
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 553.251:552.323.6

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/71-79>

Поступила в редакцию: 14.02.2025

Принята к публикации: 20.02.2025

Опубликована онлайн: 31.03.2025

Особенности боратов в кимберлитовых породах

©2025 Н. Н. Зинчук[✉]

*Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) АН РС (Я)
ул. Тихонова, 5/1, 678170, Мирный, Российская федерация*

Аннотация

Введение: проведенные исследования показали большое разнообразие кимберлитовых диатрем на древних платформах мира по размеру, морфологии, глубине заложения очагов, внутреннему строению, особенностям состава заполняющих пород, содержанию и составу первичных (глубинных) минералов, составу основной массы кимберлитов, степени и характеру переработки последних в постмагматических и гипергенных условиях и другим признакам. Часть перечисленных особенностей кимберлитов обусловлена проявлением эндогенных факторов, а часть – экзогенных. Особое значение имеет наличие вокруг кимберлитовых диатрем Сибирской платформы (СП) терригенно-карбонатных образований силура, ордовика, нижнего, среднего и верхнего кембрия, представленных известняками, доломитами, мергелями, алевролитами и промежуточными разностями этих пород. В центральной части СП в значительной части разреза вмещающих пород развиты пласти и линзы каменной соли. Особенно высокие содержания последних установлены в нижнекембрийских отложениях на глубинах 900-1200 м. В нижнекембрийских отложениях захоронены также значительные объемы высокоминерализованных вод (рассолов), существенно повлиявших на вещественный состав кимберлитов в диатремах, открытых на этой территории. Состав вмещающих диатремы толщ, геолого-структурные особенности их размещения, степень пневматолитово-гидротермального и гипергенного преобразования привели к обильному вторичному преобразованию кимберлитов, во многих случаях превративших их в апокимберлиты.

Объекты, методология исследований, результаты и их интерпретация: среди вторичных минералов кимберлитов некоторых диатрем СП идентифицированы бораты, обнаруженные в мелких соляных жилах и прожилках. *Екатеринит* ассоциирует с бесцветным, оранжево-красным и голубоватым галитом, ангидритом, кальцитом и серпентином. В раздувах мелких жил екатеринит обычно образует натечные включения в оранжево-красном галите, а в прожилках наблюдается в виде агрегатов, индивиды в которых расположены длиной стороной параллельно друг к другу и перпендикулярно к субстрату. Цвет екатеринита изменяется от розово- до вишнево-красного, а в мономинеральных прожилках доминируют оранжево-красные выделения минерала. Красящим веществом является смесь оксидов и гидроксидов железа. Отдельные индивиды *феррорсайбелиита* имеют вытянутую форму. В одних случаях индивиды напоминают листы, в других – они игловидные. Развитие удлиненных выделений феррорсайбелиита до некоторой степени обусловлено спецификой их роста, а также структурой самого минерала (цепочечным строением боратов). Минерал обычно окрашен в бурый цвет. В кимберлитовых трубках борные минералы находятся в мелких жилах и прожилках галита, пересекающих на отдельных глубинах серпентинизированный кимберлит. Поскольку борные минералы обычно связаны с солями, предполагается, что бор попал в кимберлиты вместе с растворимыми солями из вмещающих осадочных соленосных отложений. В процессе серпентинизации бор практически рассеивается и только при наличии магнезии, наряду с бруцитом, возникает незначительное количество ашарита.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Зинчук Николай Николаевич, e-mail: nnzinchuk@rambler.ru

Заключение: для кимберлитов наблюдается прямая зависимость содержания бора от состава летучей фазы, под воздействием которой осуществляется их метасоматическое изменение. Поэтому обогащение подземных рассолов бором следует в значительной степени связывать с глубинными источниками этого элемента. Необходимые для образования ферросайбелиита магний и железо мобилизовались из поровых растворов затвердевающего серпентина, который с понижением температуры становится почти чисто магнезиальным. Екатеринит формировался в других, чем ферросайбелиит, условиях в окисной среде, о чем свидетельствуют включения в минерале оксидов и гидроксидов железа.

Ключевые слова: кимберлиты, екатеринит, ферросайбелиит, генезис боратов.

Для цитирования: Зинчук Н. Н. Особенности боратов в кимберлитовых породах // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2025. № 1. С. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/71-79>

Введение

Проведенные исследования подчеркивают большое разнообразие кимберлитовых диатрем на различных платформах мира по размеру, морфологии, глубине заложения очагов, внутреннему строению, особенностям состава заполняющих пород, содержанию и составу первичных (глубинных) минералов, составу основной массы кимберлитов, степени и характеру переработки последних в постмагматических и гипергенных условиях и другим признакам [1–3]. Перечисленные особенности кимберлитов обусловлены проявлением эндогенных и экзогенных факторов. От глубины формирования магматических очагов, состава пород верхней мантии зависит концентрация породообразующих и инертных компонентов, индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) в том числе алмазов и других составляющих свойства образований, связанных с процессом кимберлитообразования [4–6]. Особое значение имеет наличие вокруг диатрем на Сибирской платформе (СП) терригенно-карбонатных образований сиулара, ордовика, нижнего, среднего и верхнего кембрия, представленных известняками, доломитами, мергелями, алевролитами и промежуточными разностями этих пород. В центральной части СП в значительной части разреза вмещающих пород развиты пласти и линзы каменной соли [7–9]. Высокие содержания последних установлены в нижнекембрийских отложениях на глубинах 900–1200 м. В нижнекембрийских отложениях захоронены также значительные объемы высокоминерализованных вод (рассолов), существенно повлиявших на вещественный состав кимберлитов в диатремах, открытых на этой территории. Кимберлитовые диатремы этого типа перекрыты верхнепалеозойскими и мезозойскими осадочными толщами, породами трапповой формации, четвертичными отложениями и реже вследствии эрозии верхних частей выходят на дневную поверхность. В трубчатых телах выделяются, характерные для всех типов трубочных кимберлитов (сверху вниз): раструб (воронкообразное расширение), вулканический (вертикальный) канал и корневая часть (подводящий канал, обычно переходящий на глубинах в дайковое тело) [10–12]. Каждая из этих частей диатрем сложена породами, имеющими определенные вещественные и текстурно-структурные особенности. Для кимберлитовых трубок довольно характерны ксенолиты осадочных, трапповых, коровых и

