

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ И НОМЕНКЛАТУРА МИНЕРАЛОВ

DEC 10 2013

УДК 549.3 (571.51)

© Д. чл. И. В. ПЕКОВ, * Е. В. СЕРЕДА, ** д. чл. Ю. С. ПОЛЕХОВСКИЙ, *** С. Н. БРИТВИН, ****
д. чл. Н. В. ЧУКАНОВ, ***** В. О. ЯПАСКУРТ, * д. чл. И. А. БРЫЗГАЛОВ

ФЕРРОТОЧИЛИНИТ $6\text{FeS} \cdot 5\text{Fe}(\text{OH})_2$ — НОВЫЙ МИНЕРАЛ ИЗ ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (НОРИЛЬСКИЙ РАЙОН, СИБИРЬ, РОССИЯ)¹

* Московский государственный университет, геологический ф-т, 119991 Москва, Воробьевы горы;
e-mail: igorpekov@mail.ru

** Норильскгеология, п/я 889, 663330, Талнах, Норильск, Красноярский край

*** Санкт-Петербургский государственный университет, геологический ф-т,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

**** Центр исследований природных и синтетических нано- и микропористых веществ КНЦ РАН,
184200, Апатиты, ул. Фермана, 20

***** Институт проблем химической физики РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка

Новый минерал ферроточилинит с идеализированной формулой $6\text{FeS} \cdot 5\text{Fe}(\text{OH})_2$ установлен на Октябрьском месторождении, Норильск, Красноярский край, Сибирь, Россия. Эмпирическая формула, рассчитанная на 6 атомов S: $\text{Mg}_{0.01}\text{Fe}_{10.96}\text{Ni}_{0.005}\text{Cu}_{0.015}\text{S}_6(\text{OH})_{10.07} = (\text{Fe}_{5.98}\text{Cu}_{0.015}\text{Ni}_{0.005})\Sigma_6\text{S}_6 \cdot (\text{Fe}_{4.89}\text{Mg}_{0.01})\Sigma_4\text{Fe}(\text{OH})_{9.80} \cdot \text{F}_{0.09}^{3+}(\text{OH})_{0.27}$. Ферроточилинит моноклинный, пр. гр. $C2/m$, Cm или $C2$, параметры ячейки: $a = 5.463(5)$, $b = 15.865(17)$, $c = 10.825(12)$ Å, $\beta = 93.7(1)^\circ$, $V = 936(3)$ Å³, $Z = 2$. Ферроточилинит — структурный аналог точилинита с Fe^{2+} вместо Mg в гидроксидной части. Эталонный образец передан в Минералогический музей им. А. Е. Фермана РАН в Москве.

Ключевые слова: ферроточилинит, новый минерал, точилинит, гибридный слоистый гидроксид-сульфид, Октябрьское месторождение, Норильск.

I. V. PEKOV, E. V. SEREDA, Yu. S. POLEKHOVSKY, S. N. BRITVIN, N. V. CHUKANOV,
V. O. YAPASKURT, I. A. BRYZGALOV. FERROTOCHILINITE, $6\text{FeS} \cdot 5\text{Fe}(\text{OH})_2$, A NEW MINERAL
FROM OKTYABR'SKOYE ORE DEPOSIT (NORILSK ORE DISTRICT, SIBERIA, RUSSIA)

A new mineral ferrotouchilinite, $6\text{FeS} \cdot 5\text{Fe}(\text{OH})_2$ ideally, has been found at the Oktyabr'skoye copper-nickel deposit in Norilsk ore district, Krasnoyarsky Krai, Russia. In association with ferrotouchilinite, magnetite and Fe-rich chlorite-like phyllosilicate it occurs in cavities of the pentlandite-mooihoekite-cubanite ore with subordinate magnetite and chalcopyrite. Ferrotouchilinite forms then flattened on [001], prismatic to elongated lamellar crystals up to $0.1 \times 0.5 \times 3.2$ mm in size, typically split and curved. Its aggregates (up to 6.5 mm in size) are fan-like, rosette-like or chaotic ones. Ferrotouchilinite is dark bronze-colored. Its streak is black, luster — moderately metallic. The Mohs' hardness ≈ 1 ; VHN is 13 kg/mm². Cleavage is {001} perfect, mica-like. Individuals are flexible, inelastic. $D(\text{calc}) = 3.467$ g/cm³. In reflected light, ferrotouchilinite is gray, with hue changing from pale beige to bluish, with distinct birefractance. Anisotropy is distinct, with gray-bluish to yellowish-beige rotation of colors. No internal reflections. Reflectance values [R_1 — R_2 , % (λ , nm)] are 11.6—11.4 (470), 11.2—12.4 (546), 11.1—13.6 (589), 11.0—15.5 (650). IR spectrum shows the presence of (OH) groups bonded with Fe cations and the absence of H₂O molecules. Chemical composition (wt %; electron probe, the H content calculated) is: Mg 0.02,

¹ Новый минерал ферроточилинит и его название одобрены Комиссией по новым минералам РМО и утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов МАА 21 февраля 2011 г., IMA No. 2010-080.

Fe 61.92, Ni 0.03, Cu 0.09, S 19.45, O 16.3, H_{calc} 103, total 98.84. The empirical formula calculated on the basis of 6 S atoms is: $Mg_{0.01}Fe_{10.96}Ni_{0.005}Cu_{0.015}S_6(OH)_{10.07} = (Fe_{5.98}Cu_{0.015}Ni_{0.005})_{\Sigma 6}S_6 \cdot (OH)_{9.80} \cdot (Fe_{4.89}Mg_{0.01})_{\Sigma 4.90}(OH)_{9.80} \cdot Fe_{0.09}^{3+}(OH)_{0.27}$. Ferrotchilinite is monoclinic, space group $C2/m$, Cm or $C2$; its unit-cell parameters are: $a = 5.463(5)$, $b = 15.865(17)$, $c = 10.825(12)$ Å, $\beta = 93.7(1)^\circ$, $V = 936(3)$ Å³, $Z = 2$. The strongest reflections on the X-ray powder diagram (d , Å— $[hkl]$) are: 10.83—13[001]; 5.392—100[002]; 3.281—7[023]; 2.777—7[150]; 2.696—12[004, 20 $\bar{1}$]; 2.524—12[22 $\bar{1}$, 20 $\bar{2}$]; 2.152—8[134, 153]; 1.837—11[135, 173]. Ferrotchilinite is a structural analogue of tochilinite with Fe²⁺ instead of Mg in the hydroxide part. The type specimen is deposited in Fersman Mineralogical Museum of Russian Academy of Sciences, Moscow.

Key words: ferrotchilinite, new mineral, tochilinite, hybrid layer hydroxide-sulfide, Otkyabr'skoe deposit, Norilsk.

ВВЕДЕНИЕ

Точилинит — гибридный слоистый гидроксид-сульфид с идеализированной формулой $6FeS \cdot 5Mg(OH)_2$ — описан как новый минеральный вид в 1971 году. Он был найден в прожилках серпентина и кальцита, секущих ультраосновные породы медно-никелевого месторождения Нижний Мамон в Воронежской области, Центральная Россия (Органова и др., 1971). Работы последующих лет показали, что точилинит — распространенный минерал низкотемпературных парагенезисов, связанных с ультрабазитами, кимберлитами, карбонатитами, магнезиальными скарнами, кальцифирами, а также с сульфидными рудами месторождений разных типов. Было установлено, что его состав достаточно широко варьирует, в первую очередь в части катионов в гидроксидном блоке, где в некоторых образцах обнаружили (при общем преобладании Mg) значительные примеси Fe и/или Al (Jambor, 1976; Никишова и др., 1983; Zolensky, Mackinnon, 1986; Органова и др., 1988; Органова, 1989; Александров, Сенин, 2005, и др.).

