

ЗАПИСКИ
РОССИЙСКОГО
МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО
ОБЩЕСТВА

2014
ЧАСТЬ СТО СОРОК ТРЕТЬЯ



НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ И НОМЕНКЛАТУРА МИНЕРАЛОВ

УДК 549.646 + 548.3 (430.123)

© Д. чл. Н. В. ЧУКАНОВ, * С. М. АКСЕНОВ, ** д. чл. И. В. ПЕКОВ, ***
Б. ТЕРНЕС, **** В. ШЮЛЛЕР, ***** д. чл. Д. И. БЕЛАКОВСКИЙ, *****
К. В. ВАН, ***** Г. БЛАСС *****

ФЕРРОИНДИАЛИТ $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ — НОВЫЙ МИНЕРАЛ ГРУППЫ БЕРИЛЛА ИЗ ВУЛКАНИЧЕСКОГО РАЙОНА АЙФЕЛЬ, ГЕРМАНИЯ¹

* Институт проблем химической физики РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка;
e-mail: chukanov@icp.ac.ru

** Институт кристаллографии РАН, 117333, Москва, Ленинский пр., 59

*** Московский университет, геологический факультет, 119991, Москва, Воробьевы горы

**** Bahnhofstrasse 45, 56727 Mayen, Germany

***** Im Straußenpesch 22, 53518 Adenau, Germany

***** Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН, 119071, Москва, Ленинский пр., 18-2

***** Институт экспериментальной минералогии РАН,

142432, Московская обл., г. Черноголовка

***** Merzbachstrasse 6, D-52249, Eschweiler, Germany

Новый минерал ферроиндиалит, Fe^{2+} -доминантный аналог индиалита, найден в обожженном ксенолите глинистой породы из базальта горы Беллерберг близ города Майен (вулканический район Айфель, Рейнланд-Пфальц, Германия). Он образует коричнево-фиолетовые короткопризматические и толстотаблитчатые гексагональные кристаллы размером до 1.5 мм. Эмпирическая формула: $(\text{K}_{0.06}\text{Na}_{0.03})(\text{Fe}_{1.12}\text{Mg}_{0.78}\text{Mn}_{0.10})_{22.00}(\text{Al}_{3.79}\text{Fe}_{0.21}\text{Si}_{4.98}\text{O}_{18})$. Упрощенная формула: $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$. Кристаллическая структура решена. Эталонный образец ферроиндиалита хранится в Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана РАН (Москва), регистрационный номер 4400/1.

Ключевые слова: ферроиндиалит, IMA 2013-016, группа берилла, кристаллическая структура, Айфель, щелочные вулканы, ксенолиты метапелитов.

N. V. CHUKANOV, S. M. AKSENOV, I. V. PEKOV, B. TERNES, W. SCHULLER,
D. I. BELAKOVSKIY, K. V. VAN, G. BLASS. FERROINDIALITE $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$,
A NEW BERYL-GROUP MINERAL FROM THE EIFEL VOLCANIC REGION, GERMANY

The new mineral ferroindialite, a Fe^{2+} -dominant analogue of indialite, has been found in a burnt xenolith of pelitic rock among alkaline basalts. Associated minerals are phlogopite, sanidine, sillimanite, pyroxenes of the enstatite-ferrosilite series, wagnerite, fluorapatite, tridymite, zircon and almandine. Ferroindialite forms short prismatic or thick tabular hexagonal crystals up to 1.5 mm in size. Their color is brownish-violet to gray with violet-blue tint. The mineral is brittle, Mohs' hardness 7. Cleavage is none observed. $D_{\text{meas}} = 2.66(1)$, $D_{\text{calc}} = 2.667 \text{ g/cm}^3$. IR spectrum shows the absence of

¹ Новый минеральный вид ферроиндиалит и его название одобрены Комиссией по новым минералам РМО и утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов Международной минералогической ассоциации 1 мая 2013 г., IMA No. 2013-016.

