

Н. Н. Зинчук, д-р геол.-минерал. наук, профессор, академик АН РС(Я),
председатель Западно-Якутского научного центра (ЗЯНЦ)
Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный, nnzinchuk@rambler.ru,
М. Н. Зинчук, научный сотрудник Западно-Якутского научного центра Академии наук Республики Саха (Якутия), Мирный

ОБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА БРУСИТА В КИМБЕРЛИТАХ

Установлено, что брусит в кимберлитовых породах Сибирской платформы представлен чисто магнезиальной разновидностью, не содержащей заметного количества изоморфных примесей в катионной части. В кимберлитах брусит образуется в процессе проявления двух этапов постмагматической переработки породы. С первым этапом связано формирование брусита при серпентинизации оливина и количество первого здесь обычно не велико. Он слагает здесь агрегаты в смеси с серпентином и другими сходными минералами, поэтому трудно диагностируется обычными методами. В отличие от этого, сложная сеть прожилков брусита, развитая в ряде кимберлитовых трубок, возникла в процессе воздействия на породу гидротермально-метасоматических растворов на заключительных этапах постмагматической переработки кимберлитов. Несмотря на то, что брусит частично образуется во время серпентинизации кимберлитов, бруситизация представляет собой отдельный метасоматический процесс, для которого характерен вынос кремнезема и железа, а также появление чисто магнезиального гидроксида, представленного агрегатами из ориентированных индивидов.

Ключевые слова: брусит, кимберлиты, Сибирская платформа, серпентинизация, бруситизация, гидротермально-метасоматические растворы, постмагматическая переработка пород.

Асбестовидные жилки светло-серого брусита (немалита) были описаны ранее в породах трубки Новинка Верхнемунского кимберлитового поля Сибирской платформы [2, 10–12, 17]. Аналогичные образования были установлены в некоторых скважинах, вскрывших различные горизонты восточного тела трубки Удачная. Кроме того, наличие брусита предполагалось по результатам пересчета петрохимических анализов кимберлитов с высоким первоначальным содержанием оливина при условии достаточно полной его серпентинизации [10, 18]. При этом наличие брусита было подтверждено также и рентгенометрическими исследованиями. В процессе комплексного изучения вещественного

состава коренных месторождений алмазов Сибирской платформы нами получены новые данные, свидетельствующие об относительно широком распространении брусита. Кроме того, новые сведения о физических свойствах и химическом составе этого минерала позволили высказать некоторые соображения о генезисе брусита в кимберлитовых породах. Наибольшие концентрации брусита установлены [8–10] в отдельных блоках восточного тела трубки Удачная, где он является основным породообразующим минералом. Размер блоков пород, обогащенных бруситом, в центральной части тела достигает иногда до 50–60 м. Содержание минерала в таких участках превышает 60 %. Брусит обра-

зует здесь волокнистые агрегаты, напоминающие асбест (рис. 1а, б). Кристаллы минералы редки рис. 2. В шлифе он часто отмечается в виде параллельно-волокнистых агрегатов, которые, кроме волокон, могут представлять торцевые срезы разбитых по спайности таблитчатых индивидов. Во многих таких индивидах срез проходит плоско и тогда под микроскопом с анализатором они выглядят как единое целое и дают волнистое погасание. Брусит либо развивается по оливину непосредственно, либо между ними образуется узкая прокладка серпентина. Нередко брусит замещает не только зерна оливина, но и частично другие глубинные минералы кимберлитов (гранаты, пироксены), основную массу породы, а также ксенолиты глубинных пород ультраосновного состава. Отдельные прожилки этого минерала пересекают ксенолиты вмещающих карбонатных пород и кристаллических сланцев фундамента. Однако для двух последних типов пород большие скопления прожилков брусита не характерны. Индивиды брусита ориентированы обычно в одном направлении. В отличие от серпентинизации, в процессе полного замещения бруситом исходных минералов кимберлитов реликтовая структура и текстура почти не сохраняется. Остаются обычно только реликты некоторых устойчивых минералов, а также очень расплывчатые очертания вкрапленников оливина. Все это свидетельствует о полной перекристаллизации исходной породы, сопровождаемой выносом кремнекислоты. Петрографическое изучение бруситизированных кимберлитов в шлифах показало, что серпентин не всегда можно считать промежуточным минералом в процессе образования брусита по оливину. Последний образуется также совместно с бруситом в заключительную стадию замещения исходной породы, когда вынос вещества из нее и гидролиз практически прекратились [8, 10]. Массовая бруситизация является самостоятельным процессом, который сопровождается полным выносом кремнекислоты, фактически полным разрушением исходной породы, когда происходило ее

растворение по всему объему. В процессе растворения породы, выноса кремнезема и выпадения брусита важную роль играли растворы солей щелочных металлов (особенно натрия).

