

**Минералы тяжелой фракции
из изменённых кимберлитов поля Катока (Ангола)**

©2021 Н. Н. Зинчук[✉], Ю. Б. Стегницкий, Е. А. Романова

*Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) АН РС (Я),
Чернышевское шоссе, 16, 678170, Мирный, Российская федерация*

Аннотация

Введение: Приведены результаты комплексного исследования особенностей состава и распределения тяжелой фракции из кимберлитов поля Катока (северо-восток Анголы), эталонным объектом в котором является одноимённая трубка. В слабо эродированной кимберлитовой трубке Катока с сохранившейся кратерной постройкой установлен широкий петрографический спектр пород, нередко интенсивно изменённых в результате гипергенных процессов с почти полным разрушением реликтовых минералов и затуханностью первичных структурно-текстурных признаков.

Методика: С целью изучения особенностей распределения тяжелой фракции в разрезах кимберлитовых пород и степени обогащения зоны выветривания глубинными минералами было проанализировано представительное количество данных обогащения керновых проб. Проведено изучение особенностей распределения тяжелой фракции по более пятидесяти разрезам скважин, вскрывших кимберлиты в поле Катока. При анализе использовались результаты обогащения керновых проб на обогатительной установке, а также для сравнения данные исследований проточных проб и штучных образцов.

Результаты и обсуждение: По комплексу признаков выделены породы трёх фаций: гипабиссальной (субвулканической), жерловой (или диатремовой) и кратерной. Для каждой из них характерно своё соотношение различных типов магматических (гипабиссальной и жерловой фаций) и вулканогенно-осадочных (кратерная фация) образований.

Выводы: Отмеченные особенности состава пород, заполняющих диатремы описываемого региона, привели к определённым изменениям в содержании и распределении по глубинам тяжелой фракции, важнейшими среди которых в поисковом плане являются индикаторные минералы кимберлитов (ИМК). Наибольшей сохранностью в изученных кимберлитовых породах характеризуются гранаты (преимущественно пироп), пикроильменит и клинопироксены. Самые высокие концентрации тяжёлых минералов (в том числе ИМК) установлены в жерловой фации. В целом этот показатель характерен для диатрем поля Катока, что подчёркивает возможную высокую перспективу применения на этой и похожих по геологическому строению территориях шлихо-минералогического метода поисков кимберлитовых трубок.

Ключевые слова: кимберлитовые трубки, петрографические типы пород, индикаторные минералы, тяжёлая фракция.

Для цитирования: Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б., Романова Е. А. Минералы тяжелой фракции из изменённых кимберлитов поля Катока (Ангола) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2021. №1. С. 36–52. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3335>.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Введение

Африканский континент считается эталонным как по мантийным, так и россыпным месторождениям алмазов, распространённым на обширной территории Центральной и Южной Африки, группируясь в отдельные субпровинции, районы и поля [1–3]. Достоверно на этом континенте установлен один генетический тип мантийных алмазов – кимберлитовый. Коренные месторождения алмазов разрабатываются в Анголе, Ботсване, ДР Конго, Зимбабве, Лесото, Сьерра-Леоне, Танзании и Южно-Африканской республике (ЮАР). Они занимают особое место в истории изучения кимберлитовых диатрем. По сравнению с ЮАР, кимберлитовые тела на территории Анголы открыты намного позже и их изучение началось со второй половины прошлого века. В ангольской части Ангола-Конголезской кимберлитовой провинции в пределах архейских (AR) кратонов Касаи и Ангольского, выделено более десяти алмазоносных районов, где расположено около 1000 кимберлитовых трубок. Территория региона приурочена к восточной части плато Лукапа с абсолютными высотами 800–1000 м над уровнем моря. Оно пересечено реками с водопадами и порогами, хорошо проработанными субмеридиональными долинами, глубина вреза которых достигает более 50 м. Кимберлитовые трубки в пределах зоны Лукапа приурочены к узлам пересечения двух систем глубинных разломов. Первая имеет северо-восточное направление, вторая – северо-западное. Активизация этих разломов, секущих AR-PR основание платформы, произошла в конце палеозойской эры и вызвала формирование узких внутриконтинентальных

