

Особенности сульфидов в кимберлитовых породах

©2023 Н. Н. Зинчук[✉]

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

Аннотация

Введение: В результате обобщения огромного фактического, литературного и аналитического материала по геологическому строению, вещественному составу и алмазоносности коренных месторождений многих древних платформ Мира проведена типизация коренных месторождений алмазов по комплексу признаков, составлены типовые модели алмазоносных диатрем Сибирской (СП), Восточно-Европейской (ВЕП), Южно-Африканской (ЮАП) и Австралийской (АВП) платформ. По особенностям геолого-тектонического положения отдельных групп кимберлитов, их минералогическим характеристикам, петрохимии, возрасту, кристалло-морфологическим типам алмазов и алмазоносности отмечаются существенные отличия исходных и преобразованных пород в диатремах.

Объекты, методология исследований, результаты и их интерпретация: Среди вторичных образований кимберлитовых пород древних платформ мира довольно широко распространены минералы класса сульфидов, среди которых доминирующую роль занимает *пирит*. Кроме железистых разновидностей отмечены сульфиды и других металлов. В кимберлитах Сибирской платформы (СП) пирит образует как сплошные массы и агрегаты, так и отдельные кристаллы и их друзы, которые наиболее характерны для верхних горизонтов диатрем, в различной степени затронутых процессами выветривания. Пирит отмечен и на более глубоких горизонтах трубок в зонах влияния высокоминерализованных сероводородных растворов, давших в кимберлитовую среду различные элементы, в том числе и серу, легко соединяющуюся с железом, выделяемым различными изменяющимися минералами. Причины сонахождения различных минералов, отличающихся габитусных форм пирита, могут быть различными: перепад температуры, изменение концентрации железа, водорода, сероводорода и других ионов. *Сфалерит* отмечен в верхних частях многих диатрем СП, ассоциируя с другими сульфидами. Совместно с кальцитом минерал встречен в отдельных прожилках и на глубоких горизонтах ряда диатрем. Чаще всего минерал слагает сплошные массы и неправильной формы выделения в измененных кимберлитах. *Галенит* встречен в небольшом количестве только в верхних частях отдельных трубок в ассоциации с другими минералами. Иногда он отмечается на стенках трещин, образуя идиоморфные кристаллы тетраэдрического габитуса. Установлено несколько морфологических форм минерала: а) октаэдрическая с подчиненным развитием куба и ромбододекаэдра; б) кубическая с подчиненными гранями октаэдра и ромбододекаэдра; в) кубооктаэдрическая. *Миллерит* в кимберлитах встречен в виде примеси в новообразованных сульфидах. *Пирротин* в кимберлитах развивается по мелким трещинкам в виде тонкозернистых мелких агрегатов в кальците, а также разбросанных зерен в основной массе пород. *Точилинит* обнаружен во многих кимберлитовых трубках в ассоциации с другими минералами. *Марказит* встречается как в основной массе пород, так и в виде прожилков и кайм на других новообразованиях. *Халькопирит* также установлен в верхних частях диатрем. Количественные содержания и взаимоотношение различных сульфидов существенно влияют на магнитные и петрофизические свойства пород, что следует



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

учитывать при поисковых работах на алмазы.

Заключение: Основная масса пирита в кимберлитах отложилась до выпадения кальцита, но некоторая его часть кристаллизуется совместно с кальцитом, а также после окончания роста последнего. Кристаллы пирита кубического и октаэдрического габитусов встречаются в одной друзе и их возрастные отношения не всегда ясны. Образование сульфидов происходит вероятно и в настоящее время, поскольку заражение трещинных вод сероводородом в некоторых диатремах достаточно велико. Сульфиды выделялись и в гидротермальную стадию при довольно высоких температурах. Доказательством этому являются включения пирита в аметисте. Главным источником серы для сульфидов были вмещающие кимберлитовые диатремы докембрийские и нижнепалеозойские осадочные толщи, трещинные воды которых (как и высокоминерализованные водные растворы) были обогащены сероводородом.

Ключевые слова: кимберлит, минералы класса сульфидов, свойства и генезис минералов.

Для цитирования: Зинчук Н. Н. Особенности сульфидов в кимберлитовых породах // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 4. С. 47–62. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/47-62>

Введение

Предыдущими работами обобщен огромный фактический, литературный и аналитический материал по геологическому строению, вещественному составу и алмазности коренных месторождений древних платформ Мира [1–12]. Проведена типизация коренных месторождений алмазов по комплексу признаков, составлены типовые модели алмазоносных полей Сибирской (СП), Восточно-Европейской (ВЕП), Южно-Африканской (ЮАП) и Австралийской (АВП) платформ [13–19]. Многими исследователями отмечалась приуроченность коренных месторождений алмазов мантийного происхождения к древним кратонам, консолидация которых завершилась в архее [20–25]. До последнего времени считалось, что в краевых частях кратонов хотя и распространены кимберлиты, но их продуктивность ограничена или они вообще не содержат алмазов, несмотря на наличие в этих частях платформ алмазоносных россыпей. Однако за последние несколько десятилетий открыты коренные месторождения алмазов и в периферийных частях древних кратонов (алмазоносные кимберлитовые трубки ВЕП, лампроитовая трубка Аргайл в Западной Австралии и др.). Такие месторождения алмазов имеют целый ряд особенностей, на основании которых можно выделить самостоятельные периферические алмазоносные зоны, обрамляющие центральные районы практически всех алмазоносных провинций мира [26–32]. Наиболее детально нами изучались алмазоносные породы Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП) СП, простирающейся с юга на север на 1500 км (от Малоботуобинского района до моря Лаптевых) и с запада на восток на 1000 км (от Харамайского кимберлитового поля в Красноярском крае до р. Лены). На севере и востоке границами провинции служат Лено-Анабарский и Лено-Вилуйский прогибы, а на юго-востоке – Ангаро-Вилуйский прогиб и Вилуйская синеклиза. В пределах ЯКП на площади свыше 800 тыс. км² расположено больше 1000 кимберлитовых трубок и дайкоподобных тел, распределенных и сгруппированных в более 20 кимберлитовых полей, которые объединяют в 9 районов [33–37]. По особенностям геолого-

тектонического положения отдельных групп кимберлитов, их минералого-петрографическим характеристикам, петрохимии, возрасту, кристалло-морфологическим типам алмазов и алмазности отмечаются существенные отличия исходных и преобразованных пород в диатремах [38–42].

Объекты, методология исследований, результаты и их интерпретация

Кимберлитовые породы – это сложные природные магматические образования, характеризующиеся рядом оригинальных особенностей [43–50]. К оригинальным минералого-петрографическим особенностям относится совмещение в них признаков как ультраосновных пород, так и щелочных базальтоидов. Кимберлитовые породы древних платформ мира часто изменены вторичными постмагматическими и гипергенными процессами. Для получения сведений о новообразованиях в кимберлитах нами проводились петрографические, минералогические, кристаллографические и кристалло-оптические исследования, гранулометрические анализы, рентгеновский (с использованием ионизационного и в значительной меньшей степени фототрафического способа регистрации дифракционного спектра), электрографические, электронно-микроскопические (съемка на растровом и просвечивающем электронных микроскопах) и рентгено-спектральные исследования, съемка дериватограмм, получение кривых ИКС и ЯГР, химические и количественные спектральные исследования, определение физических и физико-механических свойств и др. [51–59]. Подсчет компонентов в плотных породах проводился в штучных пробах по ранее апробированной методике [60–67].

В кимберлитовых диатремах СП, ВЕП и ЮАП среди вторичных новообразований широким распространением пользуются минералы класса *сульфиды*. Кроме сульфидов железа в кимберлитовых породах идентифицированы образования и других металлов этого класса (галенит, сфалерит и миллерит). Комплексное исследование сульфидов на материале из кимберлитовых трубок Мир, Юбилейная, Интер-

национальная, Удачная, Сытыканская, Айхал, Прогнозная, Ботуобинская, Нюрбинская и др. СП позволяют утверждать, что некоторые минералы этого класса формируются в виде зернистых (халькопирит) или волосовидных (миллерит) агрегатов. Большинство изученных нами сульфидов в кимберлитовых диатремах древних платформ мира образуют друзы или единичные кристаллы в раздувах карбонатных жил и прожилков. **Пирит** образует в кимберлитовых диатремах (рис. 1–4) как сплошные массы и агрегаты, так и отдельные кристаллы и их друзы [10–16]. Сплошные массы пирита, содержащие отдельные кубические кристаллы (рис. 1 а, б), нередко наблюдаются на контакте

светло-серых прожилков серпифита с кимберлитом. Иногда друзы пирита покрыты серовато-белыми выделениями серпентина. В верхних горизонтах трубок (рис. 2) отмечаются участки сильно пиритизированных пород, где пирит ассоциирует в основном с серпентином. Нередко наблюдаются зеркала скольжения, на поверхности которых преобладает (до 95 %) пирит в ассоциации с сульфатами. По трещинам в отдельных интервалах пирит выполняет как прожилки, так и покрывает породу, ассоциируя со сферическими выделениями целестина. Встречается пирит и с хорошо ограниченным кальцитом, образуя иногда псевдоморфозы по последнему.

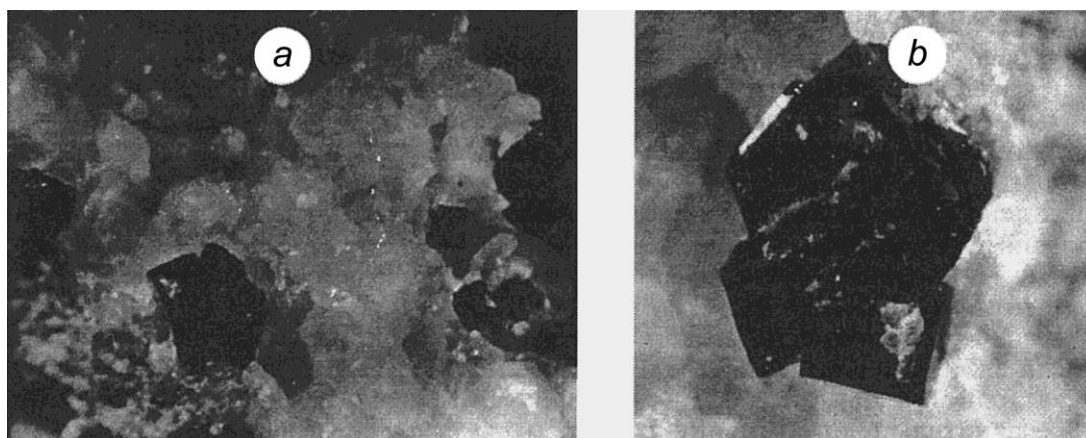


Рис. 1. Пирит кубического габитуса в ассоциации с кальцитом (а) и вершины куба кристаллов пирита притуплены гранями октаэдра (б). Трубка Юбилейная СП. Увеличения: а – 24^х, б – 42^х.