H_2O or OH groups. Ferroindialite is anomalously biaxial (-), $\alpha = 1.539(2)$, $\beta = 1.552(2)$, $\gamma = 1.554(2)$, $2V_{\text{meas}} = 30(10)^\circ$. Pleochroism is weak, from colorless on X to pale violet on Z. Dispersion is weak, $r < v$. Chemical composition (electron microprobe, mean of 5 analyses, wt %) is: Na_2O 0.14, K_2O 0.46, MgO 4.95, MnO 1.13, FeO 12.66, Fe_2O_3 2.64, Al_2O_3 30.45, SiO_2 47.22, total 99.65. Distribution of total iron content between Fe^{2+} and Fe^{3+} was carried out according to structural data. The empirical formula of ferroindialite is: $(\text{K}_{0.06}\text{Na}_{0.03})(\text{Fe}_{1.12}\text{Mg}_{0.78}\text{Mn}_{0.10})_{22.00}(\text{Al}_{3.79}\text{Fe}_{0.21}\text{Si}_{4.98}\text{O}_{18})$. The simplified formula is: $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$. The crystal structure has been refined on a single crystal, $R = 0.049$. Ferroindialite is hexagonal, space group $P6/mcc$; $a = 9.8759(3)$, $c = 9.3102(3) \text{ \AA}$, $V = 786.40(3) \text{ \AA}^3$, $Z = 2$. The strongest lines of the X-ray powder diffraction pattern [d , \AA , (I, %) (hkl)] are: 8.59 (100) (100), 4.094 (27) (102), 3.390 (35) (112), 3.147 (19) (202), 3.055 (31) (211), 2.657 (12) (212), 1.695 (9) (224). Type specimen of ferroindialite is deposited in the Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, with registration number 4400/1.

Key words: ferroindialite, IMA 2013-016; beryl group, crystal structure, Eifel, alkaline volcanic rocks, xenoliths of metapelites.

Описываемый в настоящей статье новый минерал ферроиндиалит принадлежит к группе берилла, которая объединяет структурно близкие гексагональные силикаты с параметрами элементарных ячеек $a = 9.15\text{—}9.83$, $c = 9.10\text{—}9.37 \text{ \AA}$ и упрощенной общей формулой $M_2T1_3(T2_6O_{18})$, где M — октаэдрически координированные катионы Al^{3+} , Sc^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} ; $T1$ — катионы Al^{3+} , Be^{2+} , Li^+ , имеющие тетраэдрическую координацию; $T2$ — тетраэдрически координированные атомы (Si, Al). Тетраэдры $T1$ объединяют шестерные кольца $T2_6O_{18}$ в трехмерный каркас, поэтому минералы группы берилла в свете современных кристаллохимических классификаций более корректно рассматривать как каркасные берилло- и алюмосиликаты, нежели как кольцевые силикаты. В каналах каркаса могут находиться, обычно в небольших количествах, катионы щелочных и щелочноземельных элементов (Na, K, Cs, Rb; Ca и, возможно, Mg), молекулы воды и различных газов. В группу берилла кроме ферроиндиалита входят изоструктурные минералы берилл $\text{Al}_2\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})$, бацит $\text{Sc}_2\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ и индиалит $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$. К этим минералам структурно близки пеззоттаит $\text{CsAl}_2\text{LiBe}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ и стоппаниит $\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Fe}_3^+\text{Be}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Эталонный образец ферроиндиалита передан в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН (Москва), регистрационный номер 4400/1.

УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ, МОРФОЛОГИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Ферроиндиалит найден в действующем базальтовом карьере Каспар (Caspar) на горе Беллерберг (Bellerberg) близ города Майен (Mayen), вулканический район Айфель (Eifel), земля Рейнланд-Пфальц, Германия. Этот минерал образует коричнево-фиолетовые до серых с фиолетово-синим оттенком короткопризматические и толстотаблитчатые гексагональные кристаллы размером до 1.5 мм, нарастающие на стенки полостей в метаморфизованном ксенолите глинистой породы (рис. 1), а также массивные агрегаты в этом ксенолите. В ассоциации с ферроиндиалитом присутствуют белые волокнистые агрегаты силлиманита и кристаллы санидина, флогопита, пироксенов ряда энстатит—ферросилит, вагнерита, фтороапатита, тридимита, циркона и высокомагнезиевого альмандина.

Кристаллы ферроиндиалита имеют простую огранку — наблюдаются только грани гексагональной призмы {110} и пинакоида {001}.

