

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ИВАНЮКИТА: КРИСТАЛЛОХИМИЯ И  
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

**Паникоровский Т.Л., Яничева Н.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А.,  
Иванюк Г.Ю., Кривовичев С.В.**

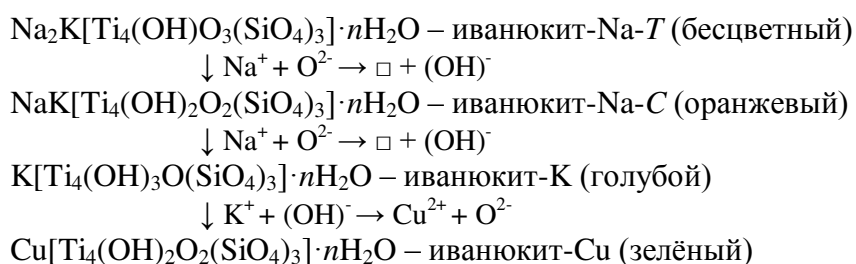
Санкт-Петербургское отделение. Санкт-Петербургский Государственный Университет.  
Кольское отделение. Геологический институт Кольского научного центра РАН. Апатиты.

MINERALS OF THE IVANYUKITE GROUP: CRYSTAL CHEMISTRY AND  
PERSPECTIVES OF USE

**Panikorovskii T.L., Yanicheva N.Y., Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Ya.A.,  
Ivanyuk G.Yu., Krivovichev S.V.**

Saint Petersburg branch. Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia. Kola branch.  
Geological Institute, Kola Science Centre of RAS. Apatity, Russia

В 2009 г. были открыты 4 минерала группы иванюкита (рис. 1): иванюкит-*Na-T*, иванюкит-*Na-C*, иванюкит-Кииванюкит-*Cu* (Yakovenchuk et al., 2009), – первый из которых является первичным минералом, а остальные сформировались вследствие сопряжённых процессов протонирования и катионного обмена:



В этой же ассоциации присутствует ещё не утверждённый ММА Th-аналог иванюкита-*K*, представляющий собой продукт катионного обмена по схеме  $2\text{K}^+ + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{Th}^{4+} + 2\text{O}^{2-}$ . Цезиевая обменная форма иванюкита-*K* получена посредством взаимодействия последнего с 1М раствором CsCl в течение суток.

Кристаллические структуры иванюкита-*Na-T*, иванюкита-*K*, Th-содержащего иванюкита и Cs-замещённого иванюкита-*K* (Рис. 1) решены с использованием CCD-дифрактометра Oxford Diffraction Super Nova (СПбГУ) с  $\text{MoK}\alpha$  излучением, при силе тока на катоде 1.5 мА, ускоряющем напряжении 40 кВ, шагом сканирования  $1^\circ$  и экспозицией 115-1100 с на фрейм в диапазоне углов  $2\theta$   $7.0-55.0^\circ$ . Для введения поправки на поглощение и уточнение структуры использованы программы CrysAlisPro и SHELX.

В ходе катионного обмена между иванюкитом-*Na-T* и водным раствором CsCl установлено, что при удалении части катионов  $\text{Na}^+$  из каналов титаносиликатного каркаса, сопровождающегося миграцией катионов калия в

центральную позицию K1, происходит переход соединения в кубическую модификацию. Замещение катионов  $K^+$  на катионы  $Cs^+$  происходит без изменения симметрии титаносиликатного каркаса, однако существенно изменяется конфигурация канальных позиций. Катионы  $Cs^+$  занимающие расщепленные позиции в центре каналов, с 32-процентной заселенностью координированы 12-ю низкокзаселенными молекулами воды. Катионы  $K^+$  в структуре иванюкита-К имеют 4 связи K1- $H_2O$  длиной 3.230(3) Å и 8 связей с атомами кислорода каркаса длиной K1-O равной 3.274(4) Å, аналогичную позицию занимают катионы  $Th^{4+}$  с 15% заселенностью в структуре Th-содержащего иванюкита.