[Fig. 1. Pyrite of cubic habit in association with calcite (a) and the vertices of a cube of pyrite crystals are blunted by the faces of an octahedron (b). Jubilee pipe SP. Magnification: (a) – 24^x, (b) – 42^x.]

Пирит FeS₂ Pyrite
Кубическая сингония,
дидодекаэдрический вид симметрии. T_h – m $\bar{3}$ (3L₂4L₃3PC)

Формы	φ	ρ
100	90° 00'	90° 00'
111	45 00	54 44
021	0 00	63 26

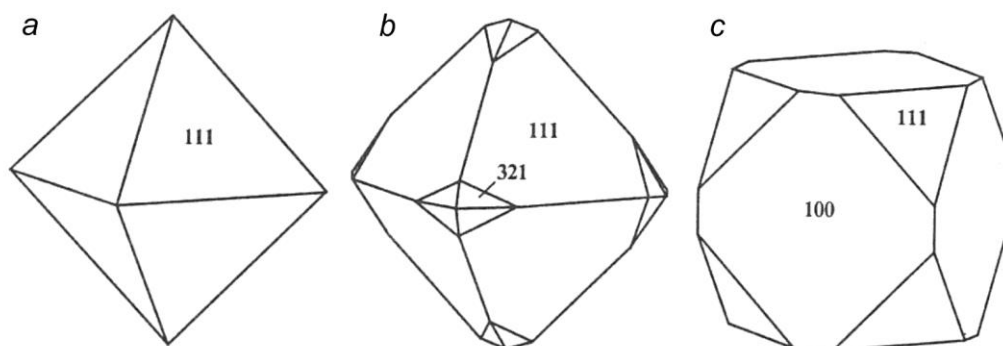


Рис. 2. Морфологические типы кристаллов пирита из кимберлитов. Построено с использованием материалов Б. П. Антонюка и Ю. М. Мельника. Трубки: а – Ботуобинская (обр. РК-82), б и с – Нюрбинская (обр. 16-138/402).

[Fig. 2. Morphological types of pyrite crystals from kimberlites. Constructed using materials of B.P. Antonyuk and Yu. M. Melnik. Tubes: (a) – Botuobinskaya (sample RK-82), (b) and (c) – Nyurbinskaya (sample 16-138/402).]

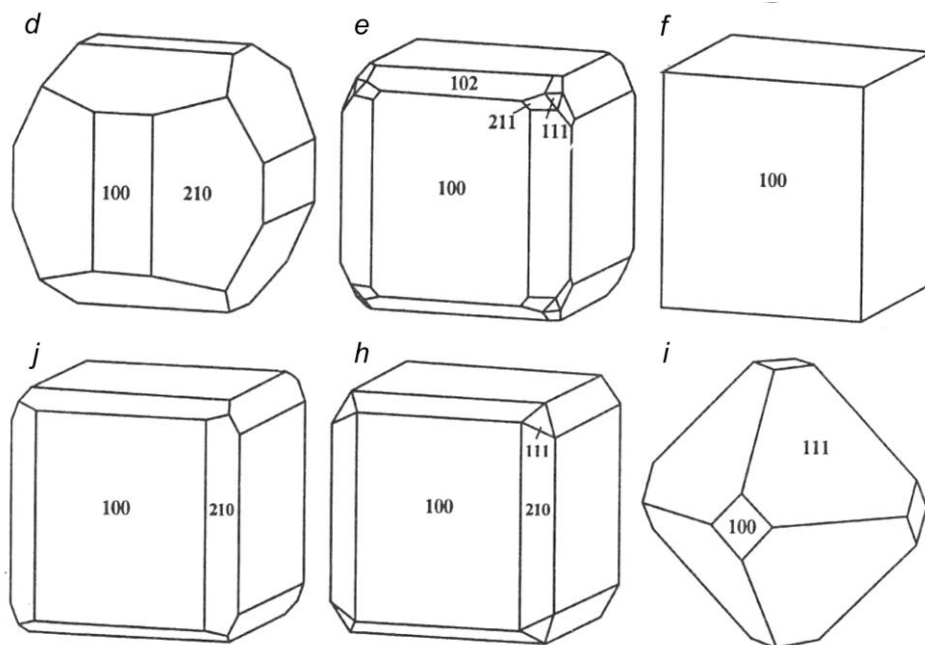


Рис. 2. Морфологические типы кристаллов пирита из кимберлитов. Построено с использованием материалов Б. П. Антоныюка и Ю. М. Мельника. Трубки: *d* – Прогнозная (обр. 14-115), *e-i* – Удачная.

[Fig. 2. Morphological types of pyrite crystals from kimberlites. Constructed using materials of B.P. Antonyuk and Yu. M. Melnik. Tubes: (*d*) – Prognoznaya (sample 14-115), (*e-i*) – Udashnaya.]

Наиболее широким распространением пирит пользуется в верхних частях диатрем, в различной степени измененных гипергенными процессами, где минерал обычно выполняет прожилки, ассоциируя с другими новообразованиями. Отмечаются в таких частях диатрем сферолитовые агрегаты минерала непосредственно в основной массе пород. Нередко выделяется несколько генераций пирита: 1 генерация кубооктаэдрического габитуса с мозаично-блоковым строением локализована в трещинах, выполненных друзами светло-коричневого кальцита. Пирит II генерации – более мелкий, нарастающий на другие минералы (преимущественно кальцита и серпентина), где ему соответствуют на дифрактограммах основные отражения минерала, равные 0,238; 0,1914 и 103 нм. Пирит, преобладающий над другими сульфидами в количественном отношении и по числу ограненных индивидов, представлен [7–9] двумя габитусными формами – кубом и октаэдром (рис. 1а, 1б; рис. 2а, 2е). Вершины октаэдрических кристаллов часто притуплены гранями куба. Кристаллы кубического габитуса иногда осложняются гранями октаэдра, имеющими подчиненное значение. При изучении морфологии пирита из верхних горизонтов трубки Удачная обнаружены кристаллы кубического габитуса, ребра которых притуплены узкими искривленными гранями, не дающими на гониометре четких рефлексов, а по расплывчатым отблескам эти грани отнесены [8, 11, 27–35] к пентагондодекаэдру. Грани октаэдра в большинстве случаев плоские, блестящие, в то время как у пентагондодекаэдра и куба часто выпуклые. Для кубических граней характерна штриховка. Грубая штриховка наблюдает-

ся и на кристаллах кубического габитуса с подчиненными гранями пентагондодекаэдра. Образование ступенек роста на гранях куба зависит от пересыщения раствора и температуры среды кристаллизации [3, 9, 37–42]. При уменьшении пересыщения раствора грани куба гладкие, а пентагондодекаэдра – ступенчатые. Выпуклые грани образуются как в процессе роста, так и при растворении кристаллов. В данном случае могут проявляться оба процесса. Частичное растворение пирита возможно при воздействии меденосных растворов. Проведенные на примере верхних горизонтов (глубины от 295 до 190 м от поверхности диатремы) трубки Удачная (Далдыно-Алакитский алмазоносный район – ДААР) исследования распределения сульфидов железа показали (рис. 3а, 3б) их неравномерный характер, хотя и отмечены некоторые закономерности. Так, в западном теле содержащие пирит участки с содержанием минерала выше 0.5 % приурочены к центральной части, а краевые части обеднены этим минералом. Исключение составляют северные и южные участки восточной части западного тела. Центральная часть восточного тела, наоборот, бедна сульфидами железа, а повышенные их количества отмечены на восточном фланге. Сравнивая распределение минерала в довольно плотных кимберлитах трубки Удачная (рис. 3б) с самым верхним горизонтом (рис. 3а), можно утверждать о существенном влиянии на процессы сульфидизации гипергенных факторов. Несколько отличающаяся характеристика в распределении пирита отмечена для верхних горизонтов трубки Мир (Малоботуобинский алмазоносный район – МБАР), где минерал содержится в небольшом количестве (до нескольких процентов), а повышенные их

количество приурочено к приконтактовым краевым участкам тела. Особенно много аномально повышенных содержаний сульфидов железа в юго-восточной части трубки. Судя по характерной желто-коричневой окраске, пирит распределен в верхних частях диатремы неравномерно, пропитывая небольшие участки породы.

Марказит встречается (рис. 4а, 4с; рис. 5а, 5d) как в основной массе пород, так и в виде прожилков и кайм

вокруг вкрапленного серпентина и других новообразований. Наиболее часто минерал наблюдается в виде кубических и октаэдрических кристаллов, на которых кроме граней пинакоида отмечаются также элементы дипирамиды, придающие друзам таких выделений гребенчатый облик. Анализ ассоциаций минералов показывает [8, 11, 43–48], что марказит более поздний минерал по отношению к пириту.

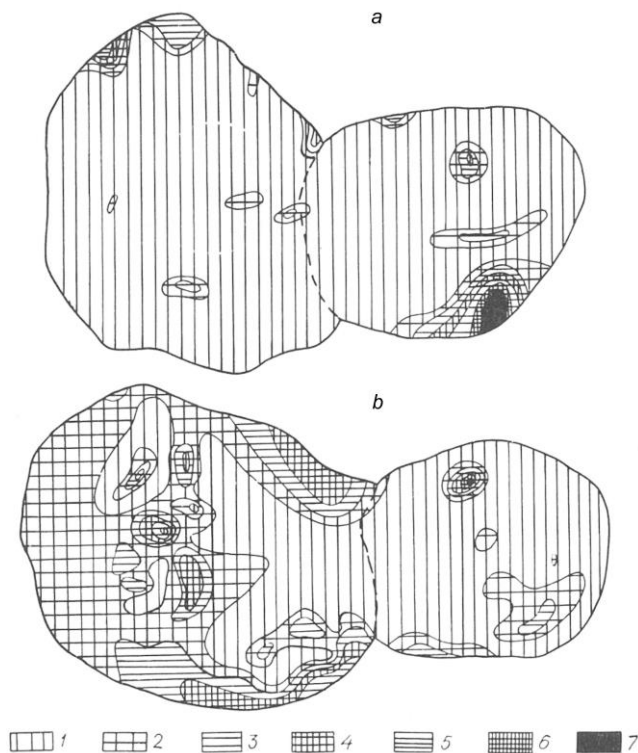


Рис. 3. Схематические карты распределения пирита в кимберлитовых породах трубки Удачная. Горизонты, м: *a* – 295, *b* – 190. Концентрация пирита (в %): 1 – 0–1, 2 – 1–2, 3 – 2–3, 4 – 3–4, 5 – 4–5, 6 – 5–6, 7 – >6.