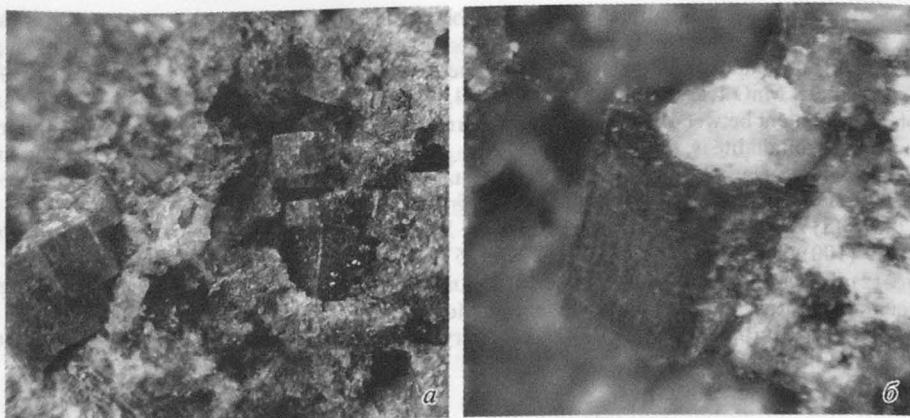


Рис. 1. Кристаллы ферроиндиалита. Ширина изображения 4 мм (а) и 1 мм (б).

Fig. 1. Crystals of ferroindialite. View fields 4 mm (a) and 1 mm (b).

Блеск минерала стеклянный, черта белая. Твердость по шкале Мооса равна 7. Ферроиндиалит хрупкий, с раковистым изломом. Спайность не наблюдается. Плотность, измеренная методом уравнивания в тяжелых жидкостях, составляет 2.66(1) г/см³. Плотность, вычисленная из эмпирической формулы и параметров элементарной ячейки, равна 2.667 г/см³.

По ИК-спектру ферроиндиалит близок индиалиту (рис. 2). Наибольшие различия наблюдаются между положениями полос, относящихся к колебаниям с участием октаэдров (Fe, Mg)O₆. Положение (см⁻¹) и отнесения полос ИК-спектра ферроиндиалита следующие (s — сильная полоса, w — слабая полоса, sh — плечо): 1171s, 1143s, (Si—O-валентные колебания), 1025, 961s, 909 (валентные колебания тетраэдрического каркаса), 759, 675w, 639w, 575, (смешанные колебания тетраэдрического каркаса), 481, 435sh, 416s [комбинация деформационных колебаний Si—O—Si и Si—O—Al и валентных колебаний октаэдров (Fe, Mg)O₆]. Полос с волновыми числами выше 1180 см⁻¹ в ИК-спектре ферроиндиалита не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии в минерале H-, B- и C-содержащих групп.

Ферроиндиалит оптически аномально двуосный отрицательный, $n_p = 1.539(2)$, $n_m = 1.552(2)$, $n_g = 1.554(2)$. $2V_{изм} = 30(10)^\circ$, $2V_{выч} = 43^\circ$. Плеохроизм слабый: минерал бесцветный вдоль X, бледно-фиолетовый вдоль Z. Дисперсия оптических осей слабая, $r < v$.

Отметим, что аномальная двуосность не является редкостью для различных гексагональных и тригональных минералов (в том числе членов групп берилла, осумилита, нефелина, эвдиалита, турмалина, апатита). В частности, двуосность наблюдалась для индиалита («гексагонального кордиерита») из метеорита Альенде (с $2V$ от около 20° : Fuchs, 1969) и для синтетического аналога индиалита (с $2V$ от 8 до 82° : Miyashira, Iiyama, 1954). Многочисленные примеры аномальной двуосности берилла приведены в справочнике «Минералы» (1981). Различные причины этого явления (деформация кристалла, зональность состава и упорядоченность структурных элементов, полисинтетическое двойникование, включения различной природы) подробно рассмотрены в монографии (Shtukenberg et al., 2007). Принимая во внимание тот факт, что признаки двойникования или гетерофазности у ферроиндиалита не выявлены ни при микроскопических наблюдениях, ни по данным рентгенострук-