Наряду с повышенными концентрациями брусита в отдельных блоках восточного тела трубки Удачная присутствие этого минерала в основной массе пород установлено (судя по петрохимическим пересчетам, а также рентгеноструктурным исследованиям) на всю разведанную глубину месторождения (до 1200 м). Максимальная концентрация брусита в отдельных частях глубоких горизонтов восточного тела трубки Удачная достигает, по данным пересчетов химических анализов, 15 % объема основной массы кимберлитов. Повышенное количество брусита выявлено нами также в отдельных блоках кимберлитовых пород трубок Сытыканская и Юбилейная этого же Далдыно-Алаkitского алмазonoсного района, где он вместе с серпентином, кальцитом и пироауритом образует мелкие прожилки. В кимберлитовых породах глубоких горизонтов трубки Мир (Малоботубинский алмазonoсный район) отмечены [7, 15, 16] почти мономинеральные выделения брусита, выполняющего мелкие жеоды и пустоты, а в единичных случаях и маломощные прожилки. В кимберлитовых породах Якутской алмазonoсной провинции (ЯАП) брусит уверенно диагностируется [10, 18] на дифрактометрических кривых. Параметры элементарной ячейки минерала ($a_0 = 0,4743$ нм) хорошо совпадают с литературными данными. Довольно четко брусит идентифицируется и на дериватограммах, на кривых ДТА которых в области 320–500 °С зафиксирован интенсивный эндотермический эффект, обусловленный потерей минералом воды. Максимум обезвоживания брусита для различных образцов приходится на интервал 420–450 °С. Кроме основного, на дериватограммах брусита зафиксированы второстепенные по величине термические эффекты, характеризующиеся для изученных образцов различными максимумами температур. Так, на кривых ДТА первой



Рис. 1. Густая сеть прожилков, выполненных параллельно-шестоватыми агрегатами волокнистой разновидности брусита – немалита в кимберлите восточного тела трубки Удачная (Якутия). Увеличение: а – 12, б – 24

группы образцов (образец М-53/1189-с и др.) отмечен малоинтенсивный эндотермический эффект при 200 °С, связанный с потерей низкотемпературной воды. По аналогии с силикатами, которым свойственны такие же термические эффекты, его можно объяснить выделением “межпакетной” воды, т. е. молекул воды, которые заместили часть гидроксидов. Подобного рода явление, на генетической стороне остановимся далее, вряд ли может быть обнаружено другими методами (кроме дериватографии), поскольку содержание низкотемпературной воды невелико. Термические кривые другой группы образцов (У-36-2, У-36-8 и др.) характеризуются интенсивностью высокотемпературных эффектов, что связано с повышенным содержанием механических примесей (серпентин, карбонаты кальция), которые не удалось отделить механическим путем от исследованного минерала. ИК-спектры

поглощения исследованных проб брусита отвечают таковым для эталонных проб. Наиболее интенсивны полосы в области частот 450–480 и 3690–3710 см⁻¹, типичные для спектров минералов группы брусита. Они обусловлены валентными колебаниями магний-кислородных (гидроксильных) полиэдров и ОН-групп. Характеристические полосы поглощения конденсированных MgO₆-групп находятся в области 480 см⁻¹ (и меньше). Согласовываются с химическими данными (таблица) и частоты ОН-валентных колебаний, положение которых зависит от изоморфных замещений в октаэдрических позициях. Полосы поглощения ОН-валентных колебаний чисто магнезиальных разновидностей расположены в области частот 3700 см⁻¹, что вполне отвечает полученным нами результатам.

Из приведенных в таблице химических анализов видно, что некоторые образцы

Брусит Mg(OH)₂ Brucite
Тригональная сингония,
дитригонально-скаленоэдрический вид симметрии. $D_{3d} - \bar{3}m (L_3 3L_2 3PC)$
 $a : c = 1 : 1, 5208$

| Формы | φ | ρ |
|----------------|---------|--------|
| 0001 | — | 0° 00' |
| 10 $\bar{1}$ 0 | 30° 00' | 90 00 |
| 10 $\bar{1}$ 1 | 30 00 | 60 20 |
| 40 $\bar{4}$ 1 | -30 00 | 81 54 |

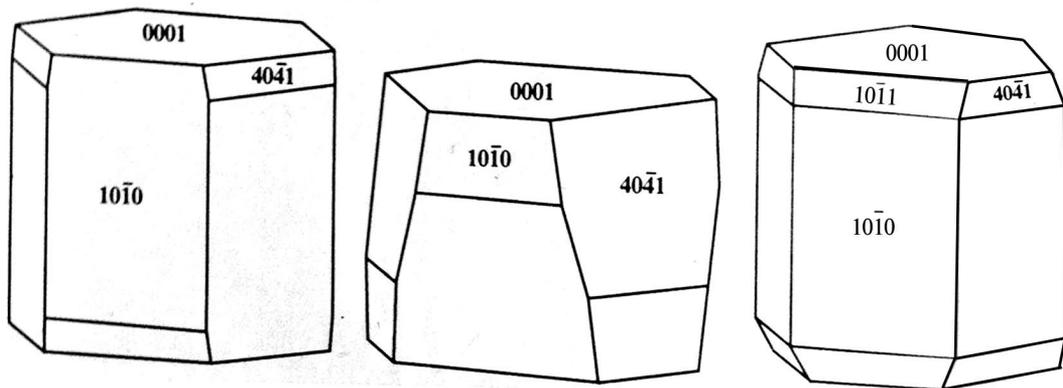


Рис. 2. Морфологические типы кристаллов брусита из кимберлитов трубки Юбилейная (Якутия)