мантийных пород, однако их распределение и содержание довольно изменчивы в различных алмазоносных районах. Состав вмещающих диатремы толщ, геолого-структурные особенности их размещения, степень пневматолитово-гидротермального и гипергенного преобразования привели к обильному вторичному преобразованию кимберлитов, во многих случаях превративших их в апокимберлиты [13–15]. Для этого типа кимберлитов характерна повышенная концентрация ИМК, распределенных неравномерно как по разрезам, так и по различным телам и алмазоносным районам. Алмазоносность верхних частей диатрем (в случае наличия на них вулканогенно-осадочных образований), как и приконтактовых участков намного ниже, чем в нижерасположенных рудных столбах и подводящих каналах.

Объекты, методология исследований, результаты и их интерпретация

Кимберлитовые породы – сложные гетерогенные системы, состоящие из различных пропорций мантийного и корового вещества [16, 17]. Мантийный материал представлен ассоциацией глубинных ИМК и ксенолитов пород мантии, а также расплавленной частью мантийного вещества, которая слагает мезостазис. Коровую составляющую образуют ксенозерна и ксенолиты вмещающих пород, а также переотложенный из них растворенный материал. Широкие вариации минерального состава присущи кимберлитам Сибирской (СП) и Южно-Африканской (ЮАП) платформ, в то время как алмазоносные кимберлиты Восточно-Европейской платформы (ВЕП) имеют более простой состав [10–14]. Промышленное значение коренных месторождений кимберлитового типа определяется концентрацией алмазов в породах диатремы. Химический состав кимберлитов (как и других магматических пород) описывается относительными концентрациями следующими оксидами: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , CO_2 и H_2O . Этот ряд отражает принятый порядок изложения результатов силикатного анализа и в значительной мере отражает последовательное изменение валентности оксидов, образующих силикаты. Кроме перечисленных основных породообразующих компонентов, для кимберлитовых пород выделены [15–17] две основные группы химических элементов. Первая группа – некогерентные (Na,

K, Rb, Li, Cs, Sr, Ba, Th, U и TR), которыми кимберлитовая магма существенно обогащена по сравнению с ультраосновными мантийными породами. Вторая группа – когерентные (Ti, Zr, Nb, Ta, V, Mn, Pb, Zn, Sc, Au, Ag, Cr, Ni и Co), подразделяется на подгруппу относительно легкоплавких элементов (Ti, Zr, Nb, Ta, V, Mn, Pb и Zn), которыми кимберлиты обогащены по сравнению с мантийными перидотитами, подгруппу индифферентных элементов (Sc, Au и Ag), содержание которых близки и в кимберлитах, и в перидотитах, а также подгруппу тугоплавких элементов (Cr, Ni и Co), которыми кимберлитовая магма обеднена. Существенно изменяется состав вторичных минералов кимберлитов в зонах влияния на них водных термальных вод (ВТВ). На СП глубинные воды имеют хлоридный кальций-натриевый состав, а в основных алмазоносных районах к тому же они обогащены сероводородом. Эти рассолы обычно кислые ($\text{pH} \approx 2-6$) с минерализацией 300 г/л и выше. Характерно высокое содержание в них стронция (до 5 г/кг), а при отсутствии сероводорода – железа. Некоторые воды кембрийских сланцев Лено-Анабарского района содержат до 1440 мг/л Ва. Рассолы иногда содержат повышенное количество кремнезема. Температура их в устье скважины достигает 65°C. В ВТВ обычно присутствуют [9–11] барий, стронций и бор, отчего не случайна в таких регионах барит-стронциевая и борная минерализация во многих осадочных толщах, залегающих во впадинах СП. Поскольку размеры диатрем небольшие, то вторичную минерализацию кимберлитов нельзя рассматривать отдельно от процессов, протекавших во вмещающих осадочных породах. Под давлением ВТВ проникали в сравнительно рыхлую массу кимберлитов, разрушая малоустойчивые минералы, а при изменении условий – откладывая по трещинам свои компоненты.

Среди вторичных жильных образований в кимберлитах некоторых диатрем СП были идентифицированы **бораты**. Один из них отнесен к **екатериниту** [11, 13], а второй борат представлен железистой разновидностью ссайбелиита – **ферроссайбелиитом** [13, 16]. Бораты выявлены в мелких соляных жилах и прожилках, где, кроме бесцветного, оранжево-красного и голубого галита отмечены также ангидрит, кальцит и серпентин с ойтовой структурой (серпофит). В мелких прожилках борные минералы вместе не встречались и даже в раздувах не соприкасаются друг с другом (рис. 1 и 2). В раздувах мелких жил екатеринит обычно образует натечные включения в оранжево-красном галите, а в прожилках наблюдается в виде агрегатов, индивиды в которых расположены длинной стороной параллельно друг к другу и перпендикулярно к субстрату. С екатеринитом нередко граничат эллипсовидные выделения светло-серого серпофита, охваченные с двух сторон боратом.