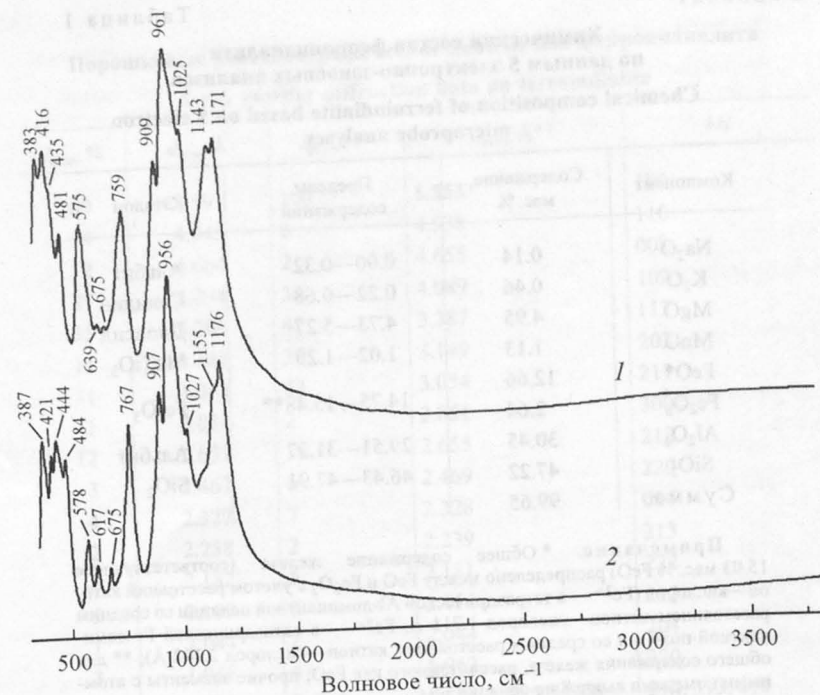


Рис. 2. ИК-спектры ферроиндиалита (1) и индиалита [эмпирическая формула $(K_{0.07}Na_{0.04})(Mg_{1.85}Fe_{0.14}Mn_{0.01})(Al_{3.82}Fe_{0.16}Ti_{0.02})(Si_{4.80}Al_{0.20})O_{18}$; параметры элементарной ячейки по данным изучения монокристалла: $a = 9.803$, $c = 9.350 \text{ \AA}$] из карьера Никенихер Вайнберг (Nickenicher Weinberg), Айфель, Германия (2).

Fig. 2. IR spectra of ferroindialite (1) and indialite (2) from Nickenicher Weinberg open-pit, Eifel, Germany [empirical formula: $(K_{0.07}Na_{0.04})(Mg_{1.85}Fe_{0.14}Mn_{0.01})(Al_{3.82}Fe_{0.16}Ti_{0.02})(Si_{4.80}Al_{0.20})O_{18}$; unit cell parameters according to the monocrystal study: $a = 9.803$, $c = 9.350 \text{ \AA}$].

турного анализа, можно предположить, что двуосность этого минерала связана с распределением внекаркасных катионов, с зональностью (по степени катионной упорядоченности либо по соотношению $Fe^{2+}:Fe^{3+}$ — см. также: Goldman, Rossmann, 1978) или же с микронапряжениями, вызванными быстрой кристаллизацией и последующим быстрым охлаждением.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав ферроиндиалита изучен методом локального рентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega II XMU с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCAx-16sight. Анализ выполнен при ускоряющем напряжении на вольфрамовом катоде 15.7 кВ и токе поглощенных электронов на эталоне Co 0.5 нА. Угол отбора рентгеновского излучения — 35° , фокусное расстояние между образцом и детектором — 25 мм.

Ввиду отсутствия в ИК-спектре ферроиндиалита характерных полос H-, B- и C-содержащих групп, определений H_2O , B_2O_3 и CO_2 не проводилось.

Результаты электронно-зондового анализа минерала приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав ферроиндиалита
по данным 5 электронно-зондовых анализов

Chemical composition of ferroindialite based on 5 electron
microprobe analyses

Компонент	Содержание, мас. %	Пределы содержаний	Эталон
Na ₂ O	0.14	0.00—0.32	Альбит
K ₂ O	0.46	0.22—0.68	Санидин
MgO	4.95	4.73—5.27	Диопсид
MnO	1.13	1.02—1.29	MnTiO ₃
FeO*	12.66		
Fe ₂ O ₃ *	2.64	14.75—15.48**	Fe ₂ O ₃
Al ₂ O ₃	30.45	29.51—31.37	Альбит
SiO ₂	47.22	46.43—47.91	SiO ₂
Сумма	99.65		

Примечание. * Общее содержание железа (соответствующее 15.03 мас. % FeO) распределено между FeO и Fe₂O₃ с учетом расстояний катион—кислород (Fe³⁺ — в тетраэдрической Al-доминантной позиции со средним расстоянием катион—кислород 1.711 Å, Fe²⁺ — в октаэдрической Fe-доминантной позиции со средним расстоянием катион—кислород 2.142 Å); ** для общего содержания железа, рассчитанного как FeO; прочие элементы с атомными номерами выше 8 не обнаружены.