впадин, выполненных отложениями супергруппы Карру мощностью до 600 м. Современные представления о структурно-тектоническом контроле кимберлитового магматизма в регионе северо-востока (СВ) Анголы основаны на результатах анализа данных дистанционного космического зондирования и обработки аэрогеофизических съёмок, а также наземных магнито- и электроразведочных исследований [4]. На их основе выделены региональные линейные и кольцевые дезъюнктивные структуры, формирующие общий тектонический план территории и контролирующие поля кимберлитового магматизма. Кимберлитовое поле Катока находится в узле пересечения глубинных разломов континентального и регионального ранга, приуроченных к центру кольцевой структуры диаметром 40 км [5–7]. Кимберлитовые трубки СВ Анголы являются уникальными по сохранности кратерных отложений, представляемых как пирокластическими образованиями, эксплозивными брекчиями, так и вулканогенно-осадочными внутрикратерными терригенными отложениями. Промышленно алмазоносные трубки расположены только на СВ Анголы в пределах кратона Касаи. В пределах поля Катока более 100 кимберлитовых трубок группируются в субмеридиальную зону длиной 20 км и шириной 12 км. Трубки в пределах поля распределены неравномерно, образуют группы тел или одиночные тела [8]. Общие закономерности изменения вещественного состава и пофракционного распределения можно представить по результатам комплексного изучения кимберлитовой трубки Катока, характеризующейся незначительным эрозионным срезом и сохранностью кратерной постройки (рис. 1).

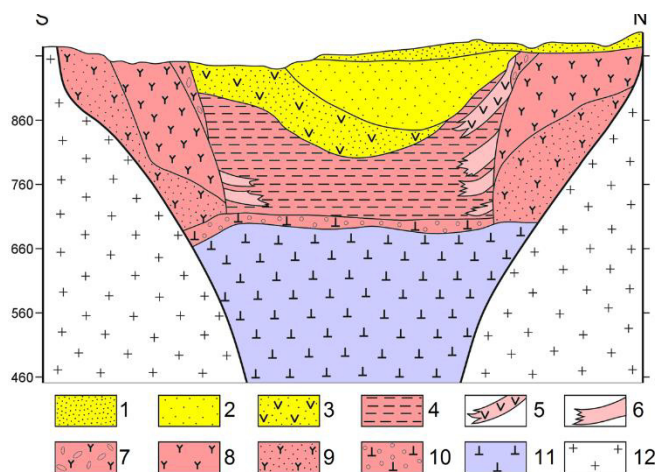


Рис. 1. Схематический разрез кимберлитовой трубки Катока. Условные обозначения: 1 – перекрывающие песчано-глинистые отложения формации Калахари; 2–7 – эпикластические отложения кратерной фации: 2 – песчаники; 3 – эпикластические отложения (алевролиты, песчаники, конгломераты) с различной примесью кимберлитового материала; 4 – переслаивание туфопесчаников, туфоалевролитов, туфогравеллитов с псефитовыми кимберлитовыми туфами; 5 – слои, обогащенные кимберлитовым материалом; 6 – продукты оползней пирокластических пород на поверхность вулканогенно-осадочных пород; 7 – породы зоны перехода – кимберлитовые туфы, туфопесчаники, туфогравеллиты, туфоаргиллиты; 8 – пирокластический полосчатый кимберлит кратерной фации (кимберлитовая брекчия с массивной текстурой цемента, туффизитовый кимберлит); 9 – вулканокластический кимберлит (кимберлитовые туфобрекчии с детритовыми кварцевыми зернами 0–

40%), туфопесчаники, песчаники; 10 – ксенолитовый слой основания кратерной фации: туфопесчаники, туфоалевролиты, туфоаргиллиты, брекчии гнейсов с кимберлитовым цементом, глыбы гнейсов; 11 – пирокластические и когерентные кимберлиты жерловой фации (автолитовые кимберлитовые брекчии; туффизитовые кимберлиты, порфиновые кимберлиты жерла и даек); 12 – вмещающие архейские гнейсы и кристаллические сланцы.