Екатеринит в мономинеральных прожилках в кимберлитовых породах Малоботубинского (МБАР) и Далдыно-Алакитского (ДААР) алмазоносных районов имеет розово-, вишнево- и оранжево-красный цвет. Окраска минерала аллохроматическая, о чем свиде-

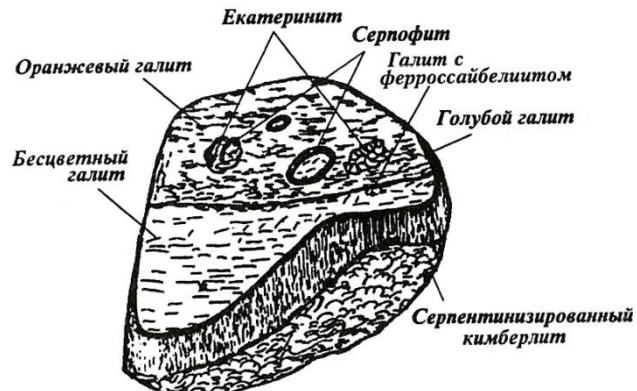


Рис. 1. Особенности выделения боратов в кимберлитовых породах трубки Мир.

[Fig. 1. Features of borate of the Mir tube release in kimberlite rocks.]

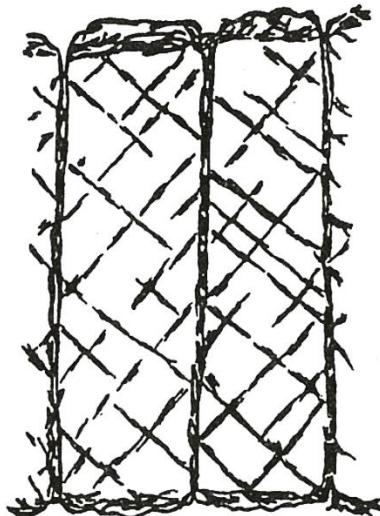


Рис. 2. Вид волокнистого галита с ферроссайбелиитом под оптическим микроскопом (трубка Мир).

[Fig. 2. A view of fibrous halite with ferrossabeliite under an optical microscope (Mir).]

тельствует наличие мелких частиц красящего вещества, обнаруженного под микроскопом, которое неравномерно распределено в бесцветном минерале. Красящим веществом является [8, 12–14] смесь оксидов и гидроксидов железа. В иммерсионном препарате частицы екатеринита имеют удлиненную форму, неровные и занозистые очертания. Удлинение положительное. Показатели преломления: $n_g = 1.583$; $n_p = 1.561$. ИК-спектры исследованного екатеринита аналогичен приведенному для минерала в литературе [10]. Его характерной особенностью является наличие полосы в области коротких длин волн – 3435 см^{-1} (рис. 3), отвечающей молекулярным колебаниям H_2O , что находится в полном соответствии с данными термического анализа и дает основание выделить часть водорода в кристаллохимической формуле в виде молекулярной воды. В этой же области длин волн зафиксирована полоса, связанная с колебаниями гидроксидов. Полосы поглощения, расположенные в области

1450–80 cm^{-1} , свидетельствуют об образовании боро-кислородных тетраэдров, а также о низкой степени конденсации группы BO_3 [11, 13]. На дифрактограмме природных образцов бората зафиксированы рефлексы, межплоскостные расстояния которых отвечают таковым для екатеринита. Наиболее интенсивным является базальный рефлекс второго порядка в области малых углов с $d_{0002} = 1.14 \text{ нм}$ (рис. 4). Это отражение можно использовать и для определения небольшого содержания екатеринита в смеси при условии съемки дифрактограммы от препарата с ориентированными параллельно основанию чешуйчатыми частицами минерала. В ассоциации с екатеринитом в таких смесях обычно отмечаются кальцит и галит. Криевые ДТА дериватограмм таких образований подчеркивают потерю массы минерала отдельными порциями при нагревании до температуры 500°C. Макси-

мальная потеря массы наблюдается при 400–500°C. Экзотермические эффекты (при 500 и 670°C) свидетельствуют о кристаллизации вещества в процессе нагревания. Кроме воды удалялась часть бора (в виде летучих соединений), а также летучие компоненты примесей (CO_2 при разложении карбоната кальция и частично хлористый натрий). Результаты химического анализа екатеринита свидетельствуют о том (табл. 1), что несмотря на тщательный отбор материала на анализы, в исследуемых образцах содержится заметное количество примесей других минералов: карбоната кальция и хлорита натрия, а в других случаях – небольшого количества кремнезема, связанного с магнезиально-железистым силикатом. Количество воды определено по разности между 100 % и суммой всех определенных анализами компонентов (с учетом поправки на хлор).

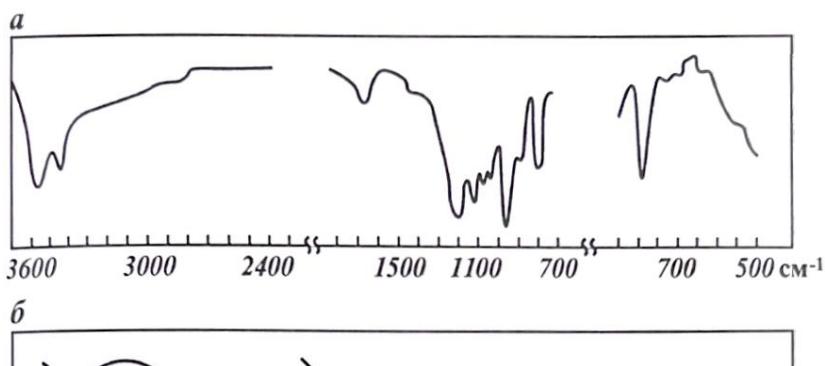


Рис. 3. ИК-спектры поглощения боратов из кимберлитов трубы Мир: *а* – екатеринита, *б* – феррассаибелиита.