Эмпирическая формула ферроиндиалита, рассчитанная на 18 атомов O, такова: (K_{0.06}Na_{0.03})(Fe²⁺_{1.12}Mg_{0.78}Mn_{0.10})_{Σ2.00}(Al_{3.79}Fe³⁺_{0.21})_{Σ4.00}Si_{4.98}O₁₈. Общее содержание Mg+Mn+Al+Fe+Si при таком способе расчета формулы составляет 10.98, что хорошо согласуется с предположением о распределении Fe²⁺ и Fe³⁺ по позициям кристаллической структуры (см. ниже описание структуры и комментарий к табл. 1). Кроме того, соотношение Fe²⁺ : Fe³⁺ = 1.12 : 0.21 подтверждается очень хорошей сходимостью физических свойств и химического состава по критерию Гладстоуна-Дейла (1-K_p/K_c) = 0.003 («superior»).

Упрощенная формула ферроиндиалита, выведенная с учетом структурных данных, (Fe²⁺,Mg)₂Al₄Si₅O₁₈.

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Рентгенограмма порошка ферроиндиалита (табл. 2) получена с помощью монокристалльного дифрактометра Stoe IPDS II с плоским детектором захвата сигнала (image plate), на MoK_α-излучении, при ускоряющем напряжении 45 кВ и токе 30 мА. Съемка проводилась по методу Гандольфи с вращением образца по двум осям, расстояние образец—детектор 200 мм, время экспозиции 30 мин.

Все рефлексы хорошо индицируются в гексагональной ячейке с уточненными по порошковым данным параметрами: $a = 9.876(5)$, $c = 9.317(6)$ Å, $V = 787(1)$ Å³.

Монокристалльные дифракционные данные получены на дифрактометре Xcalibur Oxford Diffraction (CCD-detector) с использованием MoK_α-излучения. Вычисленные по ним параметры гексагональной (пространственная группа

Таблица 2

Порошковые рентгенографические данные для ферроиндиалита
X-ray powder diffraction data on ferroindialite

I _{изм.} %	d _{изм.} Å	I _{выч.} %*	d _{выч.} Å**	hkl
100	8.59	100	8.553	100
4	4.945	6	4.938	110
2	4.664	2	4.655	002
27	4.094	34	4.089	102
35	3.390	42	3.387	112
19	3.147	26	3.149	202
31	3.055	43	3.054	211
1	2.854	2	2.851	300
12	2.657	19	2.655	212
3	2.467	6	2.469	220
4	2.327	7	2.328	004
2	2.238	2	2.239	213
4	2.182	6	2.181	222
5	2.109	8	2.114	312
1	2.044	2	2.044	204
3	1.958	4	1.962	320
6	1.880	2, 7, 5	1.889, 1.885, 1.866	214, 313, 410
4	1.804	6	1.803	304
4	1.724	3	1.732	412
9	1.695	17	1.694	224
1	1.658	2, 1	1.661, 1.659	314, 323
3	1.598	5	1.599	413
1	1.554	3, 1	1.552, 1.552	332, 006
1	1.532	0.5, 0.5	1.527, 1.527	422, 106
2	1.500	6	1.500	324
1	1.481	3	1.480	116
2	1.455	5, 1	1.459, 1.459	512, 206
1	1.399	4	1.399	216
2	1.371	3	1.370	520
4	1.358	9, 3	1.363, 1.355	602, 521
1	1.330	4	1.328	424
2	1.316	1, 1, 3	1.318, 1.314, 1.314	415, 522, 226
1	1.299	2	1.299	316
1	1.230	3	1.230	217
1	1.206	3	1.204	434
2	1.197	3	1.193	442
1	1.185	0.5, 0.5	1.186, 1.182	620, 532
1	1.177	4	1.180	524
1	1.166	2	1.164	008

Примечание. * Для вычисленной порошкограммы приведены только отражения с I_{выч.} ≥ 0.5; ** вычислено из параметров элементарной ячейки, определенной по монокристалльным данным.