Для двух разновидностей нижнемамонского точилинита, несколько различающихся по кристаллографическим характеристикам, была изучена структура и установлено, что в минерале чередуются пакеты (модули) двух типов, имеющие слоистое строение: сульфидные макинавитоподобные $Fe_{1-x}S$ и гидроксидные бруситоподобные $(Mg, Fe^{2+})(OH)_2$ (Органова и др., 1972, 1973). В отличие от структурно родственного гидроксид-сульфида валлериита $2(Fe, Cu)S \cdot 1.5[(Mg, Fe^{2+})_{1-x}(Al, Fe^{3+})_x](OH)_{2+x}$ у которого в одном кристалле сосуществуют две разные по метрике подрешетки — сульфидная и гидроксидная (Evans, Allmann, 1968), структура точилинита описывается в единой решетке, общей для макинавитового и бруситового модулей. Исследования, выполненные на материале из разных объектов, показали, что точилинит обладает значительным числом структурных разновидностей, несколько различающихся соотношением сульфидного и гидроксидного компонентов и катионным составом бруситового пакета. Чаше встречаются в природе соразмерно-модулированные разновидности, но известны и несоразмерные (Органова, 1989).

Отдельно следует отметить точилинитоподобные фазы из метеоритов, в первую очередь из углистых хондритов. Поначалу они описывались без названия или же условно обозначались как PCP — poorly characterized phases (Barber et al., 1983; Tomeoka, Buseck, 1983), немного позже была доказана их принадлежность к структурному типу точилинита (Mackinnon, Zolensky, 1984). Интерес к этим фазам возник во многом благодаря тому, что их было предложено использовать как индикаторы при реконструкции условий относительно низкотемпературных преобразований вещества метеоритов (Zolensky, Mackinnon, 1984; Barber, 1985; Gooding, Zolensky, 1987; Browning, Bourcier, 1996). Одной из особенностей изученного в этих работах метеоритного «точилинита» оказалось преобладание Fe над Mg в бруситовом пакете: в цитированных работах этот минерал фигурирует как «богатый железом точилинит» (Fe-rich tochilinite); в качестве существенных примесей для него помимо Mg отмечены Ni, Al, Co. Однако систематической минералогической и кристаллохимической характеристики «богатого железом точилинита» не было дано.

Синтез точилинитоподобным методом в температуре Fe²⁺ и S²⁻ в системе задавались получены кристаллы с раздуле, вплоть до безмагнезия железа в бруситовом пакете et al., 1996; Русаков и др., 1998.

Нами в земных условиях сивными сульфидными рудами рождения в Норильском рапрактически чисто железистыми (Mg, Al, Ni, Cu) в су посвящена его характеристика данию Fe²⁺ над Mg в бруситовом образце передан в М ве, регистрационный № 4058.

УСЛОВИЯ НА

Точилинит в медно-никеле фиксирован А. Д. Генкиным частности показавшими, что чем относительно не только Органова, 1989). По нашим рильских месторождений, ж месте.

Образцы с ферроточилинитом (102) Октябрьского рудных кавернах сплошной пер количества магнетита и хаких бледно-зеленых пластин го филлосиликата практичес розетковидные сростки шест гидроксид-сульфида — ферр с Fe²⁺ вместо Mg в бруситово минералам, номенклатуре и тельного вида (Пеков и др., в ции также нарастают мелкие

Последовательность выд хлоритоподобный филлоси нит. Мы считаем эту минерал

Ферроточилинит образует но-пластинчатых кристаллы. {001} — обычно наблюдается своем кристаллы прямоуголь головки и тогда напоминают расщеплены. Иногда встреча ферроточилинита обычно тр но, волнообразно, наподобие ло не превышают 1.5 мм, но н до 0.1 мм. Они часто собраны гаты (рис. 2) до 6.5 мм в попе

В некоторых полостях вс частично или полностью пре

d layer hydroxide-sulfide, Oktyabr'skoe

точилинита, несколько различающихся по составу. Была изучена структура и состав (в атомах) двух типов, имеющие слоистое строение и гидроксидные бруситоподобные слои. Отличия от структурно родственного $\text{Mg}_2\text{Fe}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_{1-x}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_x(\text{OH})_{2+x}$ проявляются по метрике подрешетки — слоистая структура точилинита описывается бруситовыми модулями. Исследования показали, что точилинит обладает свойствами, несколько различающихся со свойствами и катионным составом структурно-модулированных разностей (1989).

Синтез точилинитоподобных фаз впервые осуществлен С. В. Козеренко гидротермальным методом в температурном интервале 80—160 °С при pH 11—13; соотношение Fe^{2+} и S^{2-} в системе задавалось постоянным, а количество Mg варьировалось. Были получены кристаллы с различными величинами Mg/Fe отношения в бруситовом модуле, вплоть до безмагнезиевой фазы $2\text{FeS} \cdot 1.67\text{Fe}(\text{OH})_2$. Двухвалентное состояние железа в бруситовом пакете установлено по мессбауэровским данным (Kozerenko et al., 1996; Русаков и др., 1998; Чистякова и др., 2006).

Нами в земных условиях, в низкотемпературном парагенезисе, связанном с массивными сульфидными рудами знаменитого Октябрьского медно-никелевого месторождения в Норильском районе (Красноярский край, Сибирь, Россия), установлен практически чисто железистый аналог точилинита, содержащий примеси других катионов (Mg, Al, Ni, Cu) в суммарном количестве менее 0,3 мас. %. Настоящая статья посвящена его характеристике как самостоятельного минерального вида. По преобладанию Fe^{2+} над Mg в бруситовом пакете он получил название **ферроточилинит**. Эталонный образец передан в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве, регистрационный № 4058/1.

Точилинит в медно-никелевых месторождениях Норильского района впервые зафиксирован А. Д. Генкиным в 1970-х гг. Он изучался Н. И. Органовой с соавторами, в частности показавшими, что железа в его бруситовых пакетах нет или же мало, причем относительно не только магния, но зачастую и алюминия (Органова и др., 1988; Органова, 1989). По нашим данным, точилинит не является редким минералом Норильских месторождений, железистый же его аналог встречается пока в единственном месте.

Образцы с ферроточилинитом собраны Г. Н. Плесиным в шахте № 1 (панель 5, лента 102) Октябрьского рудника в 2002 г. Минерал находится в трещинах и небольших кавернах сплошной пентландит-мойхукит-кубанитовой руды с подчиненными количествами магнетита и халькопирита. Ферроточилинит нарастает на щеточки мелких бледно-зеленых пластинчатых кристаллов высокожелезистого хлоритоподобного филлосиликата практически без Mg и Al, выстилающие стенки полостей, реже на розетковидные сростки шестиугольных пластинчатых кристаллов (до 2 мм) другого гидроксид-сульфида — ферроваллериита $2(\text{Fe,Cu})\text{S} \cdot 1.5\text{Fe}(\text{OH})_2$, аналога валлериита с Fe^{2+} вместо Mg в бруситовом пакете, утвержденного недавно Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов ММА в качестве самостоятельного вида (Пеков и др., в печати). На хлоритоподобный минерал в этой ассоциации также нарастают мелкие (до 0.15 мм) блестящие октаэдры магнетита.

Последовательность выделения минералов в полостях следующая: железистый хлоритоподобный филлосиликат → магнетит → ферроваллериит → ферроточилинит. Мы считаем эту минерализацию низкотемпературной гидротермальной.