[Fig. 3. IR spectra of borate absorption from kimberlite tubes World: (a) – ekaterinite, (b) – ferrossaibelite.]

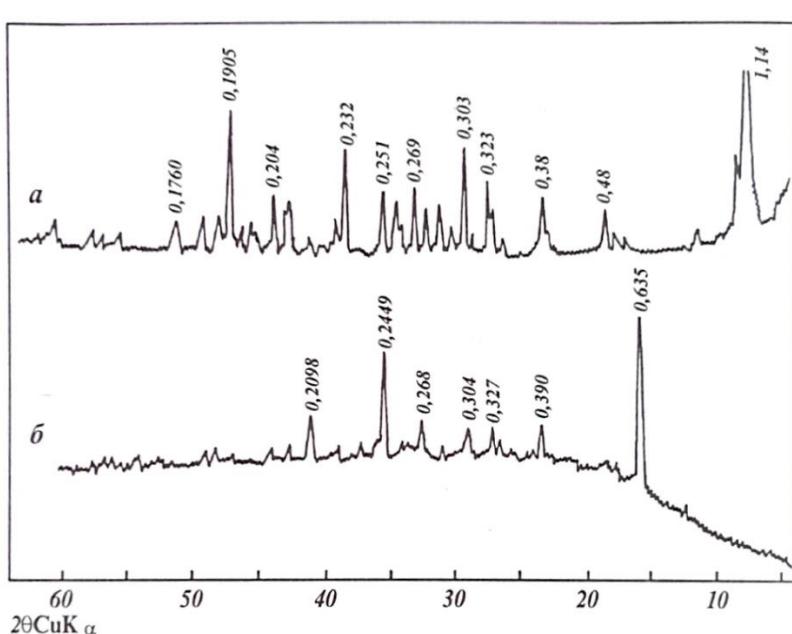


Рис. 4. Дифрактограммы боратов из кимберлитов трубы Мир: *а* – екатеринита, *б* – феррассаибелиита.

[Fig. 4. Diffractograms of borates from kimberlite tubes Mir: (a) – ekaterinite, (b) – ferrossaibelite.]

Табл. 1. Химический состав (%) екатеринита (1 и 2) и феррассайбелиита (3) из кимберлитов трубы Мир
[Table 1. Chemical composition (%) of Yekaterinite (1 and 2) and ferrossaibeliite (3) from kimberlites of the Mir tube]

Компоненты [components]	1	2	3	Компоненты [components]	1	2	3
SiO ₂	-	1.36	0.23	Na ₂ O	2.94	2.56	-
TiO ₂	-	-	-	K ₂ O	-	-	-
B ₂ O ₃	35.96	39.95	30.80	H ₂ O (расч.)	14.23	10.17	7.01
Al ₂ O ₃	0.28	0.60	3.22	CO ₂	0.88	4.40	1.60
Fe ₂ O ₃	0.32	0.32	2.54	Cl	14.29	12.33	-
FeO	-	0.56	28.74	Cl ₂ O	-3.22	-2.78	-
MnO	-	-	0.30	CaCO ₃	2	9	3.64
MgO	0.40	0.40	23.52	NaCl	5.53	4.82	-
CaO	3.92	35.89	2.04				

Примечание: Аналитик Т. Р. Забуга (ПГО «Якутскгеология»)

[Notes: Analyst T. R. Zabuga (PGO "Yakutskgeologiya")]

Рассчитанные по оставшимся после вычета примесей компонентам кристаллические формулы екатеринита отличаются от таковых, приведенных в качестве эталонных [11, 16]: Ca_{2,27}[B₄O₇]₂[Cl_{1,2}(OH)_{1,34}]•2,4 H₂O и Ca_{1,9}[B₄O₇]₂[Cl_{0,02}(OH)_{0,88}]•1,5 H₂O. В одних случаях отмечены завышенные количества кальция, в других – заметна нехватка воды. Отмеченные несоответствия вызваны, по-видимому, незначительными примесями других пока не идентифицированных борных минералов и примазками других новообразований.

Феррассайбелиит в кимберлитовых диатремах СП (Мир, Интернациональная и др.) встречен в виде индивидов вытянутой формы. В одних случаях индивиды напоминают листы, в других – они игловидные. На растровых электронных снимках отчетливо видно [11, 12], что такая форма характерна и для самых мелких частиц этого минерала. Наблюдается расчленение листов с образованием игольчатых вершин у отдельных частей раздвоенных индивидов, развитие которых до некоторой степени обусловлено спецификой их роста. Они обычно расположены по плоскостям спайного галита, создавая нередко лучистые агрегаты. В параллельно-волокнистых выделениях, где индивиды соли ориентированы вдоль оси третьего порядка, иглы бората ориентированы под углом к этому направлению, то есть по направлениям, находящимся в плоскости куба, свидетельствуя о более позднем росте феррассайбелиита. Образование последним удлиненных индивидов определяется также структурой самого минерала (цепочечным строением боратов этой группы). Минерал окрашен в коричневый цвет, иногда с золотистым отливом. Под микроскопом он бесцветный, иногда слабо окрашен. Плеохроизм не обнаружен. Погасание прямое. Удлинение положительное. Оптически минерал одноосный или двухосный с небольшим углом оптических осей. Показатели преломления: $n'_g = 1.640$; $n' = 1.578$.