[Fig. 1. Schematic section of the Catoca kimberlite pipe. Legend: 1 – overlying sandy-argillaceous deposits of the Kalahari Group; 2–7 – epiclastic deposits of the crater facies: 2 – sandstones; 3 – epiclastic deposits (siltstones, sandstones, conglomerates) with various admixtures of kimberlite material; 4 – interbedding of tuff sandstones, tuff siltstones, tuff gravelly stones with psephitic kimberlite tufts; 5 – layers enriched with kimberlite material; 6 – products of landslides of pyroclastic rocks on the surface of volcanogenic-sedimentary rocks; 7 – rocks of the transition zone - kimberlite tufts, tuff sandstones, tuff siltstones, tuff mudstones; 8 – pyroclastic banded kimberlite of crater facies (kimberlite breccia with massive cement texture, tuffsite kimberlite); 9 – volcanoclastic kimberlite (kimberlite tuff breccias with detrital quartz grains 0–40%), tuff sandstones, sandstones; 10 – xenolithic layer of the base of the crater facies: tuffaceous sandstones, tuffaceous siltstones, tuffargillites, breccias of gneisses with kimberlite cement, blocks of gneisses; 11 – pyroclastic and coherent kimberlites of the vent facies (autolithitic kimberlite breccias; tuffsite kimberlites, porphyry kimberlites of vents and dikes); 12 – host Archean gneisses and crystalline schists.]

Форма трубки в плане почти округлая, размеры с поверхности 915х990 м, площадь 64 га. Трубка сужается с глубиной и на 400 метрах размеры её составляют 360х430 м, а площадь поперечного сечения уменьшается в 4.5 раза – до 14 га [9]. Вмещающими породами являются гнейсы AR, которые на контакте с кимберлитами слабо изменены и сильно трещиноваты. Трещины обычно заполнены кальцитом и кимберлитовым компонентом в виде тонких прожилков. Отмечены многочисленные зеркала скольжения на контакте с кимберлитами. Непосредственно на дневную поверхность кимберлиты выходили только в западной части трубки на площади около 115 тыс. кв. м. По данным геологоразведочных и добычных работ трубка Катока обладает сложным внутренним строением [10]. Центральная часть диатремы площадью около 220 тысяч м² сложена вулканогенно-осадочными породами (ВОП), слогающимися чашеподобное тело в кратерной части, простирающееся до глубины 270 м от дневной поверхности. Углы падения бортов «чаши» к её центральной части изменяются от 85–88 до 40–50 градусов. По периферии в виде кольцевой зоны шириной от 150 до 250 м располагаются кимберлитовые туфы (КТ) и туфобрекчии (ТБ), а в южной части вскрыты порфиновые кимберлиты (ПК). Окраска пород изменяется от буровато-коричневой до зелено-серой. На более глубоких горизонтах (250–270 м от поверхности) под породами кратерной части (центральная зона) вскрыты кимберлитовые породы жерловой фации – кимберлитовые брекчии (КБ) и автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ). Цвет пород варьирует от тёмно-зеленовато-серого до светло-коричнево-серого, что во многом связано с неравномерным распределением гидроксидов железа. Брекчии осадочных пород буровато-красного и жёлтого цвета встречены в основном в приконтактовых частях диатрем.

Главными и сравнительно редкими минералами тяжёлых фракций кимберлитов трубки Катока являются алмазы, встречающиеся как в форме кристаллов и их обломков, так и агрегатных выделений. Отмечено различие морфологических форм кристаллов по различным классам крупности [11–12]. Применяя для морфологического сравнения алмазов классификацию Ю. Л. Орлова [13], отметим присутствие кристаллов I, II, III, IV, VII, VIII и IX разновидностей, при резком доминировании октаэдров I-й разновидности. Кристаллы алмаза из кимберлитов трубки Катока различных размеров характеризуются разнообразием рельефа, развитого по их граням. Его типы по механизму формирования могут быть разделены на ростовые и растворения.

Фактический материал и методика исследований

С целью изучения особенностей распределения тяжелой фракции в разрезе кимберлитовых пород и степени обогащения зоны выветривания глубинными минералами были проанализированы данные обогащения керновых проб (рис. 2). Проведено изучение особенностей распределения тяжелой фракции по более пятидесяти разрезам скважин, вскрывших кимберлиты в поле

Катока. При анализе использовались результаты обогащения керновых представительных проб, а также для сравнения данные собственных исследований штучных образцов. Содержание тяжелой фракции варьирует по разрезам кимберлитовых брекчий в значительных пределах и зависит, по всей видимости, от степени контаминации пород. Отмечаются разрезы, где тяжелые минералы преобладают в нижних горизонтах. В других случаях (скв. Lx71-2, Lx72-2, Lx61-5) наблюдается обратная тенденция - увеличиваются количества аксессуаров в верхних частях разрезов. Содержание тяжелой фракции в коре выветривания (КВ) по кимберлитам либо варьирует в незначительных пределах, либо немного увеличивается к верхним наиболее измененным зонам. Распределение тяжелой фракции в КВ по вулканогенно-осадочным породам разнообразно.