[Fig. 3. Schematic maps of pyrite distribution in kimberlite rocks of the Udachnaya pipe. Horizons, m: (*a*) – 295, (*b*) – 190. Pyrite concentration (in%): 1 – 0–1, 2 – 1–2, 3 – 2–3, 4 – 3–4, 5 – 4–5, 6 – 5–6, 7 – >6.]

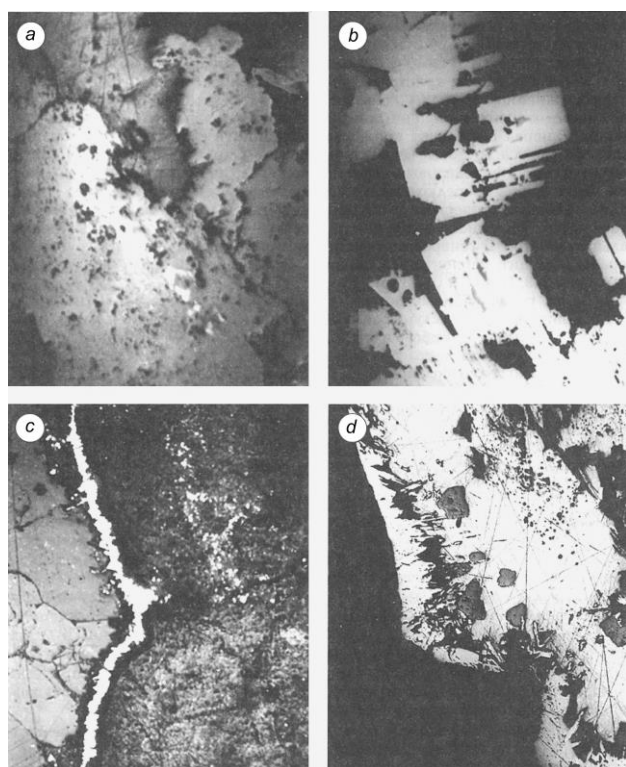


Рис. 4. Выделения сульфидов в кимберлитах СП (полированные шлифы): *a* – реликты марказита (белое) в пирите (серое) – обр. МК-160/78, увеличение 115^x, без анализатора; *b* – реликты пирротина и сфалерита в пирите – обр. МК-175/78, увеличение 115^x, без анализатора; *c* – развитие марказита (белое) на поверхности других сульфидов (серое с высокой шагренью) – обр. МК-1,78, увеличение 50^x, без анализатора; *d* – развитие сфалерита и галенита на поверхности других сульфидов (темное) – обр. МК-1/78, увеличение 55^x, без анализатора.

[Fig. 4. Sulphide segregations in SP kimberlites (polished sections): (*a*) – relics of marcasite (white) in pyrite (grey) – sample. МК-160/78, magnification 115^x, without analyser; (*b*) – relics of pyrrhotite and sphalerite in pyrite – sample МК-175/78, magnification 115^x, without analyser; (*c*) – development of marcasite (white) on the surface of other sulphides (gray with high shagreen) – sample МК-1.78, magnification 50^x, without analyser; (*d*) – development of sphalerite and galena on the surface of other sulphides (dark) – sample. МК-1/78, magnification 55^x, without analyser.]

Марказит FeS₂ Marcasite
Ромбическая сингония,
ромбо-дипирамидальный вид симметрии. D_{2h} – mmm (3L₂3PC)
a : b : c = 0,8194 : 1 : 0,6245

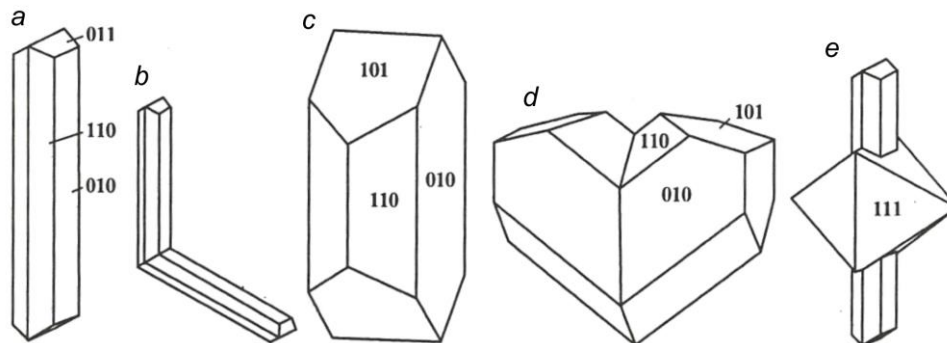


Рис. 5. Морфологические типы кристаллов марказита из кимберлитовой трубки Нюрбинская (обр. Н-16/138-402). Построено с использованием материалов Б. П. Антоныюка: *a* – единичные пластинки; *b* – двойник по [001]; *c* – кристалл моноклинового типа; *d* – двойник по [001] микроклина; *e* – развитие марказита по пириту.

[Fig. 5. Morphological types of marcasite crystals from the Nyurbinskaya kimberlite pipe (sample N-16/138-402). Constructed using materials of B.P. Antonyuk: (a) – single plates; (b) – double at [001]; (c) – crystal of monoclinic type; (d) – twin of [001] of microcline; (e) – development of marcasite after pyrite.]

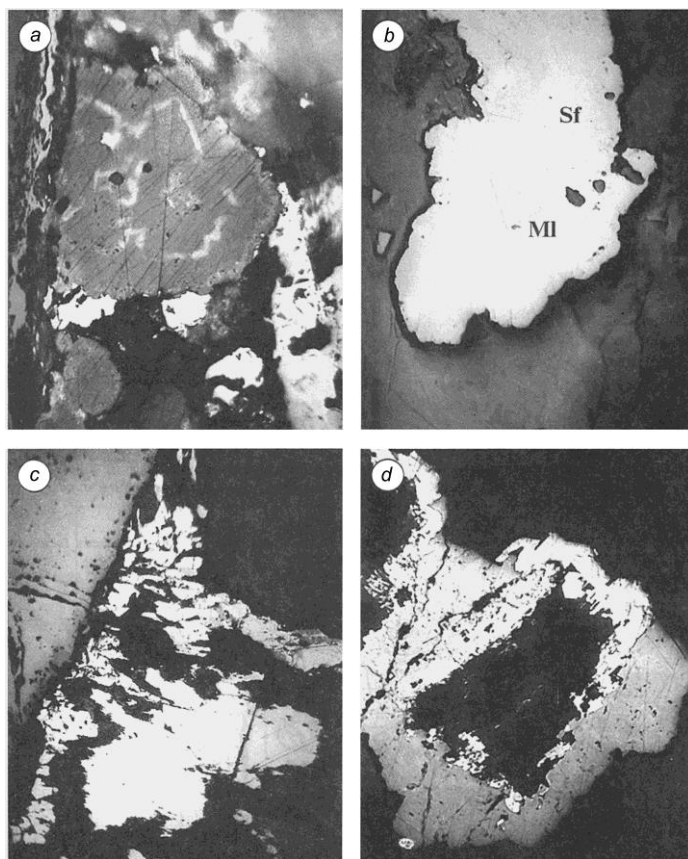


Рис. 6. Выделение сульфидов в кимберлитовых породах СП (полированные шлифы): *a* – зональное строение зерен сфалерита – обр. МК-175/78, увеличение 112^x, с анализатором; *b* – реликты миллерита MI (светло-серое выделение) – обр. МК-175/78, увеличение 125^x, без анализатора; *c* – пирротин с каймой пентландита – обр. МК-39/78, увеличение 110^x, с анализатором; *d* – взаимоотношение пентландита и халькопирита – обр. МК-134/78, увеличение 55^x, без анализатора.

[Fig. 6. Isolation of sulphides in SP kimberlite rocks (polished sections): (a) – zonal structure of sphalerite grains – sample MK-175/78, magnification 112^x, with analyser; (b) – relics of millerite MI (light grey highlight) – sample MK-175/78, magnification 125^x, without analyser; (c) – pyrrhotite with pentlandite rim – sample MK-39/78, magnification 110^x, with analyser; (d) – relationship between pentlandite and chalcopyrite – sample MK-134/78, magnification 55^x, without analyser.]

Сфалерит установлен нами в некоторых горизонтах верхних частей кимберлитовых трубок Мир, Прогнозная, Новинка, Комсомольская-Магнитная и других СП в ассоциации с другими сульфидами (рис. 4б, 4д; рис. 6а, 6б). Совместно с кальцитом минерал встречается в отдельных прожилках и на более глубоких горизонтах этих же диатрем. Отмечен сфалерит и в некоторых типах включений глубинных ультраосновных

пород. На стенках трещин минерал образует идиоморфные кристаллы. Нередко он слагает [6–9, 49–52] сплошные массы и неправильной формы выделения в измененных кимберлитах (апокимберлитах). Сфалерит имеет черный или темно-коричневый цвет с алмазным блеском, уверенно диагностируется на дифрактограммах по серии отражений с межплоскостными расстояниями, равными 0.312; 0.2714; 0.1910 и 0.1636 нм.

Параметр элементарной ячейки сфалерита ($a_0 = 0.8411$ нм) подчеркивает его чистоту в отдельных мономинеральных выделениях. Найденные в небольших пустотах трубки Удачная кристаллы имеют тетраэдрический габитус кристаллов. Кроме граней тетраэдра присутствуют на многих кристаллах другие морфологические формы, которые из-за неровной «изъеденной» поверхности не удалось идентифицировать. Выявлены также кристаллы сфалерита с ровными блестящими гранями, простыми формами на которых являются положительный и отрицательный тетраэдры.