В области коротких волн ИК-спектра феррассайбелиита четко фиксируется [11, 17] полоса в области 3520 cm⁻¹, отвечающая колебаниям гидроксильов (рис. 3). В сторону увеличения длин волн она не осложняется дополнительной полосой, соответствующей колебаниям молекул воды, как в случае сравнения с

екатеринитом [4, 13]. Отсутствие молекул связной воды в борате исследователи обычно читают основанием для отнесения минерала к безводным разновидностям. В более длинноволновой части спектра отмечается ряд полос, характерных [13] для минералов группы ашарита – суссексита. В области частот 1200–1500 cm⁻¹ отмечается четыре полосы, обусловленные колебаниями борокислородных тетраэдров и треугольных групп [11]. Часть полос в области 700–1000 cm⁻¹ связано с симметрически неплоскими невыраженными колебаниями групп BO₂. Положение этих полос в основном совпадает с таковыми на спектрах боратов группы ашарита-суссексита. Отличие в ИК-спектрах этих минералов и исследованных нами образцов вызваны вхождением в структуру феррассайбелиита железа вместо магния или марганца. Это можно сказать и о вырожденных плоских деформационных колебаниях в области частот 590–680 cm⁻¹. Степень железистости предлагается определять по смещению полосы в области частот 568–526 cm⁻¹. Последнее значение относится к спектру крайнего железистого члена этого изоморфного ряда, а поэтому положение этой полосы может отвечать промежуточному значению этих частот.

Поскольку феррассайбелиит обычно не образует чистых выделений, то на дифрактограммах природных отобранных под бинокуляром образцов практически постоянно фиксируются все главные рефлексы галита. Отмытый от солей минерал показал на дифрактограммах ряд четких рефлексов, наиболее интенсивный среди которых с $d = 0.63$ нм находится в области малых углов может быть использован в диагностических целях для определения данного минерала в смеси (рис. 4). На дифрактограммах природных образцов, предварительно нагретых до 600° С, рефлексов феррассайбелиита не отмечено, а присутствуют только отражения галита. Отмытые от галита и прокаленные до 600° С образцы заметно аморфизируются с частичной кристаллизацией с образованием новой фазы, отличающейся от исходного минерала и диагностируемой как Mg₂B₂O₅. Отмытый от галита образец был снят в рентгеновской камере РКУ-114 [13], в результате чего полученная асимметрическим способом порошкограмма

(Fe-антикатод) позволила довольно четко определить межплоскостные расстояния кристаллической субстанции исследуемого образца. Интенсивности некоторых рефлексов оказались другими, чем на дифрактограмме, что связано с ориентировкой индивидов в препарате в последнем случае. Наиболее чувствительным к замещению «магний-железо» является [8] отражение 031, предлагаемое для определения железистых природных феррассайбелиитов, не содержащих кроме Fe^{2+} других изоморфных примесей в значительных количествах. Железистость $f = FeO / (MgO + FeO)$ исследованного нами феррассайбелиита по рентгеновским данным примерно такая же, как и по химическим – 0.48 %; значения межплоскостных расстояний преимущественно совпадают с литературным данным для образцов феррассайбелиита с $f = 0.5$. Обнаружен также ряд рефлексов, которые фиксируют отражения нерастворимых в воде примесей (кальцита и др.).

На кривых ДТА дериватограмм отмытого от галита образца феррассайбелиита зафиксирован один интенсивный эндотермический эффект с максимумом при $640^\circ C$, который непосредственно переходит в экзоэффект. Поскольку потеря массы при этой температуре значительна, то можно предположить выделение вместе с водой определенного количества бора. Учитывая происходящее окисление железа и его обособление в виде оксидов, вероятно связанные с ним гидроксиды и бор улетучиваются в виде метаборной кислоты. Оставшиеся после выделения летучих бор и магний взаимодействуют между собой с образованием безводного бората $Ng_2B_2O_5$, установленного в результате рентгенометрических исследований. Анализ дериватограмм свидетельствует о неоднородности исследованного вещества – от почти чистого феррассайбелиита до галита, что фиксируется и на ИК-спектрах таких образований [11]. При этом следует отметить, что для кривых ДТА дериватограмм галита характерен один острый пик с максимумом при $810^\circ C$, обусловленный плавлением минерала. В отличие от этого на кривых ДТА дериватограмм образцов, в которых резко преобладает феррассайбелиит, зафиксирован интенсивный эндоэффект при $640^\circ C$ и в области низких температур (~ 120 – $140^\circ C$), а также незначительный эндоэффект при $810^\circ C$ и небольшой экзотермический эффект при $690^\circ C$. Упомянутый эндотермический эффект при $640^\circ C$, который практически начинается при $390^\circ C$, является довольно характерным для описываемого новообразования. Он сопровождается потерей примерно 40 % массы образца. Значительное количество массы ($\sim 30\%$) минерал теряет в интервале примерно $50^\circ C$, начиная с $590^\circ C$. Эндотермический эффект сменяется непосредственно экзотермическим, свидетельствующим о кристаллизации нового вещества. Возможно, в указанном температурном интервале происходит окисление железа. Сдвоенный низкотемпературный эндоэффект также сопровождается потерей значительного ($\sim 10\%$) количества массы образца. Судя по дериватограммам, некоторые образцы теряют 64 % массы при нагревании, причем 44 % этого количества уходит из минерала

постепенно в интервале в $400^\circ C$.

При химическом анализе нерастворимого в воде остатка, состоящего в основном из феррассайбелиита, из-за ограниченного количества материала, не определены прямым способом такие важные летучие компоненты, как CO_2 и H_2O . Кроме них в потерю при прокаливании вошла часть бора, выделившегося из структуры минерала возможно в момент его разложения, в виде метаборной кислоты (отрыв бора от структуры происходил совместно с находящимися в непосредственной близости от него гидроксилами). Поскольку содержание бора в минерале определено химическим путем, а количество CO_2 рассчитано по содержанию CaO , то количество воды мы приняли равным разнице между 100 % и суммой всех остальных компонентов. Найденное таким образом количество воды составляет примерно 7 %. По оставшимся после вычета на карбонат кальция и кремнеземом рассчитана кристаллохимическая формула феррассайбелиита: $Mg_{1,32}Fe_{0,9}Mn_{0,01}Fe_{0,21}[B_{1,86}Al_{0,14}O_4][O_{0,7}(OH)_{0,68}]OH$. Алюминий в структуре минерала, аналогично части бора, находится в четверной координации и поэтому он введен в радикал. Некоторая нехватка воды для образования гидроксида восполняется кислородом. В одних случаях в образцах наблюдается завышенное количество кальция, в других – заметна нехватка воды, что объясняется загрязнением анализируемых образцов возможно другими борсодержащими минералами.