Детальное изученное распределение содержания глубинных минералов в разрезе скважины Lx061-5 (рис. 3) показало уменьшение роли хромдиоксида в верхних горизонтах, где породы в значительной степени выветрелые, и полностью исчезает в КВ кимберлитов. Тренд содержания пиропов по разрезу кимберлитовых пород относительно выдержан. Содержание несколько увеличивается (до 5%) в нижней части КВ и далее вверх по разрезу постепенно уменьшается до единичных знаков. Общий тренд распределения пикроильменитов по разрезу показывает увеличение его содержания в верхних горизонтах. Причем эта тенденция по распределению сохраняется и в КВ.

По результатам комплексного изучения отмечены некоторые особенности распределения индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) в зоне выветривания. Хромдиоксид содержится только в слабо выветрелых кимберлитовых породах и ВОП кратерной фации, а в КВ кимберлитов минерал вообще не зафиксирован. В нижней части КВ отмечается увеличение содержания пиропов и пикроильменитов. В верхних горизонтах концентрация пиропов уменьшается, а пикроильменитов остается неизменным или несколько увеличивается.

Морфологические особенности глубинных минералов из выветрелых кимберлитовых пород поля Катока изучены в процессе проведения полуколичественного минералогического анализа с отбором монофракций ИМК из протоочных проб для электронной микроскопии и микрозондовых исследований. Оливин I (плутонический) и II (коровый) генераций из кимберлитов диатрем региона обычно замещён серпентином, хлоритом, иногда кальцитом, оксидами и гидроксидами железа. Изменение оливина происходит в две стадии – в процессе гидролиза с образованием лизардита и гидратации с появлением новообразований минералов группы смектита, попадая в лёгкие фракции пород. При этом часть железа идёт на образование вторичных выделений магнетита и гематита, которые при обработке проб вместе с другими новообразованиями за счёт изменения оливина (от которых не всегда удаётся избавиться) утяжеляют выделения и остаются в тяжёлых фракциях [14–16]. Не изменённые зёрна оливина