Галенит встречен в небольшом количестве в верхних частях некоторых кимберлитовых диатрем СП (Мир, Юбилейная, Сытыканская, Краснопресненская и др.). Установлены [8–11, 14–20, 53–56] следующие кристаллографические типы галенита (рис. 7а, 7h; рис. 8): а) октаэдрический с подчиненным развитием куба и ромбододекаэдра; б) кубический, где подчинены грани октаэдра и ромбододекаэдра; в) кубооктаэдрический. Галенит обычно находится в ассоциации с кристаллами и

зернами кальцита, выделениями пирита и сфалерита. На дифрактометрических кривых новообразований, содержащих галенит, минералу принадлежат сравнительно интенсивные рефлексы с межплоскостными расстояниями 0.296 и 0.211 нм; $a_0 = 0.592$ нм. Среди вторичных образований трубки Мир (МБАР СП) нередко отмечался галенит, образующий хорошо ограненные кристаллы тех же морфологических типов, которые перечислены выше, но кубооктаэдрические индивиды с примерно одинаково развитыми гранями [100] и [111] наблюдаются сравнительно редко. Присутствуют здесь также гексаэдрические кристаллы, на которых развиты небольшие по площади грани [331] и [721]. Наиболее широко в кимберлитах этой диатремы распространены октаэдрические и кубооктаэдрические кристаллы минерала. На гранях октаэдра обычно развиты выступы сложных очертаний, в пределах которых практически всегда имеются стороны, параллельные одному из ребер. Грани отдельных кристаллов октаэдра сравнительно плоские, реже вогнутые, матовые.

Галенит PbS Galenite
Кубическая сингония,
гексоктаэдрический вид симметрии. $O_h - m\bar{3}m (3L_4 4L_3 6L_2 9PC)$

Формы	φ	ρ
100	90° 00'	90° 00'
011	0 00	45 00
111	45 00	54 44

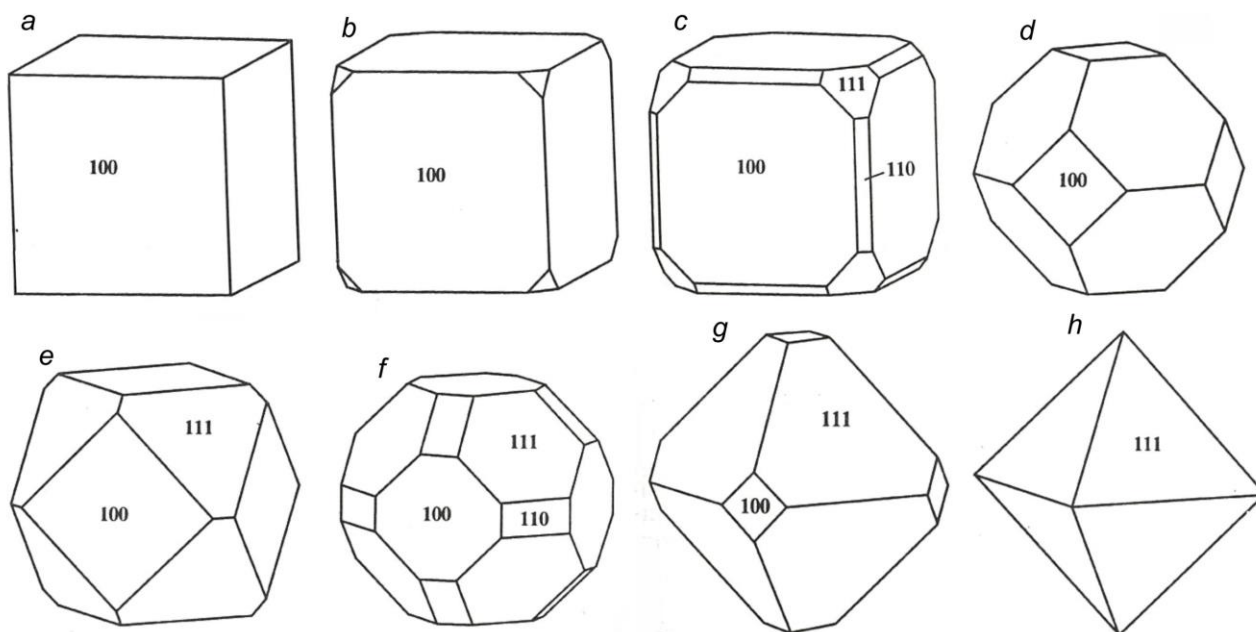


Рис. 7. Морфологические типы кристаллов галенита из кимберлитов верхних горизонтов трубки Мир. Построено с использованием материалов Ю. М. Мельника: а–b – кубический (обр. В-22), d–f – кубооктаэдрический (обр. К-160/78), g–h – октаэдрический (образцы В-22 и К-61/178).

[Fig. 7. Morphological types of galena crystals from kimberlites of the upper horizons of the Mir pipe. Constructed using materials of Yu. M. Melnik: (a–b) – cubic (arr. V-22), (d–f) – cubo-octahedral (sample K-160/78), (g–h) – octahedral (samples B-22 and K-61/178).]

Миллерит отмечен во многих диатремах СП в виде примеси в новообразованиях сульфидов, а иногда образует (рис. 6b) с некоторыми минералами тесные сростания. Встречается минерал и в серпентин-каль-

цитовых псевдоморфозах по оливины, в пустотах выщелачивания, а также в качестве включений в прожилках кальцита. По данным изучения шлифов, в центральных частях зональных кристаллов сфалерита

наблюдаются индивиды миллерита размером до 0.04 мм с характерным треугольным сечением. Он фиксируется также в карбонатных прожилках, а иногда образует мелкие сплошные выделения. В кимберлитах западного тела трубки Удачная миллерит приурочен к местам, где сульфидизация развита слабо [10, 57–59]. Здесь он отмечается также в псевдоморфозах по оливину, ассоциируя с кальцитом. Цвет минерала желтый, золотистый до коричнево-желтого, блеск металлический. Длина его волосовидных индивидов составляет обычно 1–3 мм, достигая в отдельных случаях 10–15 мм. Иногда миллерит образует пучки, радиально-лучистые агрегаты, реже спутанно-волокнистые войлокоподобные корки, состоящие из игольчатых или волосовидных индивидов. Аналогичные агрегаты из волосовидных индивидов из волокнистых индивидов миллерита наблюдались нами в существенном количестве во многих диатремах ДААР (Сытыканская, Юбилейная, Айхал и др.), где рост агрегатов минерала начинается нередко из одного

центра на поверхности друз кальцита.

Пирротин обычно развивается в кимберлитовых породах по мелким трещинам. Часто встречается он в виде тонкозернистых мелких агрегатов в кальцитовых прожилках. Однако чаще всего зерна пирротина разбросаны (рис. 6с) в основной массе кимберлитов. Иногда пирротин образует хорошо ограненные кристаллы, находящиеся в ассоциации с кальцитом. В зальбандах прожилков кальцита пирротин представлен кристаллами (рис. 8, 9) пластинчатого, короткопризматического и бочковидного облика [33–37]. Нередко у кристаллов развиты грани гексагональной дипирамиды и пинакоида. Цвет минерала латунно-желтый, блеск металлический. На дифрактометрических кривых ему соответствуют рефлексы с межплоскостными расстояниями, равными 0.298; 0.264 и 0.207 нм. Судя по межплоскостным расстояниям, пирротин может присутствовать в одном и том же образце в виде двух модификаций – гексагональной и моноклинной ($a_0 = 0.594$ нм; $c_0 = 1.134$ и 0.567 нм соответственно).

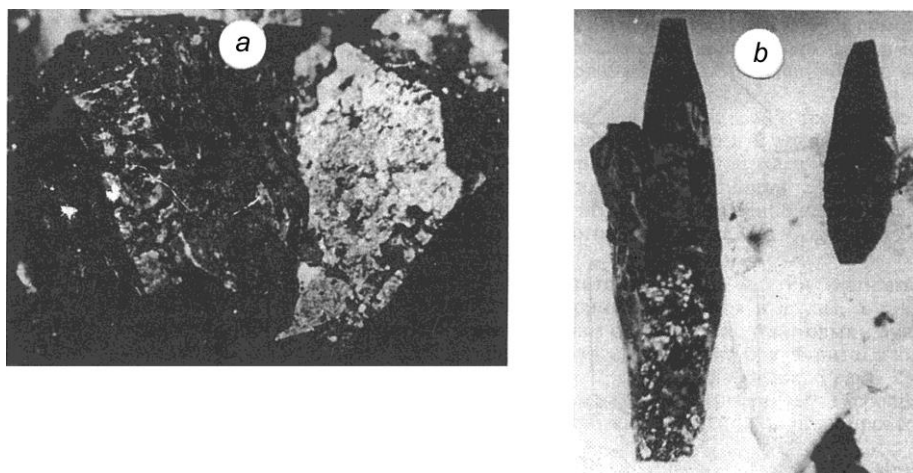


Рис. 8. Форма кристаллов сульфидов из кимберлитов СП: *a* – галенит кубического габитуса с подчиненным развитием граней октаэдра и ромбододекаэдра (трубка Мир, увеличение $24\times$); *b* – гексагонально-дипирамидальные индивиды пирротина (трубка Удачная, увеличение $42\times$).

[**Fig. 8.** Form of sulphide crystals from SP kimberlites: (*a*) – galena of cubic habit with subordinate development of octahedron and rhombic dodecahedron faces (Mir tube, magnification $24\times$); (*b*) – hexagonal-bipyramidal pyrrhotite individuals (Udachnaya pipe, magnification $42\times$).]

Точилинит диагностирован [8–11, 14–25] во многих кимберлитовых диатремах СП (Мир, Удачная, Юбилейная, Сытыканская, Обнаженная и др.), где его агрегаты имеют черный цвет с бронзовым оттенком. На воздухе этот минерал быстро покрывается пленкой гидроксидов железа, что усложняет расчет состава минерала, наиболее чистые, не успевшие окислиться разновидности которого выражает формула: $6\text{FeS}\cdot 5[\text{Mg}, \text{Fe}(\text{OH})_2]$. Точилинит иногда развивается также по псевдоморфозам серпентина, придавая им темно-серую окраску. Нередко в зальбандах жильного кальцита розетки мелкочешуйчатого точилинита ассоциируют с пиритом и пирроауритом. На дифрактометрических кривых новообразований, содержащих точилинит, которому соответствуют рефлексы с межплоскостными расстояниями, равными 1.065 и 0.537 нм. На кривых ДТА новообразований, обогащенных точили-

нитом, отмечается характерный экзотермический эффект при температурах 480–515°C, обусловленный окислением FeO. Интенсивность этого экзозффекта обычно уменьшается с увеличением размера частиц точилинита. Присутствие на дериватограммах других термических эффектов связано с примесями других новообразований (кальцита, серпентина и др.). Это подтверждается и ИК-спектрами минерала, на которых фиксируется серия полос поглощения в области 400–1400 и 3500–3700 cm^{-1} . В отдельных случаях точилинит ассоциирует с небольшой переменной примесью *макинавита*, уверенно диагностируемого на дифрактограммах по рефлексам с межплоскостными расстояниями, равными 0.498; 0.2949 и 0.2298 нм.