Таблица. Химический состав (в %) вторичных образований кимберлитов, обогащенных бруситом

| Оксиды | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ | не обн. | не обн. | 0,02 | 10,18 |
| TiO ₂ | не обн. | не обн. | 0,02 | 0,68 |
| Al ₂ O ₃ | не обн. | не обн. | 0,12 | 0,40 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,08 | 0,29 | 0,12 | 3,21 |
| FeO | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,18 |
| MnO | 0,006 | 0,02 | 0,03 | 0,05 |
| MgO | 69,07 | 69,70 | 57,05 | 52,08 |
| CaO | не обн. | 0,03 | 8,15 | 4,25 |
| K ₂ O | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,18 |
| Na ₂ O | 0,29 | 0,18 | 0,09 | 0,05 |
| H ₂ O ⁺ | 30,64 | 27,15 | 25,44 | 22,24 |
| H ₂ O ⁻ | не обн. | 0,80 | 0,10 | 1,30 |
| CO ₂ | не обн. | 0,66 | 7,07 | 4,18 |
| P ₂ O ₅ | не обн. | не обн. | не обн. | 0,18 |
| SO ₃ | не обн. | не обн. | не обн. | 0,34 |
| NiO | 0,006 | не обн. | 0,008 | не обн. |
| CoO | 0,002 | не обн. | 0,003 | не обн. |
| Cr ₂ O ₃ | не обн. | не обн. | не обн. | 0,06 |
| Сумма | 100,21 | 99,55 | 98,35 | 99,56 |

Примечание. 1–3 – трубка Мир, образцы М-53/1155-2, М-53/1189-с и М-51/730-и (аналитик С. В. Большедворская); 4 – трубка Удачная, образец У-39-2 (аналитик М. Е. Мирошник).

брусита (1 и 2) почти не содержат примесей, в других (3 и 4) посторонний материал присутствует в заметном количестве. В чистых образцах брусита, кроме магнезии и воды, остальные компоненты отсутствуют или находятся в ничтожном количестве. Содержание гидроксида магния в обр. 1 равно почти 100 и обр. 2 – около 90 %. Для последнего расчеты велись по содержанию в минерале высокотемпературной воды, в результате чего обнаружен избыток магнезии, для связывания которой в брусит не хватает воды. В то же время анализом обнаружено повышенное, по сравнению с обр. 1, содержание низкотемпературной воды, молекулы которой замещают часть гидроксидов брусита. Рассчитанные для обоих образцов кристаллохимические формулы (с учетом низкотемпературной воды для обр. 2) имеют

следующий вид: обр. 1 – Mg(OH)_{1,95}; обр. 2 – Mg(OH)_{1,75}(H₂O)_{0,03}. Из приведенных формул следует, что в обоих случаях наблюдается общий недостаток воды, которую фактически ничем нельзя заменить. Возможно, место гидроксидов, кроме молекулярной воды, занимают галогениды (в частности хлор). Косвенным доказательством этого является нахождение последнего в бруситах других месторождений, а также сродство данного элемента с магнием. Образцы 3 и особенно 4, обогащенные примесями, содержат 84 и 60 % гидроксида магния соответственно. Остальное составляют карбонаты (преимущественно кальцит и до 2 % доломита) и серпентин, количество которого в обр. 4 достигает 21 %.

Исходным минералом для образования брусита (как и серпентина) обычно явля-

ется оливин [1, 3–6]. Оба минералы обычно возникают одновременно, но в зависимости от конкретных условий преобладает (иногда довольно резко) один из них. Серпентин нередко образует тонкую прокладку между оливином и бруситом. Однако наиболее часто в отдельных трубках ЯАП (Удачная, Новинка, Заполярная и др.) наблюдается смесь микроскопических и субмикроскопических индивидов серпентина и брусита. Образование последних за счет оливина происходило по общеизвестной реакции: $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5 + \text{Mg}(\text{OH})_2$. Для указанной реакции взят чисто магнезиальный оливин [1, 3, 5]. В действительности, в кимберлитах оливин обычно содержит железо, которое после преобразования первичного минерала либо входит в состав серпентина или брусита, либо выпадает в виде оксидов. Кроме того, железо вообще может удаляться из системы в виде растворимых в воде солей. В случае замещения оливина одним только серпентином часть магнезия должна быть вынесена водными растворами или же должна войти в состав других магнезиальных минералов. Поскольку водные растворы кимберлитов обычно богаты CO_2 , вынос магнезия возможен по следующей схеме: $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 = \text{Mg}_3(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_6 + \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. В отличие от этого, в случае развития по оливину брусита высвобождается кремнекислота:

$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} = 2\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{Si}(\text{OH})_4$. Судя по тому, что в кимберлитовых трубках, в которых оливин непосредственно замещается бруситом, кварц и халцедон не выпали, кремнекислота удаляется водными растворами. В результате переноса последними кремнекислоты в приконтактных частях трубки образуются мономинеральные выделения кварца (аметиста) или халцедона. Довольно благоприятными участками для этого являются присутствующие в кимберлитовых породах крупные ксенолиты вмещающих трубки карбонатных пород. За счет растворения карбонатов в последних возникают многочисленные трещины и пустоты, в которых при смене физико-химических условий среды и происходит осаждение минералов кремнезема.