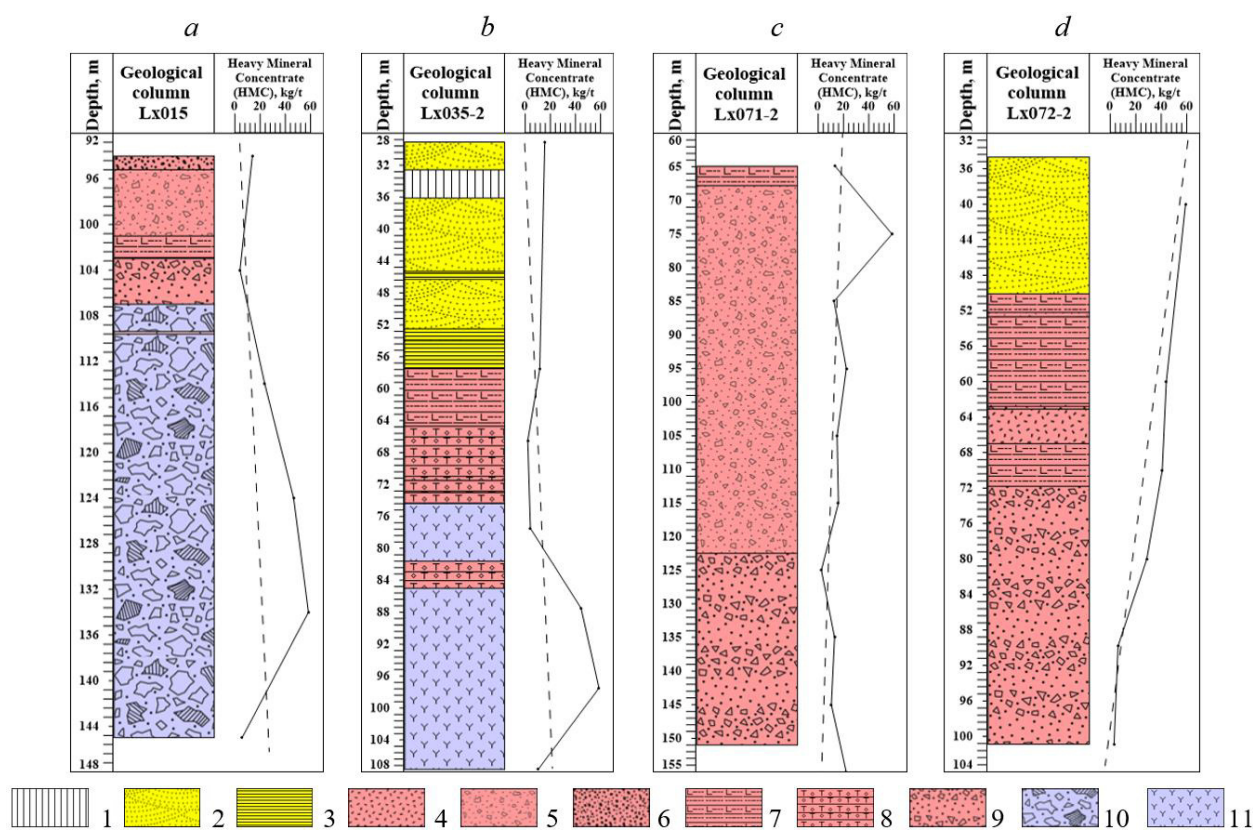


Рис. 2. Распределение содержаний тяжёлой фракции по разрезам скважин, вскрывших кимберлиты в поле Катока. Условные обозначения: 1 – без отбора керна; 2 – пески и песчаники; 3 – глины и глинисто-алевритовые образования; 4 – туффопесчаники; 5 – туффобрекчия; 6 – КВ по вулканогенно-осадочным породам; 7 – кора выветривания по кимберлиту; 8 – кимберлит умеренно выветрелый; 9 – кимберлитовая брекчия; 10 – автолитовая кимберлитовая брекчия; 11 – порфировый кимберлит.

[Fig. 2. Distribution of the heavy fraction along the sections of the drill holes that exposed kimberlites in the Catoca field. Legend: 1 - no coring; 2 - sands and sandstones; 3 - clays and clay-silty formations; 4 - tuffaceous sandstones; 5 - tuff breccia; 6 - CV for volcanogenic-sedimentary rocks; 7 - kimberlite weathering crust; 8 - moderately weathered kimberlite; 9 - kimberlite breccia; 10 - autolithic kimberlite breccia; 11 - porphyry kimberlite.]

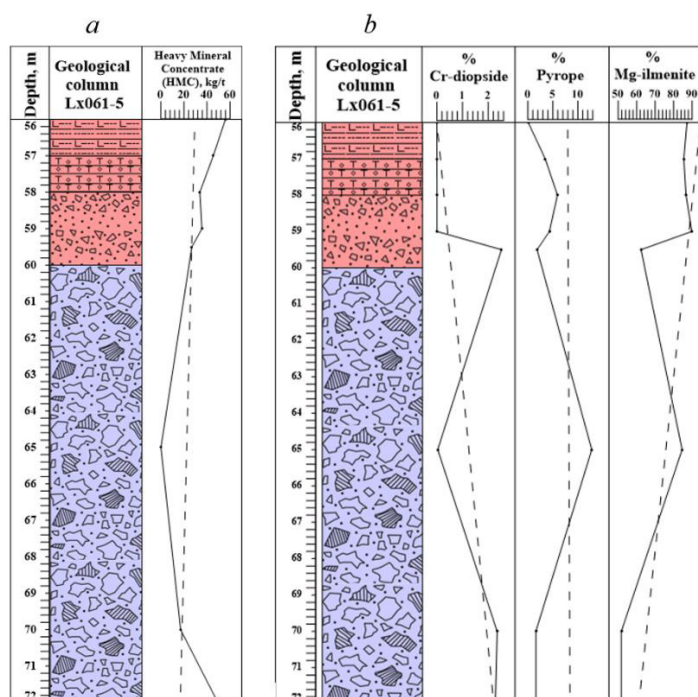


Рис. 3. Распределение содержания тяжелой фракции (a) и ИМК (b) по разрезу изменённых кимберлитов поля Катока. Условные обозначения см. рис. 1.