Таблица 3

Основные кристаллографические характеристики ферроиндиалита
и данные монокристалльного эксперимента

Principal crystallographic characteristics of ferroindialite
and data of the monocrystal experiment

$a, \text{Å}$	9.8759(3)
$c, \text{Å}$	9.3102(3)
$V, \text{Å}^3$	785.40(3)
Пространственная группа	$P6/mcc$
Z	2
Коэффициент поглощения (см^{-1})	2.044
$D_{\text{выч}} (\text{г}/\text{см}^3)$	2.661
Размеры кристалла (мм)	0.23×0.25×0.25
Дифрактометр	Xcalibur Oxford Diffraction (CCD-detector)
Излучение	$\text{MoK}\alpha$
θ_{max}	45.32
R_{int}	13.25
Общее количество отражений: $ F_{\text{all}} $	43395
Количество независимых отражений: $F > 3\sigma(F)$	753
Метод уточнения	Метод наименьших квадратов по F
Окончательный R -фактор (%)	4.9
wR (%)	6.8
Goof	0.98
Программа	Jana2006

$P6/mcc$ ячейки составили: $a = 9.8759(3)$, $c = 9.3102(3) \text{ Å}$, $V = 786.40(3) \text{ Å}^3$, $Z = 2$. Кристаллическая структура ферроиндиалита решена методом перебора заряда («Charge Flipping») и уточнена по программе Jana2006 (Petříček et al., 2006) в анизотропном приближении с использованием 753 независимых отражений с $F > 3\sigma(F)$ (табл. 3—6, рис. 3). Окончательный R -фактор уточнения составил 4.9 %.

Ферроиндиалит изоструктурен с индиалитом (Meagher, Gibbs, 1977). В ферроиндиалите в полостях трехмерного каркаса, образованного шестичленными тетраэдрическими кольцами и одиночными тетраэдрами (Al,

Таблица 4

Координаты позиций, их кратности
и эквивалентные параметры смещений (Å^2) для ферроиндиалита

Coordinates of sites, their multiplicities
and equivalent displacement parameters (Å^2) for ferroindialite

Позиция	x/a	y/b	z/c	Q	U_{eq}
K	0	0	1/2	2	0.023(5)
Fe	2/3	1/3	1/4	4	0.0084(1)
Al	1/2	0	1/3	6	0.0091(2)
Si	0.3703(1)	0.1040(1)	0	12	0.0097(2)
O1	0.3124(3)	0.2320(4)	0	12	0.0238(8)
O2	0.4821(2)	0.1326(2)	0.1452(1)	24	0.0139(3)

Таблица 5

Анизотропные параметры смещений атомов (Å^2) для ферроиндиалита

Anisotropic parameters of atoms displacements (Å^2) for ferroindialite

Позиция	U_{11}	U_{22}	U_{33}	U_{12}	U_{13}	U_{23}
K	0.020(6)	0.020(6)	0.03(1)	0.010(3)	0	0
Fe	0.0088(2)	0.0088(2)	0.0077(2)	0.0044(1)	0	0
Al	0.0101(2)	0.0088(3)	0.0081(2)	0.0044(2)	0	0
Si	0.0149(2)	0.0094(2)	0.0070(2)	0.0078(2)	0	0
O1	0.029(1)	0.034(1)	0.0194(6)	0.024(1)	0	0
O2	0.0180(4)	0.0158(4)	0.0109(3)	0.0108(3)	-0.0063(3)	-0.0036(3)

Таблица 6

Заселенности позиций и некоторые межатомные расстояния (Å)
для ферроиндиалита

Populations of sites and some inter-atomic distances (Å)
for ferroindialite

Катионная позиция	Уточненный состав катионной позиции ($Z=2$)	Анионная позиция	Расстояние катион—кислород
K	$\text{K}_{0.06}$	O1	$2.772(4) \times 6$
Fe	$\text{Fe}_{1.15}^{2+}\text{Mg}_{0.85}$	O2	$2.142(2) \times 6$
Al	$\text{Al}_{2.76}\text{Fe}_{0.24}^{3+}$	O2	$1.711(2) \times 4$
Si	$\text{Si}_{4.94}\text{Al}_{1.06}$	O1	1.626(4)
		O1	1.642(4)
		O2	$1.678(1) \times 2$

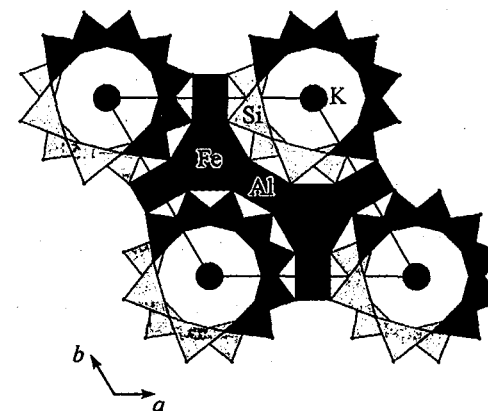
Рис. 3. Кристаллическая структура ферроиндиалита в проекции на плоскость ab .