При изучении нами [14] керн скважин, вскрывшим глубокие горизонты кимберлитов трубки Мир, среди жильных образований в серпофитизированных кимберлитовых брекчиях отмечен новый минерал магнезиевый ферригидроксид, ассоциирующий с кальцитом и ангидритом. Изучение минерала проведено в ЯНИГП ЦНИГРИ АК “АЛРОСА” и ИГМР НАН Украины Н. Н. Зинчуком и С. С. Мацюком с участием Е. А. Ильченко, Л. Н. Егорова, Э. В. Польшина и С. Хертинг-Агтхе. Встречается минерал в небольших пустотах (2–3 см) и трещинах (до 1 см), в которых слагает прожилки, “арагонитоподобные” скопления, имеющие белую или сероватую и желтоватую окраску. Мощность таких скоплений (от основания выделения до поверхности сферы) – 0,3–0,8 см. В продольном разрезе выделений видно, что минерал представлен параллельно-волокнистыми агрегатами (рис. 3а, б). Рост его начинался в виде асбестовидных волокон на подложке из серпентина (рис. 3в) и заканчивался образованием “арагонитоподобной” (“грибообразной”) сферы, состоящей уже из тонкозернистого агрегата этого же минерала (рис. 3г). Цвет минерала – от густо-сине-зеленого в основании волокон и в центре параллельно-волокнистого агрегата до густо-желто-зеленого и светло-желтого в верхней части волокон и в области сферы. В отдельных агрегатах встречаются бесцветные разновидности. Переходы по окраске постепенные. Агрегаты при надавливании легко расщепляются вдоль удлинения на отдельные, чуть уплощенные в поперечном сечении ($d < 0,5$ мм) волокна, каждое из которых покрыто тонкой оболочкой светло-желтого минерала этого же состава и с той же структурой. В свою очередь каждое из волокон расщепляется на еще более тонкие волосовидные волокна желтовато-зеленого цвета. Между волокнами иногда встречаются мельчайшие кристаллики кальцита ($< 0,1$ мм). Минерал мягкий, твердость по шкале Мооса 1. С водой не взаимодействует. В HCl растворяется полностью. На воздухе не окисляется. Минерал оптически одноосный,

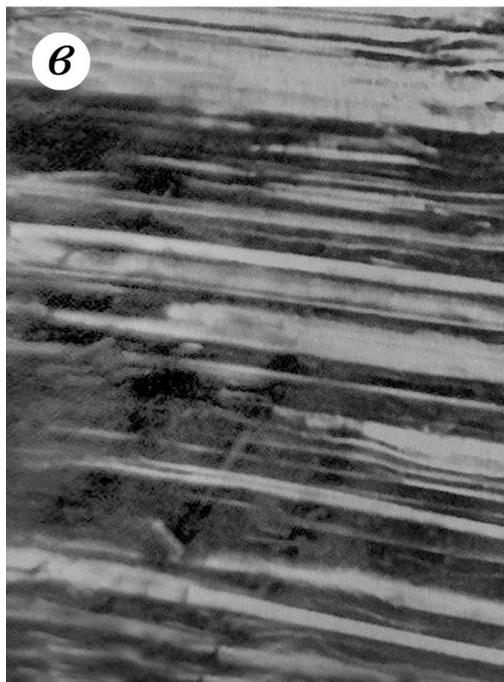
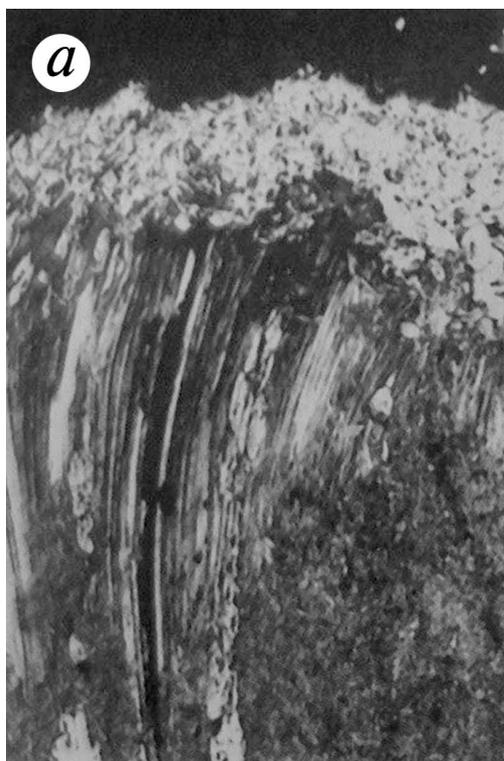


Рис. 3. Формы выделений магниевого ферригидроксида в кимберлитах глубоких горизонтов трубки Мир (Якутия)
а и б – параллельно-волокнистые агрегаты; в – асбестовидные волокна; г – “арагонитоподобные” тонкозернистые агрегаты