Ферроточилинит образует уплощенные по [001] призматические до удлиненно-пластинчатых кристаллы. На гранях главной габитусной формы — пинакоида {001} — обычно наблюдается редкая штриховка поперек удлинения. В большинстве своем кристаллы прямоугольные, досковидные (рис. 1, а), реже имеют заостренные головки и тогда напоминают по форме меч (рис. 1, б). Многие индивиды значительно расщеплены. Иногда встречаются ажурные скелетные формы (рис. 1, в). Кристаллы ферроточилинита обычно трещиноваты, часто изогнуты, причем иногда многократно, волнообразно, наподобие выющихся лент. В длину индивиды минерала как правило не превышают 1.5 мм, но иногда достигают 3.2 мм при ширине до 0.5 мм и толщине до 0.1 мм. Они часто собраны в пучки, розетки, веерообразные или хаотические агрегаты (рис. 2) до 6.5 мм в поперечнике.

В некоторых полостях встречен ферроточилинит в разной степени измененный, частично или полностью превращенный в рыжие агрегаты гидроксидов и сульфатов

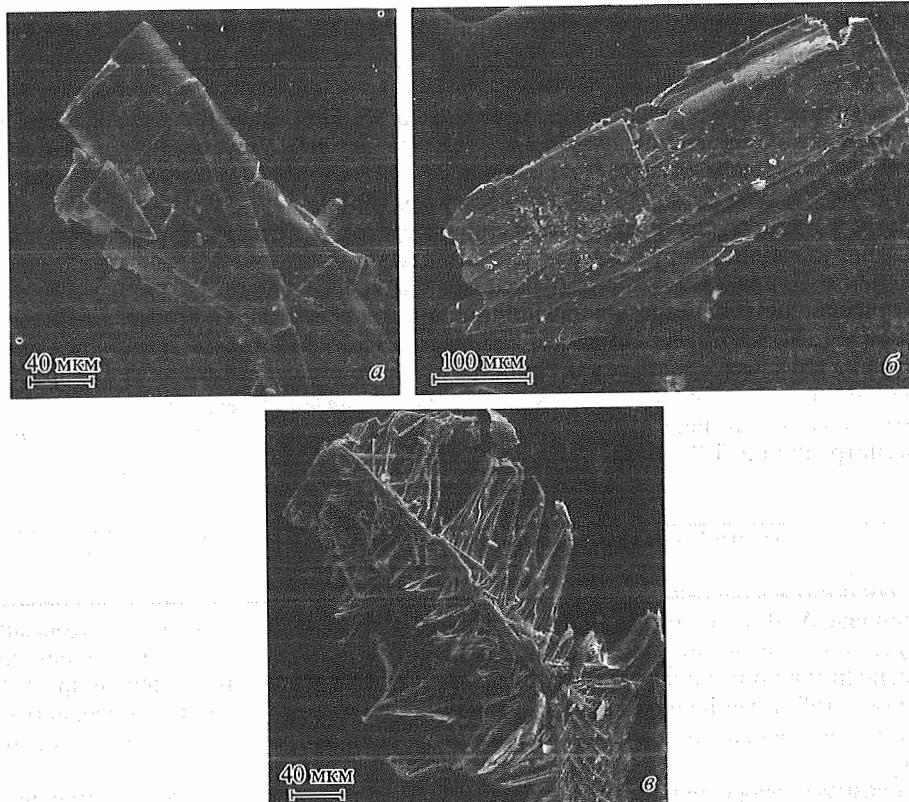


Рис. 1. Морфология ферротрохилинита.

а, б — кристаллы в — сложный скелетный сросток (РЭМ)-фото.

Fig. 1. Morphology of ferrotrochilinite: а, б — crystals, в — complicated skeleton intergrowth (SEM images).

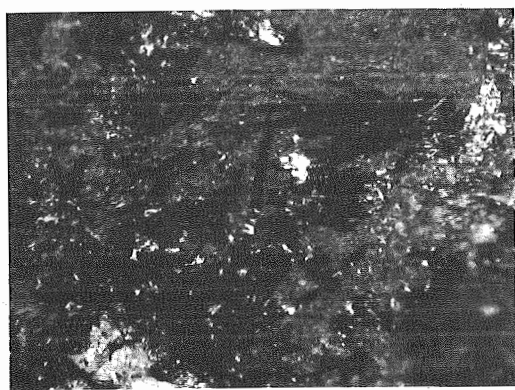


Рис. 2. Кристаллы и сростки кристаллов ферротрохилинита на щетке высокожелезистого хлоритоподобного филлосиликата.

Ширина поля 3.75 мм. Фото: И. В. Пеков и А. В. Касаткин.

Fig. 2. Crystals and crystal clusters of ferrotrochilinite overgrowing a crust of the Fe-rich chlorite-like phyllosilicate. FOV width 3.75 mm. Photographs: I. V. Pekov and A. V. Kasatkin.



Рис. 3. Полная псевдоморфоза гидроксидов и сульфатов железа по сросткам кристаллов ферротрохилинита.

Ширина поля 1.35 мм. Фото: И. В. Пеков и А. В. Касаткин.

Fig. 3. Complete pseudomorph of iron hydroxides and sulfates after crystal cluster of ferrotrochilinite. FOV width 1.35 mm. Photographs: I. V. Pekov and A. V. Kasatkin.

железа (рис. 3). Наблюдалось и мойхукиту тонкочешуйчатая. Отметим, что полные псевдоморфы на многих других местах на образце минералом тоже был ферро-

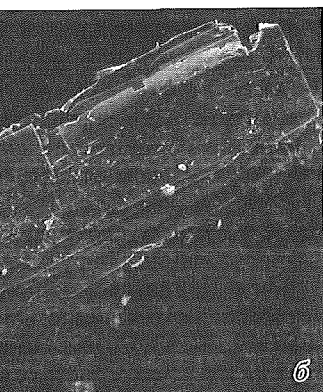
Свежий, неизмененный минерал, но сильный металлоидный блеск тускнеет и покрывается синими пятнами. Черта черная. Твердость феррита видимо, этот минерал даже можно поцарапать микротвердомером, не составляя 13 кг/мм². Спайность излом листоватый. Индивиды изгибаются под нажимом. Плотность не была измерена по плотности агрегатов. Вычисленная

Под микроскопом в отраженном свете цвет его серый, а оттенок металлический. Блеск заметное, $\Delta R = 2.6\%$ (сильная анизотропия с цветными желтовато-бежеватыми поперечными рефлексиями отсутствуют).

Изучение характера дисперсности на спектрофотометре МСФ-200.1 мм (с размером проекции 0.1 мм) лишь через 20 нм в диапазоне 400-1000 нм (Carl Zeiss Reflexionsstandard) отражения для разных длин волн пересекаются: нормальный х

ИК-спектр поглощения феррита на спектрометре ALPHA FT-100. 4 см⁻¹, содержит сильные полосы поглощения при 3457 см⁻¹ (сильная полоса при 801 см⁻¹ с плечом при 477 см⁻¹). Слабая полоса при 1634 см⁻¹ молекул H₂O, возможно отношение к изменению минерала.

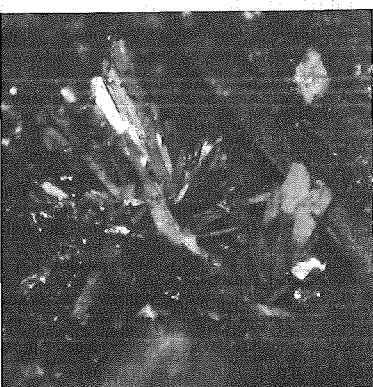
По сравнению с трохилинитом сильными водородными связями в валентных колебаниях М-О-М как деформационные колебания



инита.

осток (РЭМ)-фото.

ated skeleton intergrowth (SEM images).



3. Полная псевдоморфоза гидроксидов и сульфатов железа по сросткам кристаллов ферротачилинита.

ина поля 1.35 мм. Фото: И. В. Пеков и А. В. Касаткин.