Fig. 3. Crystal structure of ferroindialite on the ab projection.

Fe^{3+}O_4 , находятся 6-координированные позиции Fe^{2+} (с примесью Mg) и K (заселенная на 6 % и содержащая небольшую примесь Na). Таким образом, ферроиндиалит отличается от индиалита наличием Fe^{2+} -доминантной позиции.

Кристаллохимическая формула ферроиндиалита следующая ($Z = 2$): $\text{K}_{0.06}(\text{Fe}_{1.15}^{2+}\text{Mg}_{0.85})[(\text{Al}_{2.76}\text{Fe}_{0.24}^{3+})(\text{Si}_{4.83}\text{Al}_{1.17})\text{O}_{18}]$, где квадратными скобками выделен тетраэдрический каркас.

ОБСУЖДЕНИЕ

Железистый аналог индиалита был впервые синтезирован Дж. Ф. Шайре-ром и К. Яги (Schairer, Yagi, 1952) и подробно изучен А. Мияширо и Т. Ииямой (Miyashiro, Iiyama, 1954), которые доказали его структурную бли-

Таблица 7

Сравнительные данные для ферроиндиалита и родственных ему минералов
Comparative data for ferroindialite and related minerals

Минерал	Ферроиндиалит	Индиалит	Секанинаит
Формула	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$
Симметрия, пр. гр.	Гексагональная, <i>P6/mcc</i>	Гексагональная, <i>P6/mcc</i>	Ромбическая, <i>Ccct</i>
<i>a</i> , Å	9.8759	9.79—9.86	17.186—17.230
<i>b</i> , Å			9.827—9.835
<i>c</i> , Å	9.3102	9.28—9.36	9.298—9.314
<i>Z</i>	2	2	4
Сильные линии порошковой рентгенограммы:	8.59 (100)	8.48 (100)	8.583 (100)
<i>d</i> , Å (<i>I</i> , %)	4.094 (27)	4.89 (30)	4.081 (83)
	3.390 (35)	4.094 (50)	3.386 (100)
	3.147 (19)	3.379 (55)	3.376 (100)
	3.055 (31)	3.138 (65)	3.143 (64)
	2.657 (12)	3.027 (85)	3.076 (74)
	1.695 (9)	1.688 (30)	3.043 (57)
Оптические характеристики	Двуосный (–) $n_p = 1.539$ $n_m = 1.552$ $n_g = 1.554$ $2V = 30^\circ$	Одноосный (–) $n_e = 1.532—1.539$ $n_o = 1.537—1.541$ или двуосный (–) $n_p = 1.520$, n_m не опр. $n_g = 1.554$ $2V = 20^\circ$ (для природного образца); $2V$ от 8 до 82° для синтетических аналогов	Двуосный (–) $n_p = 1.559—1.561$ $n_m = 1.569—1.572$ $n_g = 1.573—1.576$ $2V = 66—70^\circ$
Плотность, г/см ³	2.66 (изм.) 2.667 (выч.)	2.512 (изм.) 2.49—2.59 (выч.)	2.76—2.77 (изм.) 2.78 (выч.)
Ссылка	Настоящая работа	Miyashiro, Iiyama, 1954; Miyashiro et al., 1955; Fuchs, 1969; Минералы, 1981; Meagher, Gibbs, 1977	Stanek, Miskovsky, 1975; Hochella et al., 1979; Минералы, 1981

зость к природному индиалиту. Параметры гексагональной ячейки синтетического аналога ферроиндиалита равны: $a = 9.860$, $c = 9.285$ Å. Порошковая и особенно монокристалльная рентгенография являются диагностическими методами, позволяющими идентифицировать представителей диморфных пар — отличать гексагональные индиалит и ферроиндиалит от их ромбических аналогов — кордиерита и секанинаита соответственно. Сравнительные характеристики ферроиндиалита, индиалита и секанинаита приведены в табл. 7.