Заключение

Проведенные комплексные исследования екатеринита и феррассайбелиита позволяют высказать соображения об источнике бора для их формирования, используя для этого опубликованные материалы по поведению этого элемента в самых различных геологических процессах: от магматического до экзогенного включительно. При определении возможных источников бора необходимо учитывать, что в кимберлитовых диатремах борные минералы находятся в мелких жилах и прожилках галита, пересекающих на определенной глубине серпентинизированные кимберлитовые породы. Поскольку описанные борные минералы обычно связаны с солями, можно предположить, что бор попал в кимберлиты вместе с растворимыми солями из вмещающих диатремы осадочных соленосных отложений. Но присутствие соленосных формаций в гидрохимическом разрезе обычно не оказывает заметного воздействия на состав подземных рассолов и содержание в них микрокомпонентов. Содержание бора в подсолевых водах на порядок ниже, чем в маточных рассолах соленосных формаций. Содержание бора в кимберлитах примерно в 20 раз больше, чем в свежих перидотитах. Однако в процессе серпентинизации он практически рассеивается и только при наличии излишка магнезии наряду с бруцитом возникает незначительное количество ашарита. Для кимберлитов наблюдается прямая зависимость содержания бора от состава летучей фазы, под воздействием которой осуществляются их метасоматические (автометасоматические)

изменения. Поэтому обогащение подземных рассолов бором следует в значительной степени связывать с глубинными источниками этого элемента. Предпосылкой поступления бора из глубины являются процессы образования самих кимберлитовых диатрем. Образование канала, впоследствии выполненного кимберлитовыми породами, а также образование вокруг него и в самих кимберлитах интенсивной трещиноватости делает возможным сообщение верхних участков диатрем с глубинами, откуда и поступают летучие компоненты в верхние горизонты.

Ферроссайбелиит содержится в галите непосредственно у контактов с кимберлитами или в серпофит-галитовых прожилках. Поскольку рост волокон галита всегда связан с наличием питающего его пористого субстрата, то в последнем случае его роль выполнял не полностью отвердевший агрегат серпентина. Об этом свидетельствуют отпечатки галита в серпофите. Необходимый для образования ферроссайбелиита магний и железо мобилизовались из поровых растворов затвердевающего серпентина, который с понижением температуры становится почти чисто магнезиальным (с небольшими изоморфными примесями железа). Поэтому в развитии ферроссайбелиита важную роль сыграло формирование серпофита и отсутствие окисления железа. В большинстве подобных случаев в серпофите появляются магнетит и доломит. Минералы группы ашарита образуются в широком диапазоне температур гидротермального процесса (от 50 до 250° С). Галит с ферроссайбелиитом возник раньше, чем в трещинах отложилась основная масса солей. Екатеринит формировался в других, чем ферроссайбелиит, условиях в окисной среде, доказательством чего являются включения в нем оксидов и гидроксидов железа. Екатеринит слагает также изолированные включения в галите, что свидетельствует о выпадении его из трещинных (а не из поровых) растворов.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горяйнов С. В., Юрьева О. П., Сонин В. М., Чепуров А. И. Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов У и УП разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2000. № 5. С. 79–97
2. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Харьков А. Д., Соколов В. Н. Закономерности изменения мантийных минералов в коре выветривания кимберлитовых пород // Минерагения зоны гипергенеза. ИГЕМ АН СССР. 1980. С. 45–54
3. Афанасьев В. П., Похilenko Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных М. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 12. С. 1729–1741
4. Затхей Р. А., Хмелевский В. А. О екатерините из кимберлитов Якутии // Минералогический журнал. 1982. Т. 4. № 5. С. 70–75
5. Зинчук Н. Н. Особенности распространения и генезиса некоторых карбонатных минералов в кимберлитовых породах (на примере Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2023. № 6. С. 62–77
6. Зинчук Н. Н. Геолого-тектоническое строение и особенности развития Сибирской платформы в связи с алмазоисковыми работами // Отечественная геология. 2024. № 3. С. 43–72
7. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Геологическая интерпретация результатов изучения глинистых минералов в осадочном чехле земной коры // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2001. № 12. С. 45–51
8. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1997. № 2. С. 53–63
9. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в отложениях терригенной формации // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2001. Т. 76. № 1. С. 45–53
10. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Кристаллохимические и структурные особенности глинистых минералов в корах выветривания в зависимости от типа исходных пород // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2001. Т. 76. № 3. С. 69–79
11. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н., Кузьмин В. А. Морфогенетические разновидности каолинита в корах выветривания и осадочном чехле земной коры. Статья 1. Механизм образования каолинита в корах выветривания различных петрохимических типов пород // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2006. № 5. С. 19–25
12. Малинко С.В., Фитцев Б.П., Кузнецова Н.М., Черкасова Л.Е. Екатеринит – новый минерал бора // Зап. ВМО. 1980. Ч. 109. № 4. С. 469–476
13. Мельник Ю. М., Зинчук Н. Н., Харьков А. Д. Бораты из кимберлитов Якутии // Минерал. сб. Львовского университета. 1984. Вып. 1. № 38. С. 12–18
14. Серокуров Ю. Н., Калмыков В. Д., Зуев В. М. Космические методы при прогнозировании и поисках месторождений алмазов. М.: Недра, 2001. 198 с.
15. Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлисов А. П. Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2002. № 1. С. 47–60
16. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Соколов В. Н. Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания // Геология и геофизика. 1982. № 2. С. 42–53
17. Rosen O. M., Serenko V. P., Spetsius Z. V., Manakov A. V., Zinchuk N. N. Yakutian kimberlite position in the Sibrian craton and composition of the upper and lower crust // Geologiya and Geofizika. 2002. Vol. 43. No. 1. P. 3–26