Халькопирит установлен в кимберлитах верхних горизонтов отдельных кимберлитовых диатрем СП [8, 11–13, 27, 37–39], где обычно образует две генерации.

Первая генерация замещает (рис. 4d) другие сульфиды (пентландит и др.) и развивается по трещинам в кимберлите. Встречаются также реликтовые выделения пентландита, замещенного халькопиритом. Образования в виде кристаллов халькопирита очень редки. Вторая генерация представлена мелкой вкрапленностью

халькопирита, ассоциирующего с другими сульфидами. На рентгенограммах халькопирит диагностируется по серии отражений с межплоскостными расстояниями, равными 0.303; 0.258; 0.186 и 0.158 нм. Параметры элементарной ячейки минерала: $a_0 = 0.527$ нм; $c_0 = 1.039$ нм.

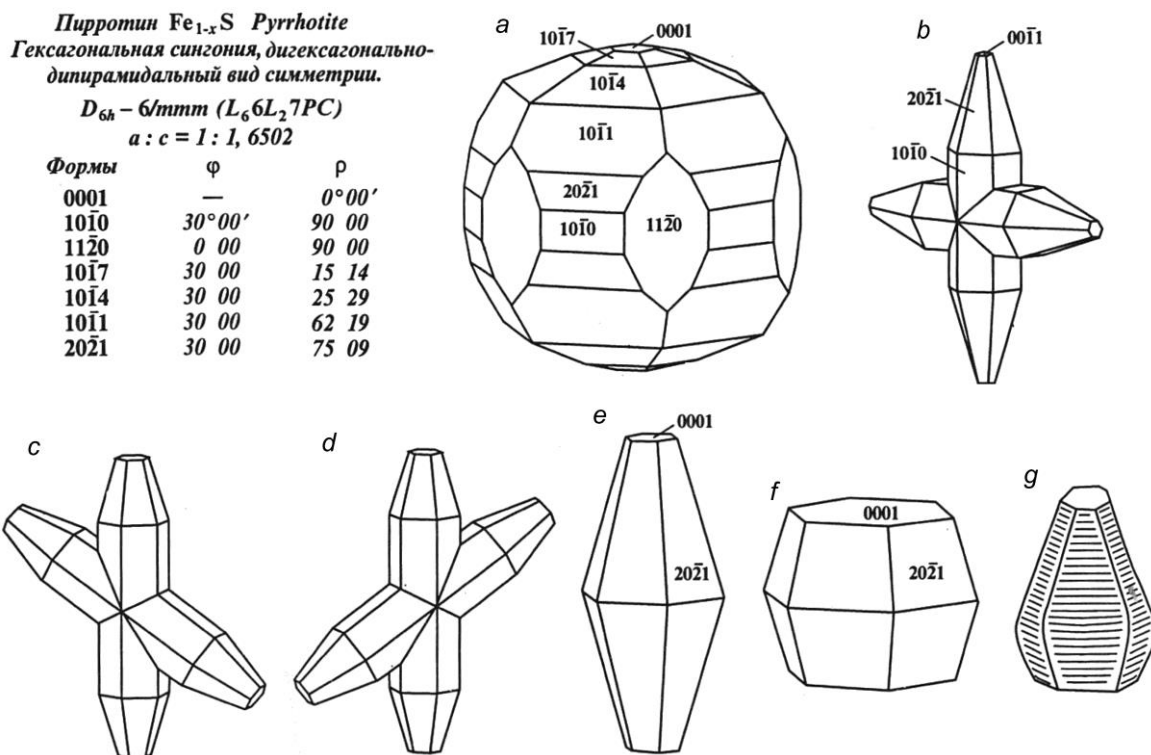


Рис. 9. Морфологические типы кристаллов пирротина из кимберлитов трубки Удачная (проба 209/761). Построено с использованием материалов Б. П. Антоноука и Ю. М. Мельника: *a* – комбинированный кристалл, *b–d* – крестообразные двойники прорастания, *e* – пирамидальный кристалл, *f* – бочонковидный кристалл, *g* – реальный кристалл с искривленными гранями.

[Fig. 9. Morphological types of pyrrhotite crystals from kimberlites of the Udachnaya pipe (sample 209/761). Constructed using materials of B.P. Antonyuk and Yu. M. Melnik: (*a*) – combined crystal, (*b–d*) – cruciform germination twins, (*e*) – pyramidal crystal, (*f*) – barrel-shaped crystal, (*g*) – real crystal with curved facets.]

Закключение

Таким образом, проведенными комплексными исследованиями установлено, что основная масса пирита в кимберлитах отложилась до выпадения кальцита, но некоторая его часть кристаллизуется совместно с кальцитом, а также после окончания роста последнего. Кристаллы пирита кубического и октаэдрического габитусов часто встречаются в одной друзе и их возрастные отношения не всегда ясны. Причины подобного сонахождения неодинаковых габитусных форм пирита могут быть различны: перепад температуры, изменение содержания железа, водорода и сероводорода, а также появление других ионов. Поскольку образованию октаэдрических кристаллов содействуют ионы таких элементов, как кобальт и никель, то можно предполагать, что зародыши, появившиеся на серпентине, дадут начало октаэдрическим кристаллам, а на карбонате – кубическим.

Образование сульфидов (в первую очередь сульфидов железа) происходит вероятно и в настоящее время, поскольку заражение трещинных вод сероводородом в

некоторых диатремах (особенно в МБАР и ДААР СП) достаточно велико. Сульфиды выделялись и в гидротермальную стадию при довольно высоких температурах. Доказательством этому являются включения пирита в аметисте. Главным источником серы для сульфидов были вмещающие кимберлитовые диатремы докембрийские и нижнепалеозойские осадочные толщи, трещинные воды которых (как и высокоминерализованные водные растворы) были обогащены сероводородом. Об этом свидетельствует габитус цинковой обманки, а также отсутствие среди вторичных образований сульфидов сидерита. Кроме сульфидов железа в кимберлитовых диатремах встречаются также новообразования тяжелых металлов данного класса. Сульфидная медно-свинцово-цинковая и ртутная минерализация характерно не только для плутонических, но и для многих осадочных образований. Скопления халькопирита, галенита и сфалерита часто встречаются в центральных частях конкреций палеозойских фосфоритов. Галенит и сфалерит накапливаются в гипсовых шляпах соляных месторождений. Развитие тех или иных форм на

кристаллах этих минералов в значительной степени зависит от состава и лабильности растворов. Кубооктаэдры обычно образуются при очень высоком пересыщении растворов. Стабилизация октаэдрических граней галенита возможна вследствие поверхностной адсорбции серебра, висмута или H_2S и хлор-иона, который захватывается растущим кристаллом в виде $PbCl_2$. Образование кристаллов сфелерита и галенита происходило не в столь разнообразных условиях, чем в ряде сульфидных месторождений. Миллерит относится в кимберлитах к наиболее поздним жильным образованиям класса сульфидов. Он возник в гидротермальную стадию с участием сероводородистых растворов, а никель мобилизовался из силикатов в процессе их постмагматического и гипергенного изменения. Киноварь установлена в грязевых вулканах и доказан в них перенос ртути органическими соединениями. Всё это дает основание утверждать, что поступление в кимберлитовые диатремы тяжелых металлов не обязательно должно быть связано только с магматическим очагом. Они (особенно свинец и цинк) могли частично мобилизоваться в кимберлитовых трубках и за счет вмещающих пород.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горяинов С. В., Юрьева О. П., Соинин В. М., Чепуров А. И. Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2000. № 5. С. 79–97.
- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 361. № 3. С. 366–369.
- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логвинова А. Н. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // *Записки Российского минералогического общества*. 2009. Т. 138. № 2. С. 1–13.
- Афанасьев В. П., Похиленко 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.
- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н. Минерагения древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы // *Геология и геофизика*. 1987. № 1. С. 90–96.
- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Харьков А. Д., Соколов В. Н. Закономерности изменения мантйных минералов в коре выветривания кимберлитовых пород. Минералогия зоны гипергенеза. М.: Наука, 1980. С. 45–54.
- Бардухинов Л. Д., Зинчук Н. Н. Алмазы из древних осадочных толщ и их поставщики (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // *Руды и металлы*. 2022. № 2. С. 65–86.
- Братусь М. Д., Сворень И. М., Зинчук Н. Н., Аргунов К. П. Газовые компоненты включений в алмазах различных морфологических типов из Якутии // *Геохимия*. 1991. № 11. С. 1586–1595.
- Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Красавчиков В. О., Будаев Д. А., Кузнецова Л. Г. Критерии петрохимической идентификации кимберлитов // *Геология и геофизика*. 2000. Т. 41. № 12. С. 1748–1759.
- Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г., Минин В. А., Холодова Л. Д. Средние составы кимберлитовых тел Вилуйской субпровинции Якутии как основа для формационной идентификации кимберлитов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2006. № 2. С. 126–140.
- Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2000. № 3. (9). С. 37–55.
- Василенко В. Б., Кузнецова Л. Г., Зинчук Н. Н. Петрохимическая фактография кимберлитовой провинции Восточной Сибири. Новосибирск: Параллель, 2019. 754 с.
- Егоров К. Н., Зинчук Н. Н., Мишенин С. Г., Серов В. П., Секерин А. П., Галенко В. П., Денисенко Е. П., Барышев А. С., Меньшагин Ю. В., Кошкарёв Д. А. Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы. Сб.: Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методического обеспечения их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Мирный: МГТ, 2003. С. 50–84.
- Зинчук Н. Н. Особенности состава и распределения слюдястых образований в кимберлитовых породах Якутии // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 1991. № 7. С. 58–66.
- Зинчук Н. Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 2. С. 29–39.
- Зинчук Н. Н. Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмаза на Сибирской платформе // *Отечественная геология*. 2021. № 2. С. 41–56.
- Зинчук Н. Н. Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 3. С. 50–61.
- Зинчук Н. Н. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 4. С. 35–52.
- Зинчук Н. Н. Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов // *Отечественная геология*. 2022. № 1. С. 36–47.
- Зинчук Н. Н. Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // *Руды и металлы*. 2022. № 2. С. 100–120.
- Зинчук Н. Н. Кремнистые минералы в кимберлитах // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. № 4. С. 38–52.
- Зинчук Н. Н. Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород // *Отечественная геология*. 2022. № 4. С. 34–49.
- Зинчук Н. Н. О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий // *Отечественная геология*. 2023. № 1. С. 42–55.
- Зинчук Н. Н. Литолого-стратиграфические исследования при алмазопроисковых работах // *Вестник СВФУ. Науки о Земле*. 2023. № 1(29). С. 5–28.
- Зинчук Н. Н. Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдястых кимберлитов // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2023. Т. 22. № 1. С. 32–50.
- Зинчук Н. Н. Сульфаты в кимберлитовых породах // *Отечественная геология*. 2023. № 2. С. 56–72.
- Зинчук Н. Н. Об особенностях флюидных и гидротермальных включений в некоторых минералах кимберлитов // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении*. 2023. Вып. 26. С. 45–64.
- Зинчук Н. Н. Особенности кальцита из кимберлитовых пород // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 2. С. 28–43.
- Зинчук Н. Н., Афанасьев В. П. Генетические типы и основные закономерности формирования алмазоносных россыпей //

- Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 1998. № 2. С. 66–71.
30. Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы) // *Руды и металлы.* 2021. № 3. С. 59–75.
31. Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. Алмазы из низкопродуктивных кимберлитов // *Руды и металлы.* 2022. № 1. С. 77–93.
32. Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. О специфике докембрийских источников алмазов в россыпях // *Вестник Пермского университета. Геология.* 2022. Т. 21. № 2. С. 149–166.
33. Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. Алмазы из полупромышленных кимберлитов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2022. № 2. С. 32–45.
34. Зинчук Н. Н., Борис Е. И. О концентрации продуктов переотложения кор выветривания в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // *Геология и геофизика.* 1981. № 8. С. 22–29.
35. Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Стегницкий Ю. Б. Структурно-формационное и минерагеническое районирование территорий развития погребенных кор выветривания и продуктов их переотложения в алмазоносных регионах (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // *Геология и геофизика.* 1998. Т. 39. № 7. С. 950–964.
36. Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов 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.
37. Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Копиль В. И., Чёрный С. Д. Стратегия ведения и результаты алмазопроисковых работ // *Горный Вестник.* 1997. № 3. С. 53–57.
38. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Горшков А. И. Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки // *Литология и полезные ископаемые.* 2003. № 1. С. 87–96.
39. 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.
40. Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П. Апокимберлитовые породы // *Геология и геофизика.* 1987. № 10. С. 66–72.
41. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Крайнов А. В. Кимберлиты в истории Земли. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 68. 2013. 99 с.
42. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Шевырев Л. Т. Историческая минерагения в 3-х томах: Т.1. Введение в историческую минерагению. -Воронеж: ВГУ. 2005. 590 с; Т.2. Историческая минерагения древних платформ. -Воронеж: ВГУ. 2007. 570 с; Т.3. Историческая минерагения подвижных суперпооясов. -Воронеж: ВГУ. 2008. 622 с.
43. Кедрова Т. В., Богущ И. Н., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Алмазы укугутской свиты россыпи Нюрбинская, Накынское кимберлитовое поле Сибирской платформы // *Руды и металлы.* 2020. № 2. С. 69–77.
44. Кедрова Т. В., Богущ И. Н., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Типоморфные свойства алмазов дхятярской толщи россыпи Нюрбинская // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2020. № 3. С. 45–54.
45. Кедрова Т. В., Богущ И. Н., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н., Афанасьев В. П. Россыпи алмазов Накынского поля // *Геология и геофизика.* 2022. Т. 63. № 3. С. 291–302.
46. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдистых минералов // *Известия ВУЗов. Геология и разведка.* 1996. № 1. С. 53–61.
47. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // *Известия ВУЗов. Геология и разведка.* 1997. № 2. С. 53–63.
48. 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.
49. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2001. № 2. С. 45–51.
50. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2003. № 2. С. 57–68.
51. Соболева С. В., Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Особенности флогопита мантийного происхождения // *ЗВМО.* 1979. Ч. 108. Вып. 6. С. 678–685.
52. Соболева С. В., Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Динамика изменения флогопита в процессе формирования кимберлитовых пород Якутии // *Рентгенография минерального сырья и строение минералов.* 1981. С. 147–155.
53. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Богатых М. М., Романов Н. Н. Модель кимберлитовой трубки Якутской алмазонасной провинции // *Советская геология.* 1990. № 1. С. 23–29.
54. Харьков А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов А. В., Богатых М. М. Петрохимия кимберлитов. М.: Недра, 1991. 304 с.
55. Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // *Доклады АН СССР.* 1987. Т. 296. № 5. С. 1228–1233.
56. Зинчук Н. Н. Строение и состав коры выветривания на терригенно-карбонатных породах в алмазоносных регионах // *Вестник Пермского университета. Геология.* 2017. Т. 16. № 3. С. 199–215.
57. Зинчук Н. Н. Особенности состава и формирования кимберлитовых пород // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении.* 2014. Вып. 17. С. 123–138.
58. Зинчук Н. Н. Отличительные черты гипергенного изменения пород различного состава // *Вестник Пермского университета. Геология.* 2014. № 3(24). С. 19–22.
59. Зинчук Н. Н. Особенности терригенного материала в древних алмазоперспективных осадочных толщах // *Вестник Пермского университета. Геология.* 2019. Т. 18. № 3. С. 253–266.
60. Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н. О бруситизации кимберлитовых пород // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении.* 2014. Вып. 17. С. 137–147.
61. Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н. О серпентинизации кимберлитов // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении.* 2015. Вып. 18. С. 154–166.
62. Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б., Романова Е. А. Минералы тяжелой фракции из измененных кимберлитов поля Каток (Ангола) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2021. № 1. С. 36–52.
63. Зинчук Н. Н. Особенности глинистых минералов в древних корах выветривания различных пород в алмазоносных регионах // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении.* 2015. Вып. 18. С. 53–72.
64. Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б. Особенности коры выветривания кимберлитов северо-востока Анголы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2020. № 2. С. 6–19.
65. Vasilenko V. V., Kuznetsova L. G., Volkova N. I., Zinchuk N. N., Krasavchikov V. O. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry // *Jornal of Geochecal Exploration.* 2002. Vol. 76. No. 2. P. 93–112.
66. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform // *Doklady Earth Sciences.* 2015. Vol. 465. No. 2. P. 1297–1301.
67. Serov I. V., Gararin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform // *Petrology.* 2001. Vol. 9. No. 6. P. 576–588

Features of sulphides in kimberlite rocks

©2023 N. N. Zinchuk[✉]

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

Abstract

Introduction: As a result of the generalization of a huge amount of factual, literary, and analytical material on the geological structure, material composition and diamond content of the primary deposits of many ancient platforms of the world, the typing of primary diamond deposits was performed according to a set of characteristics, standard models of the diamond-bearing diatremes of the Siberian (SP), East European (EEP), South African (SAA) and Australian (AuP) platforms. Based on the peculiarities of the geological and tectonic position of individual groups of kimberlites, their mineralogical and petrographic characteristics, petrochemistry, age, crystal and morphological types of diamonds and diamond content, significant differences are noted between the original and transformed rocks in diatremes.

Objects, methods, results and discussion: Among the secondary formations of kimberlite rocks of the ancient platforms of the world, sulphide minerals are quite widespread, among the dominant role belongs to *pyrite*. In addition to ferruginous varieties, sulphides of other metals were also noted. In kimberlites of the Siberian Platform (SP), pyrite forms both continuous masses and aggregates, as well as individual crystals and their druses, which are most characteristic of the upper horizons of diatremes, affected to varying degrees by weathering processes. Pyrite was also noted on the deeper horizons of the pipes in zones influenced by highly mineralized hydrogen sulphide solutions, which introduced various elements into the kimberlite environment, including sulphur, which easily combines with iron released by various changing minerals. The reasons for the co-occurrence of various minerals with different habit forms of pyrite can be different: temperature changes, changes in the concentration of iron, hydrogen, hydrogen sulphide and other ions. *Sphalerite* noted in the upper parts of many SP diatremes, associated with other sulphides. Together with calcite, the mineral was found in individual veins and at the deep horizons of a number of diatremes. Most often, the mineral composes continuous masses and irregularly shaped segregations in altered kimberlites. *Galena* was revealed in small quantities only in the upper parts of individual pipes in association with other minerals. Sometimes it was noted on the walls of cracks, forming euhedral crystals of tetrahedral habit. Several morphological forms of the mineral have been established: a) octahedral with the subordinate development of a cube and a rhombic dodecahedron; b) cubic with subordinate faces of the octahedron and rhombic dodecahedron; c) cuboctahedral. *Millerite* in kimberlites was found as an impurity in newly formed sulphides. *Pyrrhotite* in kimberlites develops along small cracks in the form of fine-grained small aggregates in calcite, as well as scattered grains in the bulk of the rocks. *Tochilinite* was found in many kimberlite pipes in association with other minerals. *Marcasite* was found both in the bulk of rocks and in the form of veins and borders on other new formations. *Chalcopyrite* also was revealed in the upper parts of the diatremes. The quantitative contents and relationships of various sulphides significantly affected the magnetic and petrophysical properties of rocks, which should be taken into account when prospecting for diamonds. *Conclusions:* The bulk of pyrite in kimberlites was deposited before the precipitation of calcite, but some of it crystallizes together with calcite, and also after the growth of the latter ceases. Pyrite crystals of cubic and octahedral habit occur in the same druse, and their age relationships are not always clear. The formation



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

of sulphides probably currently takes place, since the contamination of fractured waters with hydrogen sulphide in some diatremes is quite high. Sulphides were also released during the hydrothermal stage at fairly high temperatures. Proof of this are the inclusions of pyrite in amethyst. The main source of sulphur for sulphides was the Precambrian and Lower Paleozoic sedimentary strata hosting kimberlite diatremes, the fissure waters of which (as well as highly mineralized aqueous solutions) were enriched with hydrogen sulphide.