3. Complete pseudomorph of iron hydroxides and sulfates after crystal cluster of ferrotachilinite. FOV width 1.35 mm. Photographs: I. V. Pekov and A. V. Kasatkin.

железа (рис. 3). Наблюдалось также развитие по ферротачилиниту, ферроваллерииту и мойхукиту тонкочешуйчатого темно-фиолетового ковеллина.

Отметим, что полные псевдоморфозы гидроксидов железа по доско- и мечевидным кристаллам неустойчивого минерала отмечались в сходной обстановке и во многих других местах на Октябрьском руднике. С большой вероятностью их прото-минералом тоже был ферротачилинит.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Свежий, неизменный ферротачилинит имеет темно-бронзовый цвет и достаточно сильный металлоидный блеск, со временем же темнеет, становясь почти черным, тускнеет и покрывается сине-фиолетовой или золотисто-коричневой побелостью. Черта черная. Твердость ферротачилинита очень низкая, не более 1 по шкале Мооса; видимо, этот минерал даже мягче талька. Твердость микровдавливания, измеренная с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 2 г, колеблется от 11 до 15, в среднем составляя 13 кг/мм². Спайность весьма совершенная, слюдоподобная по {001}, излом листоватый. Индивиды ферротачилинита гибкие, но не упругие, очень легко изгибаются под нажимом. При растирании в ступке минерал «размазывается». Плотность не была измерена по причине обилия микротрещин в его индивидах и ажурности агрегатов. Вычисленная плотность 3.467 г/см³.

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Под микроскопом в отраженном свете ферротачилинит обладает плеохроизмом: цвет его серый, а оттенок меняется от голубоватого (R_1) до бежеватого (R_2); двуотражение заметное, $\Delta R = 2.6\%$ (589 нм). При скрещенных николях наблюдается отчетливая анизотропия с цветными поляризационными окрасками: от серо-голубоватых до желтовато-бежеватых. Погасание прямое, удлинение положительное. Внутренние рефлексы отсутствуют.

Изучение характера дисперсии отражения ферротачилинита проводилось на микроспектрофотометре МСФ-21 при щели монохроматора 0.4 мм и диаметре зонда 0.1 мм (с размером проекции зонда в фокальной плоскости 1.5 мкм). Замеры проводились через 20 нм в диапазоне 400—700 нм, регистрация автоматическая, эталон — SiC (Carl Zeiss Reflexionsstandard 474251, № 545, Германия). Значения коэффициентов отражения для разных длин волн приведены в табл. 1. Спектральные кривые отражения пересекаются: нормальный характер имеет кривая R_1 , аномальный — R_2 (рис. 4).

ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ

ИК-спектр поглощения ферротачилинита (рис. 5, а), полученный с помощью фурье-спектрометра ALPHA FTIR фирмы Bruker Optics при разрешающей способности 4 см⁻¹, содержит сильные полосы ОН-групп двух типов. Плечо при 3515 см⁻¹ и максимум поглощения при 3457 см⁻¹ отвечают валентным колебаниям О—Н, широкая полоса при 801 см⁻¹ с плечом при 615 см⁻¹ — деформационным колебаниям Fe²⁺...О—Н. Отчетливая полоса при 477 см⁻¹ относится к валентным колебаниям Fe²⁺...О. Очень слабая полоса при 1634 см⁻¹ указывает на присутствие незначительного количества молекул H₂O, возможно относящихся к адсорбированной воде или же к продуктам изменения минерала.

По сравнению с точилинитом (рис. 5, б) ферротачилинит характеризуется более сильными водородными связями, образуемыми ОН-группами. В результате в точилините валентные колебания M...О (M = Mg ≫ Fe²⁺) имеют более высокие частоты, тогда как деформационные колебания M...О—Н — более низкие по сравнению с соответ-

Таблица 1

Коэффициенты отражения ферроточилинита
Reflectance coefficients of ferrotouchillinite

λ , нм	R_1 , %	R_2 , %	λ , нм	R_1 , %	R_2 , %
400	12.6	10.8	560	11.2	12.7
420	12.3	10.9	580	11.1	13.3
440	12.0	11.0	589	11.1	13.6
460	11.7	11.1	600	11.1	14.0
470	11.6	11.4	620	11.0	14.6
480	11.5	11.3	640	11.0	15.2
500	11.4	11.5	650	11.0	15.5
520	11.3	11.8	660	10.9	15.8
540	11.2	12.2	680	10.8	16.3
546	11.2	12.4	700	10.8	16.9

Примечание. Выделенные курсивом коэффициенты отражения для четырех длин волн, рекомендованных Комиссией по рудной минералогии (COM) MMA, получены интерполяцией.

вующими значениями у ферроточилинита. В связи с этим можно допустить, что полосы при 562 и 368 см^{-1} в ИК-спектре точилинита отвечают резонансным модам с участием $M\cdots O$ -валентных и $M\cdots O-H$ -деформационных колебаний. Слабые полосы при 736, 690 и 420 см^{-1} в ИК-спектре точилинита предположительно относятся к обертонам. Очень слабая полоса при 1617 см^{-1} в спектре точилинита, скорее всего, имеет ту же природу, что и обсуждавшаяся выше полоса при 1634 см^{-1} у ферроточилинита.

Родственный ферроточилиниту ферроваллериит по ИК-спектру в целом близок к нему. Спектр этого минерала содержит сильную полосу с максимумом при 3537 см^{-1} в области валентных колебаний $O-H$ и три отчетливые полосы в низкочастотной области, имеющие максимумы при 708, 580 и 481 см^{-1} .

Водные сульфиды, содержащие в отличие от гидроксид-сульфидов не OH -группы, а молекулы H_2O , имеют сильно отличающиеся ИК-спектры. В качестве яркого примера можно привести спектр вильгельмрамзаита $Cu_3FeS_3 \cdot 2H_2O$, содержащий следующие полосы поглощения (см^{-1} ; ш — широкая полоса): 3240ш, 3177ш, 3090ш, 1578 (Пекков и др., 2006). Сильные полосы в диапазоне 3000—3300 см^{-1} , отвечающие валентным колебаниям $O-H$, имеют значительно более низкие частоты по сравнению с соответствующими полосами в ИК-спектрах гидроксид-сульфидов — точилинита, ферроточилинита и ферроваллериита. Вместе с присутствием узкой, достаточно силь-

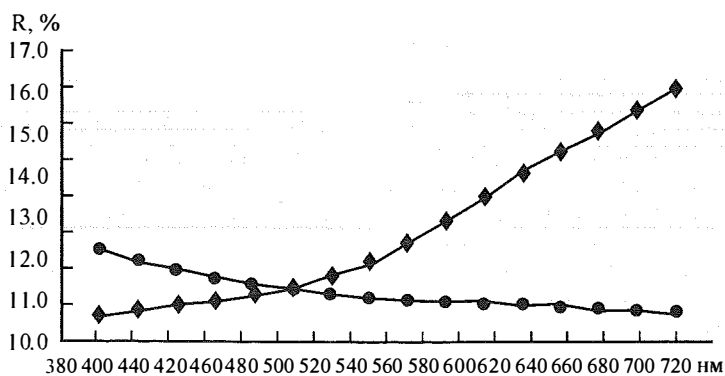
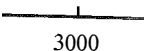
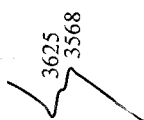
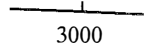
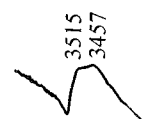


Рис. 4. Спектральные кривые отражения ферроточилинита.

Fig. 4. Ferrotouchillinite reflectance spectra.

Рис. 5. ИК-спектры ферроточилинита состава $6FeS \cdot (Mg_{4.4}Fe_{0.6})S_3$.Fig. 5. IR spectra of ferrotouchillinite composition $6FeS \cdot (Mg_{4.4}Fe_{0.6})S_3$.