Зинчук Николай Николаевич, д.г.-м.н., профессор, академик Академии наук РС (Якутия), председатель ЗЯНЦ АН РС (Якутия), Мирный, Республика Саха (Якутия), Российской Федерации; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9682-3022>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Nikolay N. Zinchuk, PhD, Dr. habil. In Geol.-Min., professor, academician of the Academy of Sciences of the RS (Yakutia), chairman of West-Yakutian Scientific Centre of the SR (Yakutia) Academy of Sciences, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9682-3022>

Author have read and approved the final manuscript.

GEOLOGY, SEARCH AND INVESTIGATION OF SOLID MINERAL RESOURCES, MINERAGENY

UDC: 553.251:552.323.6

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/71-79>

Received: 14.02.2025

Accepted: 20.02.2025

Published online: 31.03.2025

Features of the borates in kimberlite rocks

©2025 N. N. Zinchuk[✉]

*West-Yakutian Scientific Centre of the SR (Yakutia) Academy of Sciences,
Tichonova 5/1, 678170, Mirni, Russian Federation*

Abstract

Introduction: the conducted studies have shown a wide variety of kimberlite diatremes on ancient platforms of the world in size, morphokology and depth of the foci, the internal structure, the features of the composition of host rocks, the content and composition of primary (deep) minerals, the composition of bulk of kimberlites and the degree and nature of the processing of the latter in postmagmatic and hypergepic conditions and features. Some of the listed features of kimberlite are due to the manifestation of endogenous factors and some are exogenous. Of particular importance is the presence around the kimberlite diatremes of the Siberian Platform (SP) of terrigenous-carbonate formations of the Silurian, Ordovician, Lower, Middle and Upper Cambrian, represented by limestones, dolomites, mergelites and intermediate differences of these rocks. In the central part of the section of the host rocks. Especially high concentrations of the latter were found in the Lower Cambrian sediments of depths of 900-1200 m. Significant volumes of highly mineralized waters (primes) were also buried in the Lower Cambrian sediments, which significantly affected the material composition of kimberlites in diatremes discovered in this territory. The composition of the strata containing the diatremes, the geological and structural features, of their placement, the degree of pneumatite-hydrothermal and hypergenic transformation led to abundant secondary transformation of kimberlites, in many cases turning them into apokimberlites.

Objects, research methodology and discussion of the result: among secondary minerals of kimberlites of some Siberian platform (SP) diatremes borates have been identified, discovered in small saline veins and veinlets. *Ekaterinit* associates with colorless, orange-red and bluish halite, anhydrite, calcite and serpentine. *Ekaterinit* usually forms sinter inclusions in orange-red halite in bulges of small veins, and in veinlets it is observed in the form of aggregates, individuals in which are located along the long side in parallel to each other and perpendicularly to substrate. The color of *ekaterinit* changes from pink- to cherry-red, and orange-red segregations of the mineral dominate in monogene veinlets. Mixture of oxides and ferric hydroxides serves as the coloring matter. Some individuals of *ferroszaibelyite* have prolate shape. In some cases individuals resemble laths, in others - they are needle-shaped. Development of prolate segregations of *ferroszaibelyite* to some degree is conditioned by specificity of their growth and by structure of the mineral proper (chain structure of borates) as well. The mineral is usually of brown color. In kimberlite pipes boric minerals occur in small veins and veinlets of halite, crossing serpentinous kimberlite at individual depths. Since boric minerals are usually related with salts, there is a supposition that boron was brought into kimberlites together with soluble salts from hosting sedimentary saline deposits. In the course of serpentinization boron practically scatters and only at magnesia available, together with brucite, insignificant quantity of ascharite emerges. Direct dependence of boron content on composition of volatile phase is observed for kimberlites, under influence of which their metasomatic alteration is realized.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Nikolay N. Zinchuk, e-mail: nnzinchuk@rambler.ru

Conclusion: that is why enrichment of underground brines by boron should be connected to a significant degree with abyssal sources of this element. Magnesium and iron (Fe), necessary for formation of ferroszai-belyite, were mobilized from pore solutions of hardening serpentine, which become nearly purely magnesia with lowering of temperature. Ekaterinite was formed in other than ferroszai-belyite conditions in oxide environment, about which inclusions in mineral of oxides and ferric hydroxides testify.

Keywords: kimberlites, ekaterinite, ferrossaibeliite, borate genesis.