оптический знак положительный, удлинение положительное. Показатели преломления измерены иммерсионным методом в белом свете (590 нм): $n_e(\epsilon)=1,569\pm 0,002$; $n_o(\omega)=1,550\pm 0,002$. Оптическая ориентировка: $a=N_o$, $c=Ne$. При дневном освещении плеохроирует от светло-голубого ($E//a$) до сине-зеленого ($E//c$). Минерал принадлежит к тригональной системе с пространственной группой $R\bar{3}m$. Параметры ячейки: $a=0,3108\pm 0,002$ нм, $c=2,324\pm 0,04$ нм ($V=0,194414$ нм³, $Z=1$). Расчетная плотность – 2,53 г/см³. По рентгенометрическим характеристикам он наиболее близок к иоваиту $Mg_6Fe_2^{3+}(OH)_{16}Cl_2\cdot 4H_2O$, пироауриту $Mg_6Fe_2^{3+}(OH)_{16}CO_3\cdot 4H_2O$, а также к природным соединениям типа $4Mg(OH)_2\cdot(Ni,Fe)\{OON\}$, обладающим аналогичной пространственной группой [14]. В отраженных электронах минерал представляет собой чередование светло- и темно-серых полос (волокон); тонкозернистая масса в области сферы обнаруживает определенную текстурную деформированность. Изредка волокна пересекаются светло-желтым пластинчатого облика минералом преимущественно магнезиального состава ($FeO=3,36-4,44$; $Mg=34,38-36,37$ %), который из-за его малого количества диагностировать не удалось.

Необходимо также отметить, что волокнистые и в меньшей степени тонкозернистые агрегаты минерала практически не поддаются полировке, вследствие чего приготовить качественные препараты для электронно-зондового анализа весьма трудно. Кроме того, из-за высокого содержания воды и хлора в минерале наблюдается интенсивное “поверхностное испарение” образца при взаимодействии с электронным пучком, что является обычно причиной недоопределения содержания главных оксидов. Именно это объясняет в нашем случае вариации в содержании MgO и FeO для разных разновидностей минерала и недостаток суммы оксидов в большинстве анализов (с учетом H₂O и Cl). ИК-спектр рассматриваемого волокнистого густо-сине-зеленого минерала очень сходен с ИК-спектрами пироаурита [7, 8]. Однако в области колебания

анионов $[CO_3]^{2-}$ фиксируется главным образом полоса с частотой 1440 см⁻¹, которая принадлежит колебаниям ν_3 групп $[CO_3]^{2-}$ в кальците, причем она отмечается одновременно с более слабыми полосами кальцита 885 см⁻¹ (ν_2) и 720 см⁻¹ (ν_4). Когда же удалось избавиться от мельчайших (<0,1 мм) кристалликов кальцита, которые присутствуют между отдельными волокнами минерала, то оказалось, что в этой области собственные полосы поглощения групп $[CO_3]^{2-}$ в исследуемом минерале практически отсутствуют. В спектрах отдельных навесок образца остаются иногда лишь небольшие повышения фона (на уровне шумов прибора) в области 1430 (кальцит) или около 1360 см⁻¹. В отдельных случаях проявляются слабые полосы поглощения 1100, 1060 и 960 см⁻¹, связанные, скорее всего, с примесью серпентина. В остальном полученный спектр отличается от ИК-спектров изученных пироауритов только меньшей степенью дифференциации полос 590 и 665 см⁻¹.

С целью определения валентного и структурного состояния железа в минерале было выполнено [14] исследование оптических и ЯГР-спектров. Последние для густо-сине-зеленой разновидности минерала получен на модифицированном спектрометре ЯГРС-4М в режиме линейного изменения скорости источника γ -квантов. В 5/2 каналах амплитудного анализатора накапливались два антисимметричных спектра в диапазоне ± 4 мм/с. В результате сложения этих спектров получены спектры, лишенные дефектов, связанных с геометрией спектрометра. Минимальная ширина линий поглощения, полученная на данном спектрометре с источником ⁵⁷Co(Cr) активностью 100 мКи, – 0,22 мм/с для стандартного поглотителя нитропрусида натрия. Образец в виде порошка, запрессованного в пластинку из парафина, измерялся при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Пластинка помещалась под углом $\nu=54,4^\circ$ к пучку γ -квантов для того, чтобы избежать влияния возможной текстурности образцов на вид спектра. Для обеих температур спектр состоит