ной полосы при 1578 см^{-1} (доказательством отсутствия отчетливых полос $O-H$ в вильгельмрамзаите, что в вильгельмрамзаите, но нет OH -групп. В частности, это говорит о том, что в вильгельмрамзаите, сколь-либо сильных связей $O-H$).

Химический состав ферроточилинита, определенный в двух лабораториях геологического института, совпал с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентной системы рентгеновского излучения в сопряженном режиме: содержание элементов по массе: Al_2O_3 ; Fe, S — FeS; Ni — Ni; C — C.

Таблица 1

илинит
ilinite

$R_1, \%$	$R_2, \%$
11.2	12.7
11.1	13.3
11.1	13.6
11.1	14.0
11.0	14.6
11.0	15.2
11.0	15.5
10.9	15.8
10.8	16.3
10.8	16.9

ения для четырех длин волн, ре-
получены интерполяцией.

им можно допустить, что поло-
ют резонансным модам с учас-
олебаний. Слабые полосы при
ожительно относятся к оберто-
илинита, скорее всего, имеет ту
634 см^{-1} у ферроточилинита.

о ИК-спектру в целом близок к
у с максимумом при 3537 см^{-1} в
полосы в низкочастотной обла-

кисид-сульфидов не ОН-группы,
кстры. В качестве яркого приме-
 $\text{S}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, содержащий следую-
3240ш, 3177ш, 3090ш, 1578 (Пе-
3300 см^{-1} , отвечающие валент-
изкие частоты по сравнению с
сид-сульфидов — точилинита,
ствием узкой, достаточно силь-

сид-сульфидов не ОН-группы,
кстры. В качестве яркого приме-
 $\text{S}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, содержащий следую-
3240ш, 3177ш, 3090ш, 1578 (Пе-
3300 см^{-1} , отвечающие валент-
изкие частоты по сравнению с
сид-сульфидов — точилинита,
ствием узкой, достаточно силь-

сид-сульфидов не ОН-группы,
кстры. В качестве яркого приме-
 $\text{S}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, содержащий следую-
3240ш, 3177ш, 3090ш, 1578 (Пе-
3300 см^{-1} , отвечающие валент-
изкие частоты по сравнению с
сид-сульфидов — точилинита,
ствием узкой, достаточно силь-

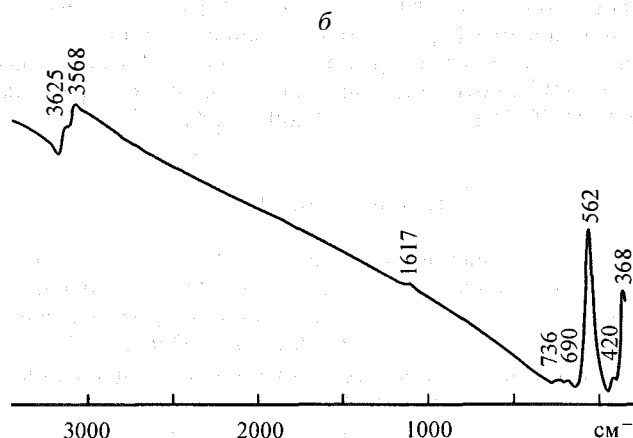
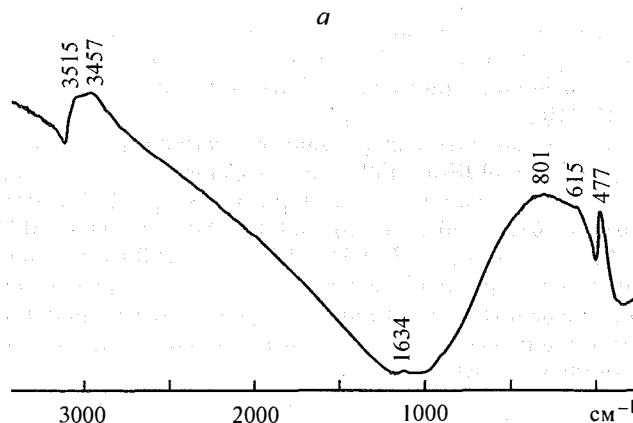


Рис. 5. ИК-спектры ферроточилинита из Октябрьского месторождения, Норильск (а), и точилинита состава $6\text{FeS} \cdot (\text{Mg}_{4.4}\text{Fe}_{0.6})(\text{OH})_2$ из карьера Отамо, Сииканен, Финляндия (б).

Fig. 5. IR spectra of ferrotouchilinite from Oktyabr'skoye mine, Norilsk district (a), and of touchilinite with composition $6\text{FeS} \cdot (\text{Mg}_{4.4}\text{Fe}_{0.6})(\text{OH})_2$ from Otamo quarry, Siikainen, Finland (b).

ной полосы при 1578 см^{-1} (деформационные колебания Н—О—Н молекул H_2O) и отсутствием отчетливых полос в диапазоне 360—1500 см^{-1} это четко указывает на то, что в вильгельмрамзаите содержится значительное количество молекулярной воды, но нет ОН-групп. В частности, отсутствие сильных полос в интервале 360—600 см^{-1} говорит о том, что в вильгельмрамзаите в отличие от гидроксид-сульфидов нет сколь-либо сильных связей $\text{M} \cdots \text{O}$ и $\text{M} \cdots \text{O} \cdots \text{H}$ ($\text{M} = \text{Cu}, \text{Fe}$).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав ферроточилинита изучался электронно-зондовым методом в двух лабораториях геологического факультета МГУ. На кафедре петрологии он определялся с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6480LV с комбинированной системой рентгеноспектрального микроанализа. Анализ проводился в сопряженном режиме: содержания металлов и серы измерялись с помощью энергодисперсионного спектрометра INCA-Energy 350 (окно ATW-2), кислорода — с помощью волнового спектрометра INCA-Wave 500. Эталоны: Mg — оливин; Al — Al_2O_3 ; Fe, S — FeS; Ni — Ni; Cu — CuFeS_2 ; O — Fe_2O_3 . На кафедре минералогии ферро-

точилинит изучался с помощью волнового микроанализатора Camebax SX 50. Эталон: Mg — тилазит; Al — $ZnAl_2O_4$; Fe, S — FeS; Ni — NiS; Cu — CuS. Условия анализа в обоих случаях: ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока 30 нА, зонд расфокусирован до площадки 10×10 мкм.

Полученные в обеих лабораториях результаты оказались очень близкими. Усредненный по 9 точкам (5 — Jeol JSM-6480LV и 4 — Camebax SX 50) химический состав ферроточилинита (мас.%, в скобках — интервал значений): Mg 0.02 (0.00—0.03), Al 0.00 (0.00—0.01), Fe 61.92 (60.1—62.6), Ni 0.03 (0.00—0.11), Cu 0.09 (0.00—0.21), S 19.45 (18.3—20.0), O 16.3 (15.7—17.1), $H_{выч}$ 1.03, сумма 98.84. Концентрации других элементов с атомными номерами выше, чем у O, оказались ниже пределов их обнаружения. Содержание воды прямым методом не определялось по причине дефицита вещества. Количество водорода вычислено исходя из допущения, что O и H входят в минерале только в состав OH-групп.