[Fig. 3. Distribution of the content of the heavy fraction (a) and BCI (b) along the section of altered kimberlites of the Catoca field. For legend see fig.1.]

сохранились лишь в глубоких частях диатремы, сложенными АКБ, а также в центральных участках крупных (до 5-7 см) желваков оливинитов и лерцолитов – родственных включений в кимберлитах. Зёрна разных генераций оливина отличаются по размерам и морфологии. Различаются они и по окраске псевдоморфоз, цвет которых изменяется от красно-коричневых (по

оливину с более железистым ядром) до зеленовато-серых с магниезальными каймами.

Во всех изученных пробах преобладают рудные выделения (рис. 4-6), представленные преимущественно округло-угловатыми и угловатыми зёрнами хромшпинелида и пикроильменита. Они различаются трудно и иногда их визуальная диагностика не однозначна.

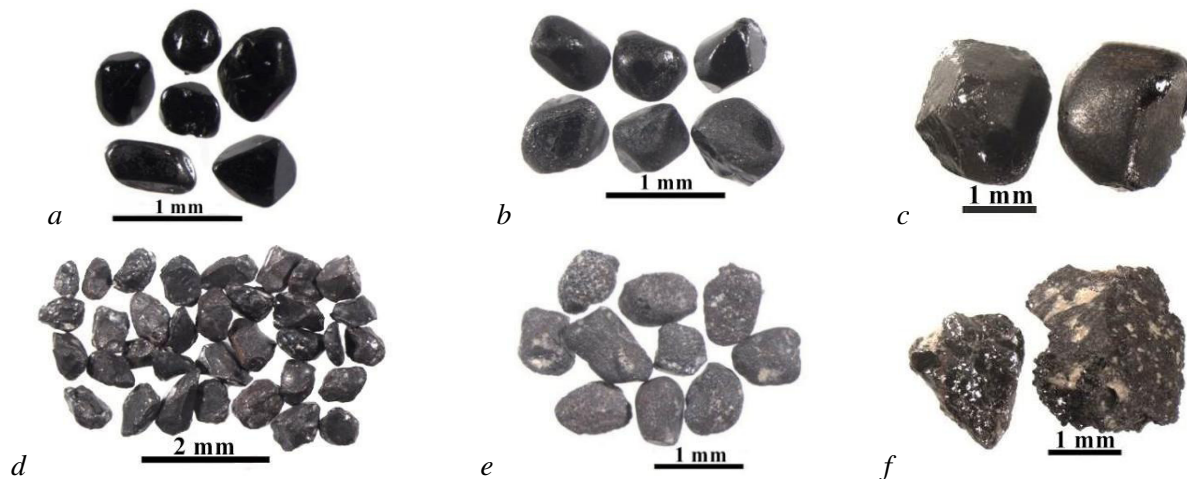


Рис. 4. Морфология зёрен хромшпинелидов и пикроильменитов из изменённых кимберлитов поля Катокка: *a-c* – хромшпинелиды: *a* – октаэдрсы с глянцевой поверхностью, *b* – матированные октаэдрсы, *c* – октаэдрического габитуса; *d-f* – пикроильмениты: *d* – тонкоматированные зёрна, *e* – грубокорродированные зёрна, *f* – агрегатные зёрна.

[**Fig. 4.** Grain morphology of chrome-spinel and picroilmenites from altered kimberlites of the Catoca field: *a-c* – Cr-spinels: *a* – octahedrons with a glossy surface, *b* – matted octahedrons, *c* – octahedrons; *d-f* – picroilmenites: *d* – finely matted grains, *e* – coarsely corroded grains, *f* – aggregate grains.]