из одного дублета, несимметричного для $T=80$ К. Изомерный сдвиг дублета относительно центра спектра нитропруссиды натрия равен соответственно 0,62 и 0,70 мм/с. Эти значения соответствуют ионам Fe^{3+} в высокоспиновом состоянии. Линии поглощения уширены однородно, что говорит о широком диапазоне достаточно близких по структурным параметрам позиций, в которых находятся ионы Fe^{3+} . Дублет, соответствующий $T=300$ К, существенно анизотропен. Поскольку анизотропия исчезает при $T=80$ К, её однозначно можно приписать пространственной анизотропии мессбауэровского поглощения (эффекту Гольданского-Корягина). Это явление характерно для ионов железа, находящихся в анизотропных кристаллографических позициях (например, в плоской четверной позиции), и в данном случае, возможно, связано с тем, что ионы Fe^{3+} находятся в бруситоподобных слоях. Отметим, однако, что для ионов Fe^{2+} в бруситовых слоях хлорита и в самом брусите подобная анизотропия в спектрах не наблюдается [8]. В поляризованных оптических спектрах поглощения синезеленой разновидности ферригидроксида в области 14800 см^{-1} отмечается широкая интенсивная полоса поглощения, обусловленная переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$. Слабая поляризация этой полосы связана, вероятно, с полосчатым погасанием волокон, которые были использованы в качестве препарата для измерений. На фоне интенсивного коротковолнового поглощения наблюдается также узкая полоса поглощения 22700 см^{-1} , вызванная изолированными ионами Fe^{3+} . В ближней ИК-области как для синезеленой, так и для светло-желтой разновидности минерала отмечаются слабые полосы поглощения ионов Fe^{2+} , т. е. часть железа в структуре минерала находится в двухвалентной форме. По величине энергии полос поглощения ионов Fe^{2+} ферригидроксид существенно отличается от пирроаурита, что указывает на различные параметры вмещающих их полиэдров. В видимой области оптико-спектроскопические характеристики синезеленых разновидностей ферригидроксида, пирроаурита и иоваита

весьма близки между собой. В оптических спектрах светло-желтой разновидности дополнительно обнаруживается серия слабых полос поглощения, предположительно связанных с ионами Fe^{3+} .

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что брусит в кимберлитовых породах Сибирской платформы представлен чисто магнезиальной разновидностью, не содержащей заметного количества изоморфных примесей в катионной части. В то же время возможно частичное связывание магния с галогеном (хлором), который либо входит в виде изоморфной примеси, замещая гидроксил (наблюдается незначительное увеличение параметров элементарной ячейки при отсутствии замещения магния железом), либо образует субмикроскопические примеси. Последнее маловероятно потому, что хлористый магний должен содержать много кристаллизационной воды, чего аналитическими методами не установлено. В кимберлитах брусит образуется в процессе проявления двух этапов постмагматической переработки породы. С первым этапом связано формирование брусита при серпентинизации оливина. Количество брусита в этом случае в целом невелико. Он слагает агрегаты в смеси с серпентином и другими сходными минералами, поэтому трудно диагностируется обычными методами. В отличие от этого, сложная сеть прожилков брусита, развитая в ряде кимберлитовых трубок, возникла в процессе воздействия на породу гидротермально-метасоматических растворов на заключительных этапах постмагматической переработки кимберлитов. Несмотря на то, что брусит частично образуется во время серпентинизации кимберлитов, бруситизация представляет собой отдельный метасоматический процесс, для которого характерен вынос кремнекислоты и железа, а также появление чисто магнезиального гидроксида, представленного агрегатами из ориентированных индивидов.

Процесс бруситизации происходил в иных условиях, чем массовая серпенти-

низация кимберлитов. Если при серпентинизации брусит образует примесь, то при бруситизации содержание серпентина невелико. Встречаются также породы, в которых в одинаковой степени развиты серпентин и брусит [8]. Последний слагает прожилки в частично серпентинизированном кимберлите и, несомненно, является более поздним образованием. Отсюда следует, что бруситизация – более поздний самостоятельный процесс. Обычно она приводит к полному уничтожению структурно-текстурных особенностей исходной породы. И только на некоторых (переходных) участках сохраняются очертания первичных минералов, представленных оливином. Как и в полностью замещенных участках, здесь индивиды брусита ориентированы в одном направлении. Оптическая ориентировка реликтов оливина свидетельствует о том, что его крупные зерна замещались не только от краев, а и по трещинам. В одних случаях шло замещение оливина непосредственно бруситом, в других появлялась “прокладка” серпентина, которую не всегда можно отнести к промежуточным образованиям. Изучение таких ассоциаций в шлифах показало, что серпентин возник в местах, куда раствору проникать достаточно трудно. Наличие псевдоморфоз брусита и довольно распространенных реликтов оливина свидетельствует о том, что отложение брусита происходило не только в пустотах или по трещинам, но и путем замещения всей породы. Возможно, отложению брусита в породе предшествовало частичное ее растворение по всему объему. Образование брусита может идти в относительно широком температурном интервале. В стандартных условиях гидроксид магния формируется в щелочной среде в условиях очень низкого парциального давления CO_2 . По мере повышения температуры гидролиз происходил в более кислых условиях. Среди вторичных образований в ряде кимберлитовых трубок Сибирской платформы нередко встречается еще один минерал группы брусита – *амакинит*, которому свойствен-

ны зеленоватые кристаллы или их сростки размером до 55 мм. Как установлено, гидрат Fe^{2+} в воде является стабильной фазой по отношению к оксидам железа. Но он может легко замещаться сульфидами и силикатами железа, а также сидеритом и очень легко окисляется на воздухе. Поэтому для образования и сохранения амакинита необходимы специфические условия, которые, по нашему мнению, в значительной степени обеспечиваются вечной мерзлотой. Наиболее вероятно формирование амакинита путем гидролиза Fe_2SO_4 при взаимодействии с CaCO_3 :

$\text{CaCO}_3 + \text{Fe}_2\text{SO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. При этом CO_2 должна удаляться или вновь связываться в карбонат. Следует также отметить, что FeSO_4 , образовавшийся при окислении сульфидов, довольно устойчив в восстановительных условиях. Мелантерит ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) распространен в условиях вечной мерзлоты. Доказательством такого генезиса амакинита в кимберлитовых породах Сибирской платформы является и его ассоциация с гипсом.