Эмпирическая формула ферроточилинита, рассчитанная на 6 атомов S, такова: $Mg_{0.01}Fe_{10.96}Ni_{0.005}Cu_{0.015}S_6(OH)_{10.07}$ или после разделения компонентов на сульфидную и гидроксидную части: $(Fe_{5.98}Cu_{0.015}Ni_{0.005})_{\Sigma 6}S_6 \cdot (Fe_{4.89}^{2+}Mg_{0.01})_{\Sigma 4.90} \cdot (OH)_{9.80} \cdot Fe_{0.09}^{3+}(OH)_{0.27}$. Железо в гидроксидной части формально поделено на Fe^{2+} и Fe^{3+} по балансу зарядов, на основе среднего измеренного содержания кислорода. Идеализированная формула минерала $6FeS \cdot 5Fe(OH)_2$. Соответствующие ей расчетные содержания компонентов: Fe 62.90, S 19.69, O 16.39, H 1.02, сумма 100.00 мас. %.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ

Рентгеновское исследование монокристалла ферроточилинита выполнено на дифрактометре Stoe IPDS II, оснащенном IP-детектором (MoK_{α} -излучение). Минерал моноклинный, пространственная группа $C2/m$, параметры элементарной ячейки: $a = 5.47(2)$, $b = 15.83(3)$, $c = 10.84(4)$ Å, $\beta = 93.7(3)^\circ$, $V = 937(6)$ Å³, $Z = 2$. Низкое качество кристаллов, всегда в той или иной мере изогнутых и расщепленных, не позволило провести исследования структуры минерала.

Порошковая рентгенограмма ферроточилинита (табл. 2) получена методом Гандольфи на том же дифрактометре (MoK_{α} -излучение, расстояние образец-детектор 200 мм). Уточненные по порошковой рентгенограмме параметры моноклинной ячейки: $a = 5.463(5)$, $b = 15.865(17)$, $c = 10.825(12)$ Å, $\beta = 93.7(1)^\circ$, $V = 936(3)$ Å³, $Z = 2$. Анализ погасаний рефлексов порошковой рентгенограммы позволяет заключить, что минерал относится к одной из трех пространственных групп: $C2/m$, Cm или $C2$.

По кристаллографическим характеристикам и порошковым рентгенограммам точилинит и ферроточилинит близки, но последний отличается увеличенными значениями параметров элементарной ячейки и межплоскостных расстояний (табл. 3) по причине нахождения в его гидроксидном модуле Fe^{2+} вместо Mg. В то же время эти моноклинные минералы сильно отличаются по метрикам ячеек и порошковым рентгенограммам от гексагональных гидроксид-сульфидов группы валлериита, куда входят валлериит $2(Fe,Cu)S \cdot 1.5[(Mg,Fe^{2+})_{1-x}(Al,Fe^{3+})_x](OH)_{2+x}$, ферроваллериит $2(Fe,Cu)S \cdot 1.5Fe(OH)_2$, хаапалаит $2(Fe,Ni)S \cdot 1.5(Mg,Fe^{2+})(OH)_2$ и юшкинит $V_{1-x}S \cdot 0.6(Mg_{1-x}Al_x)(OH)_{2+x}$ (Органова, 1989; Пеков и др., в печати).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описываемый в настоящей статье норильский ферроточилинит весьма близок по составу к идеальному $6FeS \cdot 5Fe(OH)_2$. Вместе с тем данные для искусственных аналогов точилинитов указывают на то, что серия твердых растворов между $6FeS \cdot 5Mg(OH)_2$ и $6FeS \cdot 5Fe(OH)_2$, скорее всего, является непрерывной; в частности, синтезирован ее безмагнезиальный конечный член, практически идентичный по составу нашему ферроточилиниту (Kozerenko et al., 1996; Русаков и др., 1998; Чистя-

Результаты расче

X-ray p

$I_{изм.}$	$d_{изм.}$ Å	
13	10.83	10.80
100	5.392	5.401
5	4.546	4.546
6	3.594	3.601
7	3.281	3.279
1	2.886	2.871
7	2.777	2.742
12	2.696	2.701
3	2.599	2.603
12	2.524	2.543
5	2.335	2.334
2	2.239	2.246
8	2.152	2.155
6	2.112	2.114
2	2.045	2.045
3	1.968	1.968
2	1.942	1.950
4	1.874	1.884
11	1.837	1.842
6	1.789	1.800
3	1.735	1.737
1	1.710	1.711
2	1.661	1.662
6	1.598	1.600
3	1.558	1.554
3	1.526	1.528
3	1.485	1.488
2	1.386	1.389
3	1.345	1.348
3	1.326	1.328
4	1.297	1.297
3	1.264	1.295

кова и др., 2006). Опираясь на то, что этот ряд (точнее, более сложный), с большей вероятностью реализуется в природе.

Авторы работ (Русаков и др., 1998; Пеков и др., 1998) предполагают, что в гидроксидном модуле точилинитов в виде Fe^{2+} в высокоспиновом состоянии. Оба этих вывода подтверждаются природного материала. Так, по содержанию кислорода (т. е. по массовому номерному увеличению параметров ячейки) с точилинитом.

Второй вывод объясняет с точки зрения 1) редкость ферроточилинита

изатора Camebax SX 50. Эталон-
 iS; Cu — CuS. Условия анализа
 тока 30 нА, зонд расфокусиру-

изались очень близкими. Усред-
 ebox SX 50) химический состав
 ачений): Mg 0.02 (0.00—0.03),
 00—0.11), Cu 0.09 (0.00—0.21),
 ма 98.84. Концентрации других
 ались ниже пределов их обнару-
 ялось по причине дефицита ве-
 пущения, что О и Н входят в ми-

итанная на 6 атомов S, такова:
 я компонентов на сульфидную и
 $(\text{OH})_{9.80} \cdot \text{Fe}_{0.09}^{3+} (\text{OH})_{0.27} \cdot$
 а Fe^{2+} и Fe^{3+} по балансу зарядов,
 да. Идеализированная формула
 тные содержания компонентов:
 %.

БЕ

оточилинита выполнено на диф-
 (Мо_{Kα}-излучение). Минерал мо-
 естры элементарной ячейки: $a =$
 $937(6) \text{ \AA}$, $Z = 2$. Низкое качест-
 и расщепленных, не позволило

табл. 2) получена методом Ган-
 е, расстояние образец-детектор
 ы моноклинной ячейки: $a =$
 $1)^\circ$, $V = 936(3) \text{ \AA}^3$, $Z = 2$. Анализ
 ючить, что минерал относится к
 и C2.

рошковым рентгенограммам то-
 ичается увеличенными значени-
 ных расстояний (табл. 3) по при-
 есто Mg. В то же время эти моно-
 м ячеек и порошкограммам от
 ерита, куда входят валлериит
 аллериит $2(\text{Fe,Cu})\text{S} \cdot 1.5\text{Fe}(\text{OH})_2$,
 $1-x\text{S} \cdot 0.6(\text{Mg}_{1-x}\text{Al}_x)(\text{OH})_{2+x}$ (Ор-

ТОВ

ферроточилинит весьма близок
 тем данные для искусственных
 ия твердых растворов между
 яется непрерывной; в частности,
 практически идентичный по со-
 996; Русаков и др., 1998; Чистя-

Таблица 2

Результаты расчета порошковой рентгенограммы ферроточилинита
 X-ray powder diffraction data for ferrotocchilinite