Keywords: kimberlite, sulphide class minerals, properties and genesis of minerals.

For citation: Zinchuk N. N. Features of sulphides in kimberlite rocks // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 47–62. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/47-62>

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., Nadolnnyi V. A., Zinchuk N.N., Koptil' V.I., Rylov G.M., Tomilenko A.A., Goryainov S.V., Yur'eva O.P., Sonin V.M., Chepurov A.I. Mineralogiya i nekotorye voprosy genezisaalmazov V i VII raznovidnostei (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some issues of the genesis of V and VII varieties of diamonds (according to the classification of Yu.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., Koptil' V. I. Poligenezalmazov v svyazi s problemoi korennykh rossypei severo-vostoka Sibirskoi platform [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of bedrock placers in the north-east of the Siberian platform]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 1998, vol. 361, no. 3, pp. 366–369 (In Russ.)
3. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Logvinova A. N. Osobennosti raspredeleniya rossypnykhalmazov, svyazannykh s dokembriiskimi istochnikami [Peculiarities of distribution of placer diamonds associated with Precambrian sources]. *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva – Notes of the Russian Mineralogical Society*, 2009, vol. 138, no. 2, pp. 1–13 (In Russ.)
4. Afanas'ev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Efimova E.S., Sa'f'yannikov V.I., Krasavchikov V.O., Podgornyykh M.M., Prugov V.P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh plohshchadei 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]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 2000, vol. 41, no. 12, pp. 1729–1741 (In Russ.)
5. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N. Mineralogiya drevnikh rossypeialmazov vostochnogo borta Tungusskoi sineklizy [Mineralogy of ancient diamond placers of the eastern side of the Tunguska syncline]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1987, no. 1, pp. 90–96 (In Russ.)
6. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Har'kiv A. D., Sokolov V. N. Zakonomernosti izmeneniya mantijnykh mineralov v kore vyvetrivanija kimberlitovykh porod [Regularities of mantle mineral alteration in the crust of weathering of kimberlites]. *Mineralogija zony gipergeneza* [Minerageny of hypergenesis zone]. Moscow, Nauka publ., 1980, pp. 45–54 (In Russ.)
7. Barduchinov L. D., Zinchuk N. N. Almazy iz drevnih osadochnykh tolshh i ih postavshhiki (na primere Jakutskoj kimberlitovoj provincii) [Diamonds in old sedimentary rocks and their source (on the basis of Yakutia kimberlite province)]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2022, no. 2, pp. 65–86 (In Russ.)
8. Bratus' M.D., Svoren' I.M., Zinchuk N.N., Argunov K.P. Gazovye komponenty vkljuchenij v almazah razlichnykh morfologicheskikh tipov iz Jakutii [Gas components of inclusions in diamonds of various morphological types from Yakutia]. *Geohimija – Geochemistry*, 1991, vol. 11, pp.1586–1595 (In Russ.)
9. Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Krasavchikov V.O., Budaev D.A., Kuznecova L.G. Kriterii petrohimicheskoj identifikacii kimberlitov [Criteria for petrochemical identification of Kimberlites]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 2000, vol. 41, no. 12, pp.1748–1759 (In Russ.)
10. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznecova L. G., Minin V. A., Holodova L. D. Srednie sostavy kimberlitovykh tel Viljujskoj subprovincii Jakutii kak osnovaja dlja formacionnoj identifikacii kimberlitov [Average compositions of kimberlite bodies of the Viluisk sub-province of Yakutia as the basis for the formation identification of kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2006. no. 2. pp. 126–140 (In Russ.)
11. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Geodinamicheskii kontrol' razmeshcheniya kimberlitovykh polei tsentral'noi i severnoi chastei Yakutskoi kimberli-tovoi provincii (petrohimicheskii aspekt) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakutsk kimberlite province (petrochemical aspect)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2000, no. 3 (9), pp. 37–55 (In Russ.)
12. Vasilenko V. B., Kuznecova L. G., Zinchuk N. N. *Petrohimicheskaja faktografija kimberlitovoj provincii Vostochnoj Sibiri* [Petrochemical factographi of the kimberlite province of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Parallel publ., 2019. 754 p. (In Russ.)
13. Egorov K. N., Zinchuk N. N., Mishenin S. G., Serov V. P., Sekerin A. P., Galenko V. P., Denisenko E. P., Baryshev A. S., Men'shagin Yu. V., Koshkarev D. A. Perspektivy korennoi i rossypnoi almazonosnosti Yugo-Zapadnoi chasti Sibirskoi platform [Prospects for the primary and alluvial diamond content of the Southwestern part of the Siberian Platform]. Sb.: *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy Aktsionernoi kompanii «ALROSA»: sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya*. Dopolnitel'nye materialy po itogam regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy geolog-icheskoi otrasli AK «ALROSA» i nauchno-metodicheskoe obespechenie ikh reshenii», posvyash-chennoi 35-letiyu YaNIGP TsNIGRI AK «ALROSA» [Sat: Geological aspects of the mineral resource base of Joint Stock Company ALROSA: current state, prospects, solutions. Additional materials on the results of the regional scientific-practical conference "Actual problems of the geological industry of AK ALROSA and scientific and methodological support for their solutions", dedicated to the 35th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK ALROSA.]. Mirnyi, MGT publ., 2003,

pp. 50–84. (In Russ.)

14. Zinchuk N. N. Osobennosti sostava i raspredelenija sljudistyh obrazovanij v kimberlitovyh porodah Jakutii [Specific features of composition and distribution of micaceous formations in kimberlite rocks of Yakutia]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka – News of HEL. Geology and exploration*, 1991, no. 7, pp. 58–66 (In Russ.)

15. Zinchuk N. N. Osobennosti mineralov sljud v kimberlitah [Features of micaceous Formations in kimberlite]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 2, pp. 29–39 (In Russ.)

16. Zinchuk N. N. Tipomorfnye svojstva indikatornyh mineralov kimberlitov i ih ispol'zovanie pri prognozirovanii mestorozhdenij almaza na Sibirskoj platforme [Tipomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in forecasting diamond deposits on the Siberian platform]. *Otechestvennaja geologija – Otechestvennaja geologija*, 2021, no. 2, pp. 41–56 (In Russ.)

17. Zinchuk N. N. Dokembrijskie istochniki almazov v rossypjah fanerozoja [Precambrian sources of Diamonds in Phanerozoic placers]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 3, pp. 50–61 (In Russ.)

18. Zinchuk N. N. Geologicheskie issledovanija pri poiskah almaznyh mestorozhdenij [Geological research in Prospecting for Diamond deposits]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 4, pp. 35–52 (In Russ.)

19. Zinchuk N. N. Rol' petrologo-mineralogicheskikh i geohimicheskikh issledovanij v ocenke potencial'noj almazonosnosti kimberlitov [The role of petrological-mineralogical and mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites]. *Otechestvennaja geologija – Otechestvennaja geologija*, 2022, no. 1, pp. 36–47 (In Russ.)

20. Zinchuk N. N. Kory vyvetrivanija i ih rol' v formirovanii postkimberlitovyh osadochnyh tolshh [Weathering crusts and their role information of post kimberlite sedimentary sequences]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2022, no. 2, pp. 100–120 (In Russ.)

21. Zinchuk N.N. Kremnistye mineraly v kimberlitah [Siliceous Minerals in Kimberlite] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 4, pp. 38–52 (In Russ.)

22. Zinchuk N. N. Osobennosti petrograficheskogo izuchenija kimberlitovyh porod [Specific features of petrographic study of kimberlite]. *Otechestvennaja geologija – Otechestvennaja geology*, 2022, no. 4, pp. 34–49 (In Russ.)

23. Zinchuk N. N. O geohimicheskikh osobennostjah raznovozrastnyh obrazovanij almazoperspektivnyh territorij [About geochemical features of formations of different ages of diamond-prospective territories]. *Otechestvennaja geologija – Otechestvennaja geology*, 2023, no. 1, pp. 42–65 (In Russ.)

24. Zinchuk N. N. Litologo-stratigraficheskie issledovanija pri almazoposkovykh rabotah [About Lithologic and Stratigraphic features of ancient Diamondiferous thicknesses]. *Vestnik SVFU. Nauki o Zemle – Vestnic SVFU. Nauki o Zemle*, 2023, no. 1(29), pp. 5–28 (In Russ.)

25. Zinchuk N. N. Osobennosti gidrotermalnogo i gipergennogo izmenenija sljudistyh kimberlitov [Specific features of Hydrothermal and Hypergene Alterations of Micaceous Kimberlites]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologija – Vestnic Permskogo universiteta. Geology*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 32–50 (In Russ.)

26. Zinchuk N. N. Sul'faty v kimberlitovyh porodah [Sulfates from kimberlite rocks]. *Otechestvennaja geologija – Otechestvennaja geology*, 2023, no. 2, pp. 56–72 (In Russ.)

27. Zinchuk N. N. Ob osobennostjah fljuidnyh i gidrotermalnyh

vlkjudenij v nekotoryh mineralah kimberlitov [About features of fluid and hidrothermal inclusions in Minerals in Kimberlites]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii – Probleme of mineralogy, petrography and metalogy*, 2023, vol. 26, pp. 45–64 (In Russ.)

28. Zinchuk N. N. Osobennosti kal'cita iz kimberlitovyh porod [Features of calcite from kimberlite rocks]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 2, pp. 28–43 (In Russ.)

29. Zinchuk N. N., Afanas'ev V. P. Geneticheskie tipy i osnovnye zakonomernosti formirovanija almazonosnyh rossypjej [Genetic types and basis pafferns of diamondiferous pacer formation]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka – News of HEL. Geology and Exploration*, 1998, no. 2, pp. 66–71 (In Russ.)

30. Zinchuk N.N., Barduhinov L.D. O specifikhe izuchenija almaza pri prognozno-poiskovykh rabotah (na primere Sibirskoj platformy) [Diamond study features in forecasting and prospecting (Siberian platform)]. *Rudy i metally – Ores and metals*. 2021, no. 3, p. 59–75 (In Russ.)