С процессом бруситизации тесно связано образование впервые установленного в кимберлитовых породах магниевого ферригидроксида, не имеющего аналогов по составу (рис. 3а, б, в, г). Учитывая полученные данные о составе, структуре и свойствах этого минерала в целом, можно предположить, что его структура также состоит из бруситоподобных слоёв с молекулами воды в межслоевом пространстве. Поэтому его эмпирическую формулу можно более корректно представить в виде $4\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{Fe}^{3+}(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Однако окончательный вывод о принадлежности изученного ферригидроксида к новому минералу можно будет сделать только после уточнения его структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов В. Р., Колбанцев Р. В., Кузнецова В. Н. Современное состояние проблемы серпентинизации // Проблемы петрологии гипербазитов складчатых областей. – Новосибирск: Наука, 1973. – С. 213–226.

2. *Бобриевич А. П., Илупин И. П., Козлов И. Т.* и др. Петрография и минералогия кимберлитовых пород Якутии. – М., 1964. – 192 с.

3. *Булькиин Л. Д.* О серпентинах и серпентинизации//Асбесты СССР. – М.: Наука, 1974. – Вып. 1. – С. 72–86.

4. *Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г.* Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. – Новосибирск: Наука, 1997. – 574 с.

5. *Велинский В. В.* Серпентинизация гипербазитов (новые представления о природе процесса)//Геология и геофизика. – 1978. – № 3. – С. 52–62.

6. *Звягин Б. Б.* Кристаллохимические особенности серпентиновых минералов//Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1981. – № 11. – С. 106–117.

7. *Зинчук Н. Н.* Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы. – Новосибирск: изд-во НГУ, 1994. – 240 с.

8. *Зинчук Н. Н.* Постмагматические минералы кимберлитов. – М.: Недра, 2000. – 538 с.

9. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П.* Апокимберлитовые породы//Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.

10. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Харьков А. Д.* Особенности состава и генезиса брусита в кимберлитах Якутии//Докл. АН СССР. – 1983. – Т. 269. – № 2. – С. 449–454.

11. *Зинчук Н. Н., Специс З. В., Зуенко В. В., Зув В. М.* Кимберлитовая трубка Удачная (вещественный состав и условия формирования). – Новосибирск: НГУ, 1993. – 147 с.

12. *Лебедев А. А.* О гидротермальной стадии серпентинизации кимберлитов в связи с находкой в них брусита//Труды ЯФ СО АН СССР. – Изд-во АН СССР, 1962. – С. 74–86.

13. *Маракушев А. А.* Серпентинизация//Тр. Ин-та геол. и геох. УНЦ АН СССР. – 1973. – Вып. 100. – С. 19–37.

14. *Мацюк С. С., Зинчук Н. Н.* Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии. – М.: Недра, 2001. – 428 с.

15. *Милашев В. А.* Вторичные изменения кимберлитов//Тр. НИИГА. – 1962. – Т. 121. – С. 165–185.

16. *Подвысоцкий В. Т., Владимиров Б. М.* Особенности метасоматического преобразования кимберлитов//Метасоматизм и рудообразование. – М., 1984. – С. 30–37.

17. *Харьков А. Д.* Брусит из кимберлитов Якутии//Геология и геофизика. – 1961. – № 8. – С. 98–102.

18. *Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И.* Коренные месторождения алмазов мира. – М.: Недра, 1998. – 555 с.

REFERENCES

1. *Artemov V. R., Kolbantsev R. V., Kuznetsova V. N.* Modern state of serpentinization problem//Problems of petrology of folded areas' hyper-basic rocks. – Novosibirsk: Science, 1973. – P. 213–226. (In Russian).
2. *Bobrievich A. P., Ilupin I. P., Kozlov I. T.* et al. Petrography and mineralogy of kimberlite rocks of Yakutia. – M, 1964. – 192 p. (In Russian).
3. *Bulykin L. D.* About serpentines and serpentinization//Asbestososes of USSR. – M.: Science, 1974. – Issue. 1. – P. 72–86. (In Russian).
4. *Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G.* Petrochemical models of diamond deposits of Yakutia. – Novosibirsk: Science, 1997. – 574 p. (In Russian).
5. *Velinsky V. V.* Serpentinization of hyperbasic rocks (new ideas about the process nature)//Geology and geophysics. – 1978. – № 3. – P. 52–62. (In Russian).
6. *Zvyagin B. B.* Crystallochemical features of serpentine minerals//Proc. of USSR AS. Geol. ser. – 1981. – № 11. – P. 106–117. (In Russian).
7. *Zinchuk N. N.* Crusts of weathering and secondary alterations of the Siberian platform kimberlites. – Novosibirsk: NSU publ. house, 1994. – 240 p. (In Russian).
8. *Zinchuk N. N.* Postmagmatic minerals of kimberlites. – M.: Nedra, 2000. – 538 p. (In Russian).
9. *Zinchuk N. N., Melnik Y. M., Serenko V. P.* Apokimberlite rocks//Geology and geophysics. – 1987. – № 10. – P. 66–72. (In Russian).
10. *Zinchuk N. N., Melnik Y. M., Kharkiv A. D.* Specific features of composition and genesis of brucite in kimberlites of Yakutia//Rep. of USSR AS. – 1983. – V. 269. – № 2. – P. 449–454. (In Russian).
11. *Zinchuk N. N., Spetsius Z. V., Zuenko V. V., Zuev V. M.* Kimberlite pipe Udachnaya (material composition and conditions of formation). – Novosibirsk: NSU, 1993. – 147 p. (In Russian).
12. *Lebedev A. A.* About hydrothermal stage of kimberlites serpentinization in connection with a find of brucite in them//Works of YS of the USSR AS SB. – USSR AS publ. house, 1962. – P. 74–86. (In Russian).
13. *Marakushev A. A.* Serpentinization//Works of Geol. and Geochem. Inst. USC of the USSR AS. – 1973. – Issue. 100. – P. 19–37. (In Russian).
14. *Matsyuk S. S., Zinchuk N. N.* Optical spectroscopy of upper mantle minerals. – M.: Nedra, 2001. – 428 p. (In Russian).