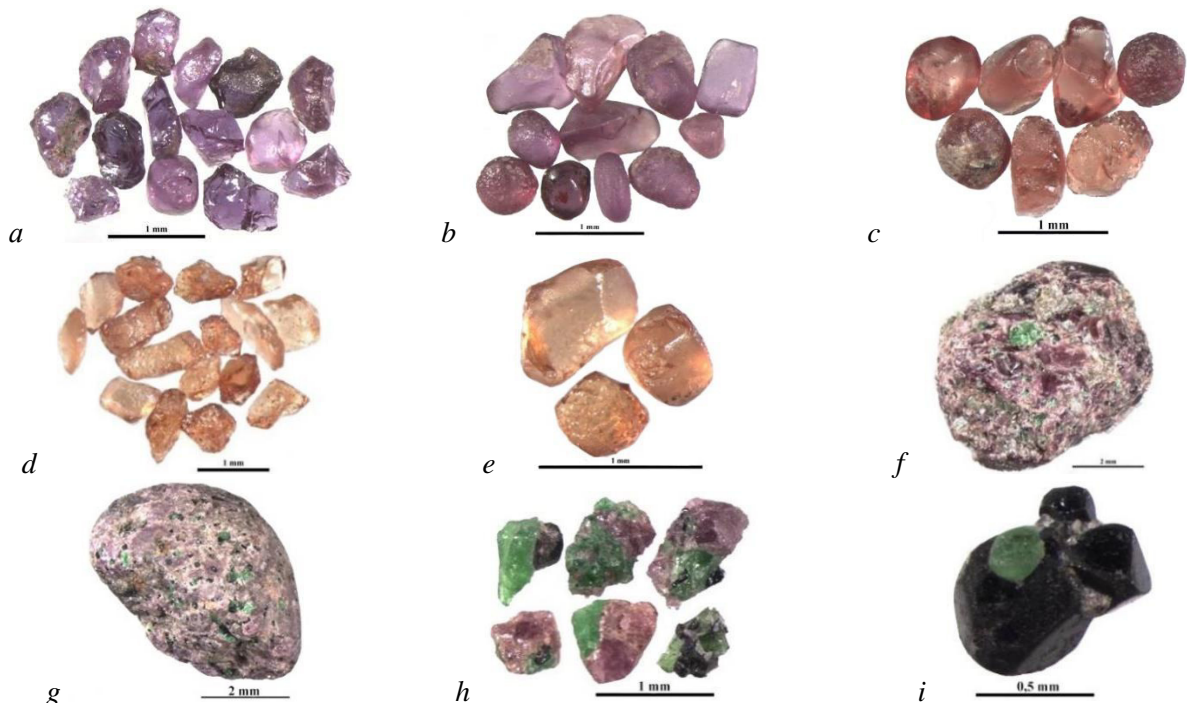


Рис. 5. Морфология пиропов и хромшпинелидов из изменённых кимберлитов поля Катокка: *a-h* – пиропы: *a* – фиолетовые, *b* – лиловые, *c* – красные, *d* – оранжевые, *e* – кубоиды, оранжевые, *f-h* – сростки пиропы с хромдиопсидом, *i* – двойники хромшпинелида октаэдрического габитуса с хромдиопсидом.

[**Fig. 5.** Morphology of pyropes and chrome spinels from altered kimberlites of the Catoca field: *a-h* – pyropes: *a* – deep purple, *b* – purple, *c* – red, *d* – orange, *e* – cuboids, orange, *f-h* – aggregate of pyrope with chrome diopside, *i* – twins of octahedrons chrome spinel with chrome diopside.]



Рис. 6. ИМК, отобранные из коры выветривания кимберлитов поля Катока, покрытые охристыми оболочками: *a-c* – пиропы: *a* – цветовые разновидности, *b* – с блоковым строением, *c* – с остатками под келефитовой каймой, *d* – хромдиопсид, *e-g* – хромшпинелиды: *e* – с существенно матированной поверхностью и с примазками гидроокислами железа, *f* – с частично матированной поверхностью, *g* – октаэдр в охристой оболочке; пикроильмениты: *h-l* – угловато-округлые в гидроксильной оболочке, *h-k* – агрегатного строения, *l* – монокристалльные.

[**Fig. 6.** Kimberlite indicator mineral (KIM) sampled from the weathering crust of kimberlites in the Catoca field, covered with ocher shells: *a-c* – pyropes: *a* – colour varieties, *b* – with a block structure, *c* – with residues under the kelyphite, *d* – chrome diopside, *e-g* – chrome spinels: *e* – with a substantially matted surface and with iron hydroxides, *f* – with partially matted surface, *g* – octahedron in an ocher shell; picroilmenites: *h-l* – angular-rounded, in a hydroxyl shell, *h-k* – aggregate structure, *l* – monocrystalline.]