Индиалит в отличие от его ромбического диморфа кордиерита метастабилен и при длительном нагревании при 830°C и давлении 1 кбар превращается в последний (Yoder, 1952). При давлении 5 кбар нижняя по температуре граница стабильности индиалита составляет 550°C . Вследствие своей метастабильности в широком диапазоне условий индиалит — минерал довольно редкий. Большинство его земных находок приурочено к минеральным ассоциациям, связанным с пирогенными породами и прошедшим стадию быстрого остывания — продуктам плавления осадочных пород при горении каменного угля, ксенолитам глинистых пород в базальтах, витрофирам и контактовым роговикам (Miyashiro, Iiyama, 1954; Miyashiro et al., 1955; Минералы, 1981; Kitamura, Hiroi, 1982; Witzke, 1996; Ramesh Kumar, Raju, 1997; Balassone, 2004). Этот минерал отмечен также в нодулях хондрита Альенде (Fuchs, 1969).

Еще более редки высокожелезистые разновидности индиалита, а ферроиндиалит известен пока лишь в единственном описанном выше пирометаморфизованном ксенолите. По-видимому, это связано с тем, что для образования ферроиндиалита требуется не только быстрое понижение температуры на посткристаллизационной стадии (что, как и в случае индиалита, позволяет затормозить переход метастабильной при низких температурах гексагональной фазы в стабильную ромбическую), но и относительно восстановительные условия при достаточно высокой активности Fe^{2+} .

Список литературы

- Минералы. Справочник под ред. Ф. В. Чухрова и Н. Н. Смольяниновой. Т. III(2). М.: Наука, 1981. 614 с.
- Balassone G., Franco E., Mattia C. A., Puliti R. Indialite in xenolithic rocks from Somma-Vesuvius volcano (Southern Italy): Crystal chemistry and petrogenetic features // Amer. Miner. 2004. Vol. 89. P. 1—6.
- Fuchs L. H. Occurrence of cordierite and aluminous orthoenstatite in the Allende meteorite // Amer. Miner. 1969. Vol. 54. P. 1645—1653.
- Goldman D. S., Rossman G. R. The site distribution of iron and anomalous biaxiality of osumilite // Amer. Miner. 1978. Vol. 63. P. 490—498.
- Hochella M. F., jr., Brown G. E., jr., Ross F. K., Gibbs G. V. High-temperature crystal chemistry of hydrous Mg- and Fe-cordierites // Amer. Miner. 1979. Vol. 64. P. 337—351.
- Kitamura M., Hiroi Y. Indialite from Unazuki Pelitic Schist, Japan, and its transition texture to cordierite // Contrib. Miner. Petrol. 1982. Vol. 80. P. 110—116.
- Meagher E. P., Gibbs G. V. The polymorphism of cordierite: II. The crystal structure of indialite // Canad. Miner. 1977. Vol. 15. P. 43—49.
- Miyashiro A., Iiyama T. A preliminary note on a new mineral, indialite, polymorphic with cordierite // Proc. Japan Acad. 1954. Vol. 30. P. 746—751.
- Miyashiro A., Iiyama T., Yamasaki M., Miyashiro T. The polymorphism of cordierite and indialite // Amer. J. Sci. 1955. Vol. 253. P. 185—208.
- Petricek V., Dušek M., Palatinus L. Jana2006. Structure Determination Software Programs. Institute of Physics, Praha, Czech Republic, 2006.

Ramesh Kumar P. V., Raju K. K. V. S. Indialite for cordierite gneisses of Eastern Ghats Mobile Belt, India // *Current Sci.* 1997. Vol. 73. P. 382—385.

Schairer J. F., Yagi K. The system $\text{FeO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ // *Amer. J. Sci.* 1952. Bowen vol. P. 471—512.

Shtuckenberg A., Punin Yu. O., Kahr B. *Optically anomalous crystals*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2007. 279 p.

Stanek J., Miskovsky J. Sekaninaite, a new mineral of the cordierite series, from Dolni Bory, Czechoslovakia // *Scripta Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis Purkynianae Brunensis, Geologia*. 1975. Vol. 1(5). P. 21—30.

Witzke T. Die Minerale der brennenden Halde der Steinkohlengrube «Deutschland-schacht» in Oelsnitz bei Zwickau // *Aufschluss*. 1996. Vol. 47. P. 41—48.

Yoder H. S. The $\text{MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$ system and the related metamorphic facies // *Amer. J. Sci.* 1952. Bowen vol. P. 569—627.

Поступила в редакцию
16 октября 2013 г.