31. Zinchuk N.N., Barduhinov L.D. Almazy iz nizkoproduktivnyh kimberlitov [Diamonds from kimberlites with Half-industrial productivity]. *Rudy i metally – Ores and metals*. 2022, no. 1, p. 77–93 (In Russ.)

32. Zinchuk N.N., Barduhinov L.D. O specifikhe dokembrijskikh istochnikov almazov v rossypjah [About specific of the Precambrian Sources of placer Diamonds]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 149–166 (In Russ.)

33. Zinchuk N. N., Barduhinov L. D. Almazy iz polupromyshlennyh kimberlitov [Diamonds from semb-industrial kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 32–45 (In Russ.)

34. Zinchuk N.N., Boris E.I. O koncentracii produktov pereotlozhenija kor vyvetrivanija v verhnepaleozojskikh osadochnyh tolshhah vostochnogo borta Tungusskoj sineklizy [Koncentration of Weathering crust vedeposition products in the Upper Peleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syneclise]. *Geologija i geofizika – Geology and geophysics*, 1981, no. 8, pp. 22–29 (In Russ.)

35. Zinchuk N. N., Boris E. I., Stegnickij Ju. B. Strukturno-formacionnoe i mineragenicheskoe rajonirovanie territorij razvitija pogrebennyh kor vyvetrivanija i produktov ih pereotlozhenija v almazonosnyh regionah (na primere Jakutskoj kimberlitovoj provincii) [Structural-formational and mineragenetic zoning of the territory of buried crusts of weathering and products of their re-deposition in diamondiferous regions (on the example of Yakutian kimberlite province)]. *Geologija i geofizika – Geology and geophysics*, 1998, vol. 39, no. 7, pp. 950–964 (In Russ.)

36. Zinchuk N. N., Zinchuk M. N., Kotel'nikov D. D., Shlykov V. G., Zhuhlistov A. P. Strukturno-kristallohimicheskie preobrazovanija sloistykh mineralov na raznyh stadijah gipergennogo izmenenija kimberlitov [Structural and crystal-chemical transformations of layered minerals at different stages of hypergenic kimberlite changes]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka – Izvestiya Visch. Ucheb. Saved. Geologija and razvedka*, 2002, no. 1, pp. 47–60 (In Russ.)

37. Zinchuk N. N., Zuev V. M., Koptil' V. I., Chjornyj S. D. Strategija vedenija i rezul'taty almazoposkovykh rabot [Diamond management strategy and results]. *Gornyj vestnik – Gorny vestnic*, 1997, no. 3, pp. 53–57 (In Russ.)

38. Zinchuk N. N., Kotelnikov D.D., Gorshkov A. I. Identifikatsiya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanosloinogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoi iz trubok Yuzhnoi Afriki [Identification and genesis of lizardite-saponite mixed-layer formation

- in kimberlites of one of the pipes of South Africa]. *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and Minerals*, 2003, no. 1, pp. 87–96 (In Russ.)
39. Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Sokolov V.N. Izmenenie mineral'nogo sostava i strukturnykh 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.)
40. Zinchuk N. N., Mel'nik Yu. M., Serenko V. P. Apokimberlitovye porody [Apokimberlite rocks]. *Geologija i geofizika – Geology and geophysics*, 1987, no. 10, pp. 66–72 (In Russ.)
41. Zinchuk N. N., Savko A. D., Krainov A. V. Kimberlity v istorii Zemli [Kimberlites in the history of the Earth]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 68, 2013, 99 p. (In Russ.)
42. Zinchuk N. N., Savko A. D., Shevyrev L. T. *Istoricheskaya minerageniya*. [Historical Minerageny]. In 3 vol. vol. 1. *Vvedenie v istoricheskuyu minerageniyu*. [Introduction to historical minerageny]. Voronezh, VSU publ., 2005, 587 p; vol. 2. *Istoricheskaya minerageniya drevnikh platform*. [Historical Minerageny of Ancient Platforms]. Voronezh, VSU publ., 2007, 570 p. vol. 3. *Istoricheskaya minerageniya podvizhnykh superpoyasov*. [Historical minerageny of mobile superbelts]. Voronezh, VSU publ., 622 p. (In Russ.)
43. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Barduhinov L. D., Lipashova A. N. Almazy ukugutskoj svity rossypi Njurbinskaja, Nakynskoe kimberlitovoe pole Sibirskoj platformy [Diamonds from the ukugut suite of the Nyurbinsraya placer Nakyn kimberlite field Sibirian platform]. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2020, no. 2, pp. 69–77 (In Russ.)
44. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Barduhinov L. D., Lipashova A. N. Tipomorfnye svojstva almazov djahtjarskoj tolshhi rossypi Njurbinskaja [Typomorphic properties of Diamonds from the Dyakhtar strata of the Byurbinskaya placer]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2020, no. 3, pp. 45–54 (In Russ.)
45. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Barduhinov L. D., Lipashova A. N., Afanas'ev V. P. Rossypi almazov Nakynskogo polja [Diamond placers of the Nakin kimberlite]. *Geologija i geofizika – Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 3, pp. 291–302 (In Russ.)
46. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Tipomorfnye osobennosti i paleogeograficheskoe zhanenie slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographic significance of micaceous minerals]. *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka – Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1996, no. 1, pp. 53–61 (In Russ.)
47. Kotelnikov 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. Geologiya i razvedka – Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1997, no. 2, pp. 53–63 (In Russ.)
48. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov votlozheniyakh terrigennoj formatsii [Conditions of accumulation and postsedimentary 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.)
49. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Usloviya nakopleniya i postsedimentacionnogo preobrazovaniya 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. 2, pp. 45–51 (In Russ.)
50. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Ob anomalii obshhej shemy preobrazovaniya razbuhajushchih glinistykh mineralov pri pogruzenii sodержashchih ih otlozhenij v stratisferu [On the anomaly of the general scheme of transformation of swelling clay minerals when the sediments containing them are immersed in the stratosphere]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2003, no. 2, pp. 57–68 (In Russ.)
51. Soboleva S. V., Har'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D. Osobennosti flogopita mantijnogo proishozhdenija [Specific features of mantle origin phlogopite]. *ZVMO – ZWMO*, 1979, Ch. 108, vol. 6, pp. 678–685 (In Russ.)
52. Soboleva S. V., Har'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D. Dinamika izmenenija flogopita v processe formirovaniya kimberlitovykh porod Jakutii [Dynamics of phlogopite alteration in the process of Yakutia kimberlite rocks' formation]. *Rentgenografija mineral'nogo syr'ja i stroenie mineralov – Radiography of mineral raw materials and the structure of minerals*, 1981, pp. 147–155 (In Russ.)
53. Har'kiv A. D., Zinchuk N. N., Bogatyh M. M., Romanov N. N. Model' kimberlitovoj trubki Jakutskoj almazonosnoj provincii [Model of a Yakutian diamondiferous province kimberlite]. *Sovetskaja geologija – Otchestvennaya geology*, 1990, vol. 1, pp. 23–29 (In Russ.)
54. Khar'kiv A. D., Zuenko V. V., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I., Ukhanov A. V., Bogatykh M. M. *Petrokhimiya kimberlitov* [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra publ., 1991, 304 p. (In Russ.)
55. Khitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D. Primenenie klaster-analiza dlya vyasneniya zakonomernosti vyvetrivanija porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to clarify the weathering patterns of rocks of different composition]. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR – Doklady AN SSSR*, 1987, vol. 296, no. 5, pp. 1228–1233 (In Russ.)
56. Zinchuk N. N. Stroenie i sostav kory vyvetrivanija na terrigenno-karbonatnykh porodah v almazonosnykh regionah [Structure and composition of the crust of Weathering on terrigenous-carbonate rocks in diamondiferous Regions]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologija – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 199–215 (In Russ.)
57. Zinchuk N. N. Osobennosti sostava i formirovaniya Kimberlitovykh porod [Specific features of composition and formation of kimberlite rocks]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii – Probleme of mineralogy, petrography and metalogy*, 2014, vol. 17, pp. 123–138 (In Russ.)
58. Zinchuk N. N. Otluchitel'nye cherty gipergennogo izmenenija porod razlichnogo sostava [Distinctive Characteristics of hypergene Alteration of Composition of Different Rocks]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologija – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2014, vol. 3(24), pp. 19–22 (In Russ.)
59. Zinchuk N. N. Osobennosti terrigenno materiala v drevnih almazoperspektivnykh osadochnykh tolshchah [Specific features of terrigenous material in ancient diamond-perspective thick layers]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologija – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 253–266 (In Russ.)
60. Zinchuk N. N., Zinchuk M. N. O brusitizacii kimberlitovykh porod [About brusitization of kimberlite rocks]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii – Probleme of mineralogy, petrography and metalogy*, 2014, vol. 17, pp. 137–147 (In Russ.)
61. Zinchuk N. N., Zinchuk M. N. O serpentinizacii kimberlitov

[About serpentinization of kimberlites]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii – Probleme of mineralogy, petrography and metalogy*, 2015, vol. 18, pp. 154–166 (In Russ.)

62. Zinchuk N. N., Stegnickij Ju. B., Romanova E. A. Mineraly tjazheloj frakcii iz izmenennyh kimberlitov polja Katoka (Angola) [Heavy fraction minerals from altered kimberlites of the Catoca field (Angola)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 1, pp. 36–52 (In Russ.)

63. Zinchuk N. N. Osobennosti glinistykh mineralov v drevnih korah vyvetrivanija razlichnyh porod v almazonosnyh regionah [Specific features of clay Minerals in ancient crusts of Weathering of various rocks in diamondiferous Regions]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii – Probleme of mineralogy, petrography and metalogy*, 2015, vol. 18, pp. 53–72 (In Russ.)

64. Zinchuk N. N., Stegnickij Ju. B. Osobennosti kory

vyvetrivanija kimberlitov severo-vostoka Angoly [Features of the weathering crust of the kimberlites of north-east Angola]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 2, pp. 6–19 (In Russ.)

65. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I., Zinchuk N. N., Krasavchikov V. O. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, vol. 76, no. 2, pp. 93–112.

66. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 465, no. 2, pp. 1297–1301.

67. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform. *Petrology*, 2001, vol. 9, no. 6, pp. 576–588.

Зинчук Николай Николаевич, д.г.-м.н., профессор, академик Академии наук РС (Якутия), председатель ЗЯНЦ АН РС (Якутия), Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru; ORCID 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 0000-0002-9682-3022

Author have read and approved the final manuscript.