$I_{\text{изм.}}$	$d_{\text{изм.}}, \text{ \AA}$	$d_{\text{выч.}}, \text{ \AA}$	hkl
13	10.83	10.802	001
100	5.392	5.401	002
5	4.546	4.546	111
6	3.594	3.601	003
7	3.281	3.279	023
1	2.886	2.871	113
7	2.777	2.742	150
12	2.696	2.701, 2.684	004, 20 $\bar{1}$
3	2.599	2.603	201
12	2.524	2.543, 2.499	22 $\bar{1}$, 20 $\bar{2}$
5	2.335	2.334	114
2	2.239	2.246, 2.244, 2.232	240, 20 $\bar{3}$, 044
8	2.152	2.155, 2.148	134, 153
6	2.112	2.114, 2.109	24 $\bar{2}$, 203
2	2.045	2.045, 2.038	171, 223
3	1.968	1.968	17 $\bar{2}$
2	1.942	1.950, 1.935	081, 172
4	1.874	1.884, 1.862, 1.862	261, 243, 082
11	1.837	1.842, 1.829	135, 17 $\bar{3}$
6	1.789	1.800, 1.800, 1.790	006, 311, 173
3	1.735	1.737, 1.733	083, 116
1	1.710	1.711, 1.708	26 $\bar{3}$, 225
2	1.661	1.662, 1.657	19 $\bar{1}$, 31 $\bar{3}$
6	1.598	1.600, 1.599, 1.598, 1.595	24 $\bar{5}$, 136, 084, 28 $\bar{1}$
3	1.558	1.554	28 $\bar{2}$
3	1.526	1.528	15 $\bar{6}$
3	1.485	1.488, 1.486, 1.485, 1.483	066, 28 $\bar{3}$, 175, 156
2	1.386	1.389, 1.387, 1.386	37 $\bar{2}$, 33 $\bar{5}$, 1.11. $\bar{1}$
3	1.345	1.348, 1.345, 1.344, 1.344, 1.343	176, 1.11.2, 315, 42 $\bar{1}$, 420
3	1.326	1.328, 1.326, 1.323, 1.323	157, 11 $\bar{8}$, 42 $\bar{2}$, 421
4	1.297	1.297, 1.296	373, 2.10. $\bar{3}$
3	1.264	1.295, 1.265, 1.263	390, 285, 39 $\bar{1}$

кова и др., 2006). Опираясь на опубликованные и наши данные, можно считать, что этот ряд (точнее, более сложная система, с учетом примесных Al, Ni и др.) с большой вероятностью реализуется и в природе — как в земных объектах, так и в метеоритах.

Авторы работ (Русаков и др., 1998; Чистякова и др., 2006) заключают, что: 1) железо в гидроксидном модуле синтетических аналогов точилинитов присутствует в виде Fe^{2+} в высокоспиновом состоянии; 2) магний значительно стабилизирует структуру точилинитового типа.

Оба этих вывода подтверждаются и всей совокупностью фактов, известных для природного материала. Так, первый вывод хорошо согласуется с нашими данными по содержанию кислорода (т. е. количеством анионов OH^-) в ферроточилините и с закономерным увеличением параметров элементарной ячейки этого минерала по сравнению с точилинитом.

Второй вывод объясняет с кристаллохимической точки зрения два важных факта: 1) редкость ферроточилинита в природе, тогда как точилинит — минерал с преобла-

Сравнительная характеристика ферроточилинита и точилинита

Comparative data for ferrotocchilinite and tochilinite

Минерал	Ферроточилинит	Точилинит
Идеализированная формула	$6\text{FeS} \cdot 5\text{Fe}(\text{OH})_2$	$6\text{FeS} \cdot 5\text{Mg}(\text{OH})_2$
Сингония	Моноклинная	Моноклинная*
Пространственная группа	$C2/m, C2$ or $C2$	$P2/m, Pm$ or $P2$
$a, \text{\AA}$	5.463	5.2—5.4
$b, \text{\AA}$	15.865	15.3—15.9
$c, \text{\AA}$	10.825	10.7—10.9
$\beta, ^\circ$	93.7	93.6—95.8
$V, \text{\AA}^3$	936	890—920
Главные линии порошковой рентгенограммы: $d, \text{\AA} - I$	10.83—13 5.39—100 2.696—12 2.524—12 1.834—11	10.64—30 5.36—100 2.605—30 1.835—50 1.559—40
Плотность, г/см ³	3.47 (выч.)	2.9—3.1
Источник	Настоящая работа	Органова и др., 1971, 1972, 1973, 1988; Jambor, 1976; Органова, 1989

Примечание. * В первых публикациях (Органова и др., 1971, 1972) точилинит рассматривался как триклинный псевдомонотриклинный: пространственная группа $C1$, $a = 5.37$, $b = 15.65$, $c = 10.72 \text{ \AA}$, $\beta = 95^\circ$, $V = 897.5 \text{ \AA}^3$.

данием Mg в гидроксидном модуле — широко распространен; 2) неустойчивость ферроточилинита в атмосферных условиях при стабильности точилинита. Согласно нашим наблюдениям, во влажном воздухе ферроточилинит быстро изменяется, «ржавеет», переходя в смесь гидроксидов и сульфатов железа. На Октябрьском руднике этот минерал в неизменном виде встречен только в изолированных полостях «свежей» пентландит-моихукит-кубанитовой руды на одном из глубоких горизонтов, но и там во многих случаях наблюдались лишь псевдоморфозы по нему, частичные или же полные. Не вызывает сомнения, что кислород воздуха, особенно в присутствии водяного пара, легко окисляет Fe^{2+} в бруситовом модуле ферроточилинита до Fe^{3+} , что приводит к разрушению структуры минерала. Точилинит, у которого в гидроксидной части нет или сравнительно мало окисляющегося компонента — Fe^{2+} , конечно же, оказывается значительно стабильнее на воздухе. То же, но еще в более ярком виде наблюдается для пары чистых гидроксидов — амакинита $\text{Fe}^{2+}(\text{OH})_2$ и брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (а также их синтетических аналогов): первый превращается в смесь оксидов и гидроксидов Fe^{3+} [$\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeOOH , Fe_2O_3] за считанные дни (Козлов, Левшов, 1962), тогда как второй устойчив на воздухе.

Редкость в природе ферроточилинита относительно точилинита имеет, вероятно, еще и геохимическую причину: для появления железистого члена ряда нужен, как показали данные по синтезу (Kozerenko et al., 1996), сильный дефицит Mg при достаточно высоких активностях Fe^{2+} и S^{2-} в низкотемпературной гидротермальной системе. Именно такие условия, очевидно, и реализовались при формировании ферроточилинита в полостях массивных сульфидных руд Октябрьского месторождения, где кристаллизовались помимо него практически безмагнезиальные ферроваллериит и хлоритоподобный филлосиликат — минералы, относящиеся к структурным типам, имеющим, как и точилиниты, значительное родство к Mg. Одна из причин появления «богатого железом точилинита» в метеоритах, видимо, та же: дефицит на низкотемпературных этапах их эволюции подвижного магния, связанного в ранних силикатах. В заключение отметим, что метеоритный минерал с Fe (Mg, Al) в бруситовом пакете, описанный в ряде статей (Barber et al., 1983; Tomeoka, Buseck, 1983; Mackinnon, Zolensky, 1984; Barber, 1985, и др.), несомненно, относится к ферроточилиниту.

Благодарности. Авторы исследования благодарят Л. А. Тографий минерала, а С. М. держке грантов РФФИ № 13.0.113.2010.

Александров С. М., Сенин В. И. магнетиальных скарнах // Геохимия. 1962. В. 1. С. 72—77.
Никишова Л. В., Корнилова В. Л. с «гибридной структурой» в к. Органова Н. И. Кристаллохимия. М.: Наука, 1989. 143 с.
Органова Н. И., Генкин А. Д., нит — новый сульфид-гидроксид. Органова Н. И., Дриц В. А., Д. разнородность // Кристаллография. Органова Н. И., Дриц В. А., Д. новизна. Необычные дифракции. Органова Н. И., Горшков А. И., Струженикин С. Ф., Пономаренко С. 84—98.

Пекон И. В., Чуканов Н. В., Б. новый минерал из Хибинского ма. Пекон И. В., Середа Е. В., Яна. валлериит $2(\text{Fe}, \text{Cu})\text{S} \cdot 1.5\text{Fe}(\text{OH})_2$ и печати.

Русаков В. С., Чистякова Н. И. кинавита и точилинита // Вестник Чистякова Н. И., Русаков В. С. ские исследования железо-магнези. 2006. № 2. С. 58—61.

Barber D. Phyllosilicates and ot Vol. 20. P. 415—454.