For citation: Zinchuk N. N. Features of the borates in kimberlite rocks // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 1, pp. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/71-79>

Conflict of interests: The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Afanas'ev V. P., Eliseev A. P., Nadolinnyj V. A., Zinchuk N. N., Koptil' V. I., Rylov G. M., Tomilenko A. A., Gorjajnov S. V., Jur'eva O. P., Sonin V. M., Chepurov A. I. Mineralogija i nekotorye voprosy genezisa almazov U i UP raznovidnostej (po klassifikacii Ju. L. Orlova) [Mineralogy and some issues of variety V and VII diamonds genesis (by classification of Y. L. Orlov)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2000, no. 5, pp. 79–97 (In Russ.)
2. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Harkiv A. D., Sokolov V. N. Zakanomernosti izmenenija mantijnyh mineralov v kore vyvetrivanija kimberlitovyh porod [Patters of changes in mantle minerals in the weathering crust of kimberlite rocks]. *Mineragenija zony gipereneza – Mineralogy of the hypergenesis zone*, 1980, pp. 45–54 (In Russ.)
3. Afanas'ev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Efimova E.S., Safyannikov V.I., Krasavchikov V.O., Podgorniyh M.M., Prugov V.P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromospinelidov almazosnykh ploschadei v svyazi s problemoi «lozhnykh» indikatorov kimberlitov [Features of the morphology and composition of some chromespinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of "false" indicators of kimberlites]. *Geologija i geofizika – Geology and geophysics*, 2000, vol. 41, no. 12, pp. 1729–1741 (In Russ.)
4. Zathei R. A., Hmelevskij V. A. O ekaterinitie iz kimberlitov Jakutii [About Ekaterinite from the kimberlites of Yakutia]. *Minerologicheskiy zhurnal – Mineralogical journal*, 1982, vol. 4, no. 5, pp. 70–75 (In Russ.)
5. Zinchuk N. N. Osobennosti rasprostranenija i genezisa nekotoryh karbonatnyh mineralov v kimberlitovyh porodah (na primere Sibirskoj platformy) [Specific features of the distribution and genesis of some carbonate minerals in kimberlite rocks (on the example of the Siberian Platform)]. *Otechestvennaja geologija – Otethestvenaya geologiya*, 2023, no. 6, pp. 62–77 (In Russ.)
6. Zinchuk N. N. Geologo-tektonicheskoe stroenie i osobennosti razvitiya Sibirskoj platformy v svyazi s almazopiskovymi rabotami [Geological and structure and development features of the Siberian platform in Connection with diamond prospecting]. *Otechestvennaja geologija – Otethestvenaya geologiya*, 2024, no. 3, pp. 43–72 (In Russ.)
7. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Geologicheskaja interpretacija rezul'tatov izuchenija glinistykh mineralov v osadochnom chehle zemnoj kory [Geological interpretation of the results of the sedimentary cover on the earth's crust]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2001, no. 12, pp. 45–51 (In Russ.)
8. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsii [Features of clay minerals in deposits of various sedimentary formations]. *Izvestiya VUZov. Geologija i razvedka – Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1997, no. 2, pp. 53–63 (In Russ.)
9. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov votlozheniyakh terrigennoi formatsii [Conditions of accumulation and post-sedimentary transformation of clay minerals in the sediments of the terrigenous formation]. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologichesk – Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological department*, 2001, vol. 76, no. 1, pp. 45–53 (In Russ.)
10. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Kristallohimicheskie i strukturnye osobennosti glinistykh mineralov v korah vyvetrivanija v zavisimosti ot tipa ishodnyh porod [Crystal-chemical and structural features of clay minerals in weathering crusts depending on the type of source rocks]. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologichesk – Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological department*, 2001, vol. 76, no. 3, pp. 69–79 (In Russ.)
11. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N., Kuz'min V. A. Morfogeneticheskie raznovidnosti kaolinita v korah vyvetrivanija i osadochnom chehle zemnoj kory. Stat'ja 1. Mechanizm obrazovaniya kaolinita v korah vyvetrivanija razlichnyh petrohimicheskikh tipov porod [Morphogenetic varieties of kaolinite in weathering crusts and sedimentary cover of the cart. Mechanism of kaolinite formation in the weathering crusts of various petrochemical teaks of rocks]. *Izvestija VUZov. Geologija i razvedka – News of universities. Geology and exploration*, 2006, no. 5, pp. 19–25 (In Russ.)
12. Malinko S.V., Fitcev B.P., Kuznecova N.M., Cherkasova L.E. Ekaterinit – novyj mineral bora [Ekaterinite is a new Boron mineral]. *Zap. VMO – Zap. WMO*, 1980, vol. 109, no. 4, pp. 469–476 (In Russ.)
13. Mel'nik Ju. M., Zinchuk N. N., Har'kiv A. D. Boraty iz kimberlitov Jakutii [Kimberlite borates of Yakutia]. *Mineral. sb. L'vovskogo universiteta – Mineral. Sat Lviv University*, 1984, vol. 1, no. 38, pp. 12–18 (In Russ.)
14. Serokurov Ju. N., Kalmykov V. D., Zuev V. M. Kosmicheskie metody pri prognozirovani i poiskah mestorozhdenij almazov [Space methods for forecasting and prospecting for diamond deposits]. Moscow, Nedra publ., 2001, 198 p. (In Russ.)
15. Zinchuk N. N., Zinchuk M. N., Kotel'nikov D. D., Shlykov V. G., Zhuhlistov A. P. Strukturno-kristallohimicheskie preobrazovaniya sloistyh mineralov na raznyh stadiyah giperennogo izmenenija kimberlitov [Structural and crystal-chemical transformations of layered minerals at different stages of hypergenic kimberlite changes]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka – News of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2002, no. 1, pp. 47–60 (In Russ.)
16. Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D., Sokolov V. N. Izmenenie mineral'nogo sostava i strukturnyh osobennostej kimberlitov Jakutii v processe vyvetrivanija [Changes in the mineral composition and structural features of kimberlites of Yakutia during weathering]. *Geologija i geofizika – Geology and Geophysics*, 1982, no. 2, pp. 42–53 (In Russ.)
17. Rosen O. M., Serenko V. P., Spetsius Z. V., Manakov A. V., Zinchuk N. N. Yakutian kimberlite position in the Siberian craton and composition of the upper and lower crust. *Geologiya and Geofizika*, 2002, vol. 43, no. 1, pp. 3–26