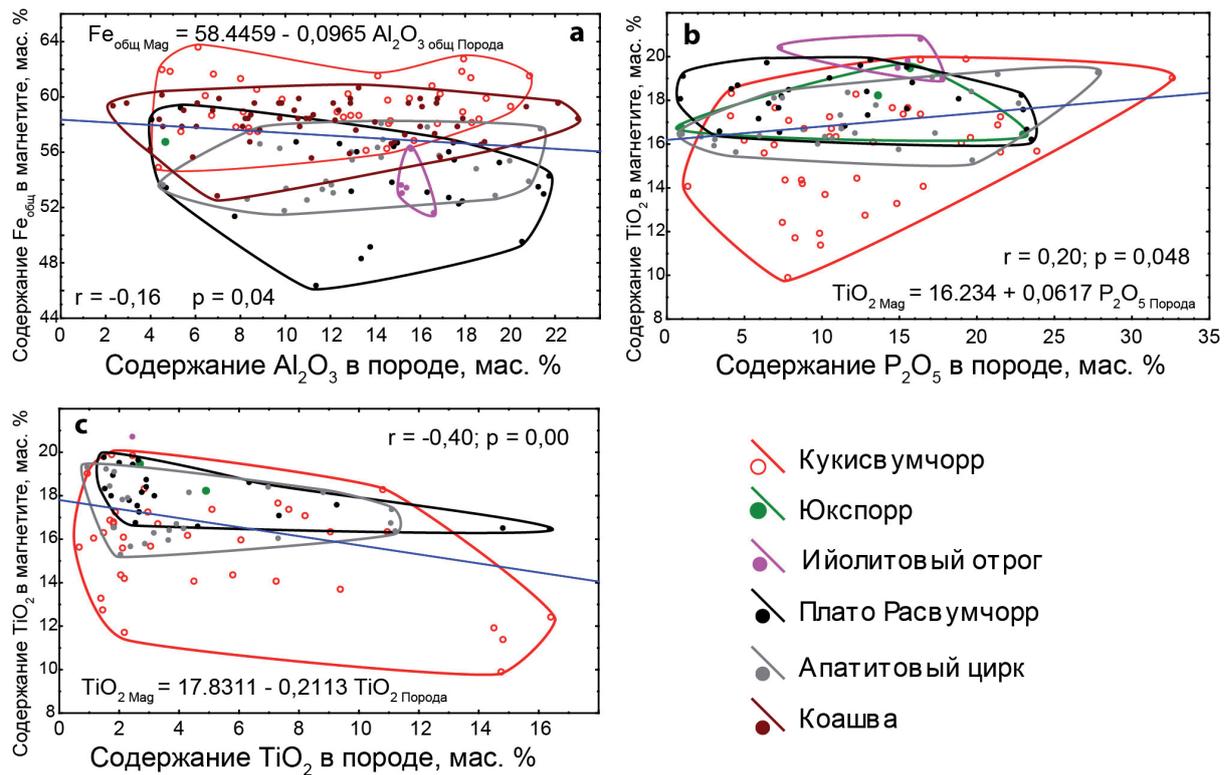


Рис. 4. Зависимость содержания  $Fe_{общ}$  в магнетите от содержания  $Al_2O_{3общ}$  в породе (a); содержания  $TiO_2$  в магнетите от содержания  $P_2O_5$  (b) и содержания  $TiO_2$  (c) в породе.

Fig. 4.  $Fe_{общ}$  concentrations in magnetite vs.  $Al_2O_3$  contents in the rock (a) and  $TiO_2$  concentrations in magnetite vs.  $P_2O_5$  (b) and  $TiO_2$  (c) contents in the rock.

Статистически значимые корреляционные связи позволяют использовать уравнения регрессии от базовых компонентов рядового опробования для оценки содержаний попутных элементов в промышленно-ценных минералах апатито-нефелиновых руд при условии создания представительных эталонных выборок по всем разновидностям пород и руд каждого из месторождений.

Исследования проводились в рамках научных тем ФИЦ КНЦ РАН 0226-2019-0051 и 0226-2018-0003 (Программа Президиума РАН I-48) при финансовой поддержке ОАО «Апатит».

### Литература

1. Иванов С.Н. Оптимизация методики разведки и подсчёта запасов комплексных апатито-нефелиновых месторождений. Дисс. на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. М. 1987. 259 с.
2. Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Яковенчук В.Н., Базай А.В., Калашников А.О. Самоорганизация рудных комплексов. М. Геокарт-Геос. 2009. 392 с.
3. Иванюк Г.Ю., Коноплева Н.Г., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Михайлова Ю.А., Базай А.В. Титанит Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров): новые данные // ЗРМО. 2016. № 3. С. 36–55.
4. Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Яковенчук В.Н., Меньшиков Ю.П., Михайлова Ю.А. Минералы группы шпинели в породах Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2006. № 5. С. 64–75.
5. Коноплева Н.Г., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Корчак Ю.А. Типоморфизм фторапатита в Хибинском щелочном массиве (Кольский полуостров, Россия) // Записки РМО. 2013. № 3. С. 65–83.
6. Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Коноплева Н.Г., Корчак Ю.А., Пахомовский Я.А. Нефелин Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2010. № 2. С. 80–91.