Barber D., Bourdillon A., Freen. hydrous sulfide? // Nature. 1983. Vol.

Browning L. B., Bourcier W. L. T. idal parent body // Lunar and Planeta.

Evans H. T., jr., Allmann R. The Vol. 127. P. 73—93.

Gooding J. L., Zolensky M. E. Th. ence Conference. 1987. Vol. 18. P. 3.

Jambor J. L. New occurrences o P. 65—69.

Kozerenko S. V., Organova N. J., nite produced in laboratory // Abstract P. 695—696.

Mackinnon I. D. R., Zolensky M. ceous chondrite meteorites // Ibid. 19.

Tomeoka K., Buseck P. A new Vol. 306. P. 354—356.

Zolensky M. E., Mackinnon I. L. Vol. 71. P. 1201—1209.

Таблица 3

нитита и точилиинита
and tochilinite

Точилинит
$6\text{FeS} \cdot 5\text{Mg}(\text{OH})_2$
Моноклинная*
$P2/m, Pm$ от $P2$
5.2—5.4
15.3—15.9
10.7—10.9
93.6—95.8
890—920
10.64—30
5.36—100
2.605—30
1.835—50
1.559—40
2.9—3.1
Органова и др., 1971, 1972, 1973, 1988; Jambor, 1976; Органова, 1989

*) точилинит рассматривался как триклинный
 $0.72 \text{ \AA}$, $\beta = 95^\circ$, $V = 897.5 \text{ \AA}^3$.

странен; 2) неустойчивость ферро-
ности точилиинита. Согласно на-
нит быстро изменяется, «ржаве-
ва. На Октябрьском руднике этот
олированных полостях «свежей»
из глубоких горизонтов, но и там
озы по нему, частичные или же
ка, особенно в присутствии водя-
не ферроточилинита до Fe^{3+} , что
инит, у которого в гидроксидной
компонента — Fe^{2+} , конечно же,
же, но еще в более ярком виде на-
ита $\text{Fe}^{2+}(\text{OH})_2$ и брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$
ощается в смесь оксидов и гидро-
ни (Козлов, Левшов, 1962), тогда

ьно точилиинита имеет, вероятно,
истого члена ряда нужен, как по-
льный дефицит Mg при достаточ-
урной гидротермальной системе.
при формировании ферроточили-
ьского месторождения, где кри-
стальные ферроваллериит и хлори-
еся к структурным типам, имею-
Mg. Одна из причин появления
мо, та же: дефицит на низкотемпе-
связанного в ранних силикатах.
Fe (Mg,Al) в бруситовом пакете,
а, Buseck, 1983; Mackinnon, Zolen-
ся к ферроточилиниту.

Благодарности. Авторы благодарны Г. Н. Плесину за предоставленный для ис-
следования материал, Л. А. Паутову и А. В. Касаткину — за помощь в получении фо-
тографий минерала, а С. М. Александрову за обсуждение. Работа выполнена при под-
держке грантов РФФИ № 11-05-00397-а и 11-05-00407-а и проекта темплана СПбГУ
3.0.113.2010.

Список литературы

- Александров С. М., Сенин В. Г. Генезис и состав сульфидной минерализации и ее видоизменение в
магнезиальных скалах // Геохимия. 2005. № 6. С. 614—633.
- Козлов И. Т., Левшов П. П. Амакиинит — новый минерал из группы брусита—пирохроита // ЗВМО.
1962. В. 1. С. 72—77.
- Никишова Л. В., Корнилова В. П., Шамшина Э. А. Точилинит и пироаурит—шегрениит — минера-
лы с «гибридной структурой» в кимберлитовых породах Якутии // ЗВМО. 1983. Вып. 5. С. 614—620.
- Органова Н. И. Кристаллохимия несоизмерных и модулированных смешаннослойных минера-
лов. М.: Наука, 1989. 143 с.
- Органова Н. И., Генкин А. Д., Дриц В. А., Молотков С. П., Кузьмина О. В., Дмитрик А. Л. Точили-
нит — новый сульфид-гидроокисел железа и магния // ЗВМО. 1971. Вып. 4. С. 477—487.
- Органова Н. И., Дриц В. А., Дмитрик А. Л. Структурное изучение точилиинита-I: Изометрическая
разновидность // Кристаллография. 1972. Т. 17(4). С. 761—767.
- Органова Н. И., Дриц В. А., Дмитрик А. Л. Структурное изучение точилиинита-II: Игольчатая раз-
новидность. Необычные дифракционные картины // Кристаллография. 1973. Т. 18(5). С. 966—972.
- Органова Н. И., Горшков А. И., Диков Ю. П., Кульбачинский В. А., Лапутина И. П., Сивцов А. В.,
Служеникин С. Ф., Пономаренко А. И. Новое о точилините // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1988. № 6.
С. 84—98.
- Пеков И. В., Чуканов Н. В., Болдырева М. М., Дубинчук В. Т. Вильгельмрамзаит $\text{Cu}_3\text{FeS}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ —
новый минерал из Хибинского массива, Кольский полуостров // ЗРМО. 2006. № 1. С. 38—48.
- Пеков И. В., Середа Е. В., Янакурт В. О., Полеховский Ю. С., Бритвин С. Н., Чуканов Н. В. Ферро-
валлериит $2(\text{Fe,Cu})\text{S} \cdot 1.5\text{Fe}(\text{OH})_2$: установление статуса минерального вида и новые данные // ЗРМО, в
печати.
- Русаков В. С., Чистякова Н. И., Козеренко С. В., Фадеев В. В. Мессбауэровские исследования мак-
кинавита и точилиинита // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1998. № 3. С. 43—47.
- Чистякова Н. И., Русаков В. С., Губайдулина Т. В., Козеренко С. В., Колпакова Н. Н. Мессбауэров-
ские исследования железо-магнезиальных точилинитов // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия.
2006. № 2. С. 58—61.
- Barber D. Phyllosilicates and other layer-structured materials in stony meteorites // Clay Minerals. 1985.
Vol. 20. P. 415—454.
- Barber D., Bourdillon A., Freeman L. A. Fe-Ni-S-O layer phases in C2M carbonaceous chondrite — a
hydrous sulfide? // Nature. 1983. Vol. 305. P. 295—297.
- Browning L. B., Bourcier W. L. Tochilinite: a sensitive indicator of alteration conditions on the CM astero-
idal parent body // Lunar and Planetary Science. 1996. Vol. 27. P. 171.
- Evans H. T., jr., Allmann R. The crystal structure and crystal chemistry of valleriite // Zeit. Krist. 1968.
Vol. 127. P. 73—93.
- Gooding J. L., Zolensky M. E. Thermal stability of tochilinite // Abstracts of the Lunar and Planetary Sci-
ence Conference. 1987. Vol. 18. P. 343.
- Jambor J. L. New occurrences of the hybrid sulfide tochilinite // Geol. Surv. Canada. 1976. Paper 76-1B.
P. 65—69.
- Kozerenko S. V., Organova N. J., Fadeev V. V., Magazina L. O., Kolpakova N. N., Kopneva L. A. Tochili-
nite produced in laboratory // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference. 1996. Vol. 27. Pt 2.
P. 695—696.
- Mackinnon I. D. R., Zolensky M. E. Proposed structures for poorly characterized phases in C2M carbona-
ceous chondrite meteorites // Ibid. 1984. Vol. 309. P. 240—242.
- Tomeoka K., Buseck P. A new layer mineral from the Mighei carbonaceous chondrite // Nature. 1983.
Vol. 306. P. 354—356.
- Zolensky M. E., Mackinnon I. D. R. Microstructures of cylindrical tochilinites // Amer. Miner. 1986.
Vol. 71. P. 1201—1209.

Поступила в редакцию
15 февраля 2012 г.