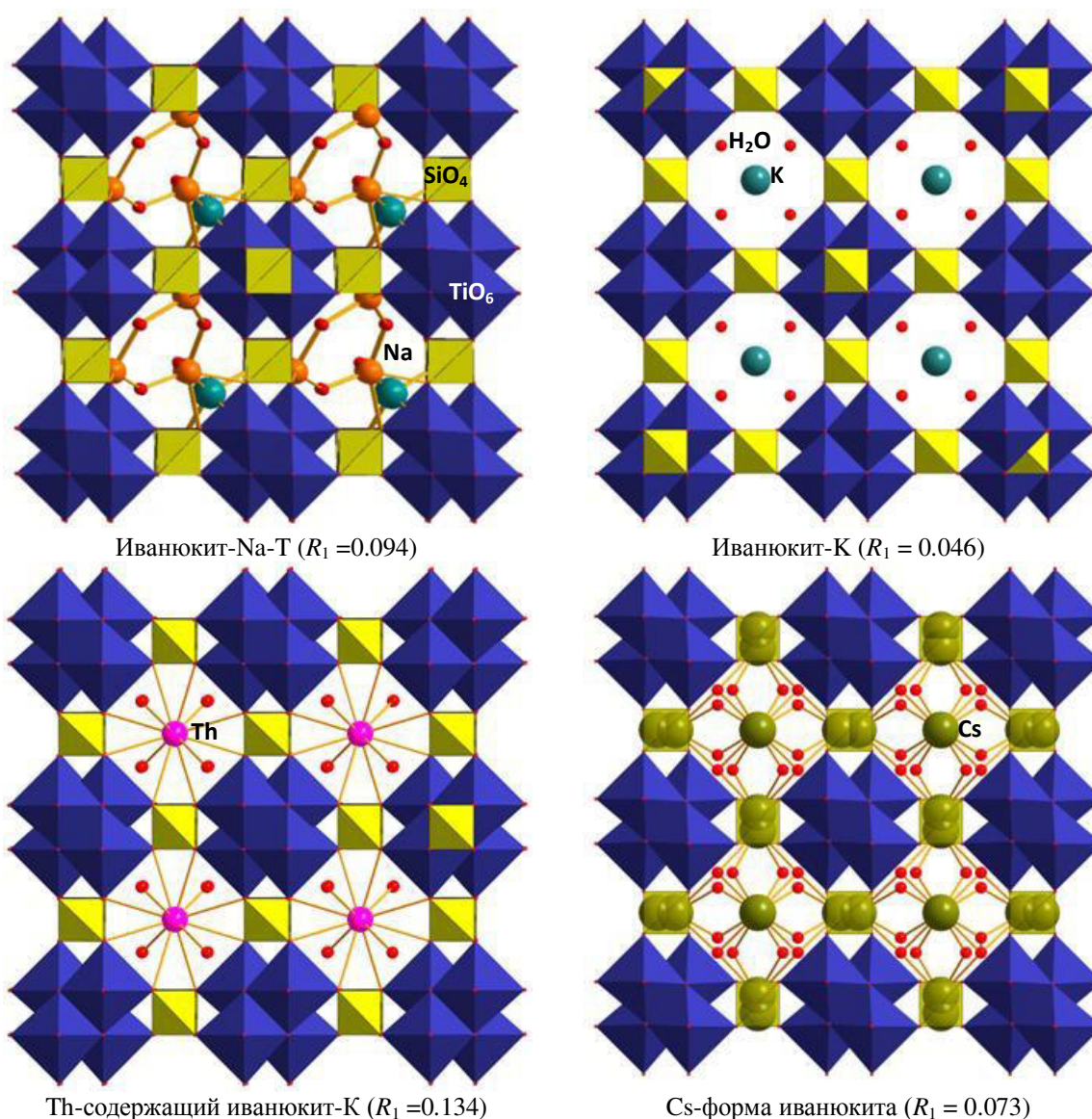


Рис. 1. Кристаллические структуры природных иванюкита-Na-T, иванюкита-K, Th-аналога иванюкита-Ки Cs-замещённого иванюкита-K.

Полученные результаты подтвердили обменный механизм сорбции Cs и Th на иванюките и перспективы использования синтетического иванюкита (SIV) для очистки ЖРО. Эксперименты по сорбции  $^{90}Cs$  и  $^{137}Cs$  из модельных и реальных

ЖРО и кубовых остатков РБМК и ВВЭР на SIV показали его высокую эффективность, причём отработанный сорбент легко переводится нагреванием до 1000 °С в титанатную керамику Синрок-типа (с сокращением объёма РАО в 200–1000 раз) для последующего длительного хранения или использования в качестве радиоизотопных источников энергии (Britvin et al., 2016; Milyutin et al., 2017).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН.*

*Britvin S.N. et al. Application of Titanium-Containing Sorbents for Treating Liquid Radioactive Waste with the Subsequent Conservation of Radionuclides in Synroc Titanate Ceramics // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2016, Vol. 50, No. 4, pp. 599–607.*

*Milyutin V.V. et al. Sorption of cesium and strontium radionuclides onto crystalline alkali metal titanates // Radiochemistry, 2017. V. 59. №. 1. P. 65–69.*

*Yakovenchuk V.N. et al. Ivanyukite-Na-T, ivanyukite-Na-C, ivanyukite-K, and ivanyukite-Cu: New microporous titanates from the Khibiny massif (Kola Peninsula, Russia) and crystal structure of ivanyukite-Na-T // American Mineralogist. 2009. Vol. 94. P. 1450–1458.*