15. *Milashev V. A. Secondary alterations of kimberlites//Trudy NIIGA. – 1962. – V. 121. – P. 165–185. (In Russian).*

16. *Podvysotsky V. T., Vladimirov B. M. Specific features of metasomatic transformation of kimberlites//Metasomatism and ore formation. – M., 1984. – P. 30–37. (In Russian).*

17. *Kharkiv A. D. Brucite from kimberlites of Yakutia//Geology and geophysics. – 1961. – № 8. – P. 98–102. (In Russian).*

18. *Kharkiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. Primary diamond deposits of the World. – M.: Nedra, 1998. – 555 p. (In Russian).*

Рукопис отримано 14.09.2014.

М. М. Зінчук, *д-р геол.-мінерал. наук, професор, академік Академії наук Республіки Саха (Якутія), голова Західноякутського наукового центру АН РС(Я), Росія, м. Мирний, nnzinchuk@rambler.ru,*

М. М. Зінчук, *науковий співробітник Західноякутського наукового центру АН РС(Я), Росія, м. Мирний*

УТВОРЕННЯ І ВЛАСТИВОСТІ БРУСИТУ В КІМБЕРЛІТАХ

Визначено, що брусит у кімберлітових породах Сибірської платформи представлений чисто магнезійним різновидом, що не містить помітної кількості ізоморфних домішок у катіонній частині.

У кімберлітах брусит утворюється в процесі прояву двох етапів постмагматичної переробки породи. З першим етапом пов'язане формування бруситу під час серпентинізації олівіну і кількість першого тут зазвичай невелика. Він складає тут агрегати в суміші із серпентином та іншими схожими мінералами, тому важко діагностується звичайними методами.

На відміну від цього, складна мережа прожилків бруситу, розвинена в низці кімберлітових трубок, виникла в процесі дії на породу гідротермально-метасоматичних розчинів на завершальних етапах постмагматичної переробки кімберлітів. Незважаючи на те, що брусит частково утворюється під час серпентинізації кімберлітів, бруситизація є окремим метасоматичним процесом, для якого характерне винесення кремнезему й заліза, а також поява чисто магнезійного гідроксиду, який представлений агрегатами із зорієнтованих індивідів.

Ключові слова: *брусит, кімберліти, Сибірська платформа, серпентинізація, бруситизація, гідротермально-метасоматичні розчини, постмагматична переробка порід.*

Zinchuk N. N., *Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, prof., acad. West-Yakutian Scientific Centre of the Sakha (Yakutia) Republic Academy of Sciences, Mirny, Russia, nnzinchuk@rambler.ru,*

Zinchuk M. N., *Researcher West-Yakutian Scientific Centre of the Sakha (Yakutia) Republic Academy of Sciences, Mirny, Russia; nnzinchuk@rambler.ru*

FORMATION AND PROPERTIES OF BRUCITE IN KIMBERLITES

It is an established fact that brucite in kimberlite rocks of the Siberian platform is represented by purely magnesia variety, not containing noticeable quantity of isomorphic impurities in cationic part. Brucite is formed in kimberlites during the process of occurrence of two postmagmatic reworking of rock stages. Formation of brucite during serpentinization of olivine is related with the first stage and the quantity of the first one is not large. It composes here aggregates in mixture with serpentine and other identical minerals, and for this reason is hard to be diagnosed by usual methods. As opposed to this, a complicated net of brucite streaks, developed in a number of kimberlite pipes, arose in the process of hydrothermal-metasomatic solutions' effect on the rock at final stages of postmagmatic reworking of kimberlites. In spite of the fact that brucite is partially formed during serpentinization of kimberlites, brucitization represents an individual metasomatic process, for which carryover of silica and iron is typical, as well as appearance of purely magnesia hydroxide, represented by aggregates from oriented individuals.

Keywords: *brucite, kimberlites, Siberian platform, serpentinization, brucitization, Republic hydrothermal-metasomatic solutions, postmagmatic reworking of rocks.*