Хромшпинелиды представлены идиоморфными кристаллами в основном в мелком классе $-0.5+0.315$ мм. Много обломков и осколков. По типу поверхности – тонкоматированные черные – скорее всего хромшпинелиды, шиповидная поверхность – те и другие, редкие зерна имеют охристые примазки (рис.4, *a-c*; рис.6, *d-g*).

Пикроильменит представлен монокристалльными зернами угловато-округлой и чаще угловатой формы, тонкоматированными и с шагреновой поверхностью (рис.4, *d-f*). Агрегатные зерна встречаются только в крупных классах, где их поверхность шагреновая и матированная с примазками светлого вещества, форма угловато-округлая и угловатая, редко округлая. Практически во всех изученных тяжёлых фракциях из выветрелых кимберлитов встречаются выделения пикроильменита (рис.6, *h-l*), характеризующиеся различным морфологическим обликом.

Пиропы в изученных образованиях характеризуются широкой цветовой гаммой: лиловые, фиолетовые (единичные), красные, оранжевые и розовые различной интенсивности (рис.5, *a-h*; рис.6, *a-c*). По степени целостности выделяются: целые (преобладают угловатые протоматические обломки, реже округлые зерна), обломки со свежими сколами и множество осколков. По форме – преобладают угловатые зерна, редко угловато-округлые, округлые и идиоморфные. Поверхность зерен часто тонко матированная (особенно у шариков и у протоматических обломков), шероховатая, с примазками келифита (рис.5, *c*), а хорошая плотная келифитовая кайма не встречается. Много трещиноватых зерен, полупрозрачных. Пироп часто содержит включения хромдиопсида (рис.5, *f-h*). Реже встречаются сростки хромдиопсида и хромшпинелида (рис.5, *i*).

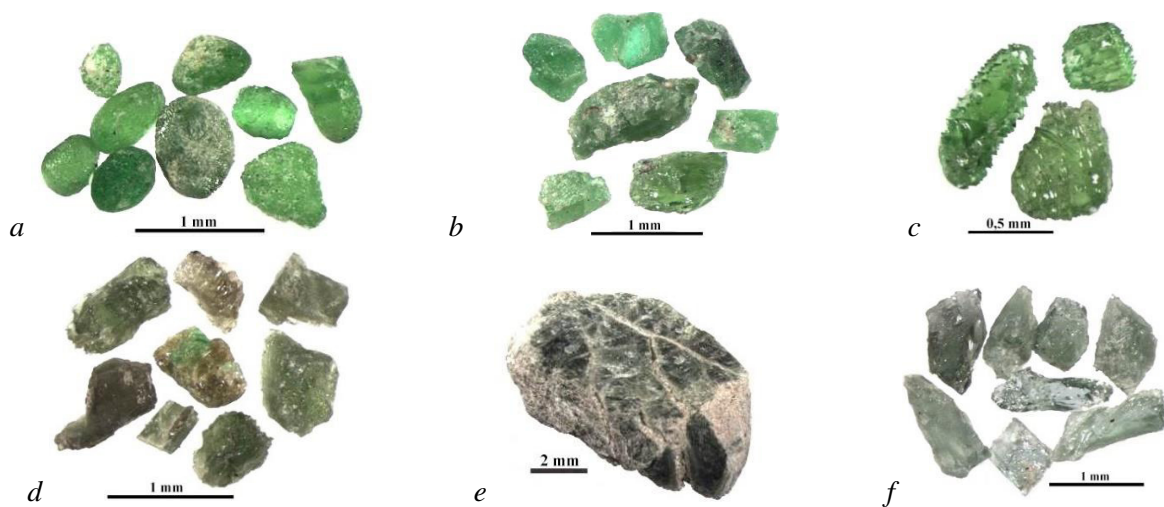


Рис. 7. Морфология клинопироксенов из изменённых кимберлитов поля Катока: *a-b* – изумрудно-зеленые хромдиопсиды: *a* – округлые, угловато-округлые, *b* – призматического габитуса, *c-f* – диопсиды: *c* – с занозистой торцевой коррозией, *d-e* – призматического габитуса, *f* – омфациты светло-зеленовато-голубого цвета.

[**Fig. 7.** Morphology of clinopyroxenes from altered kimberlites of the Catoca field: *a-b* – emerald green chrome diopside: *a* – rounded, angular-rounded, *b* – prismatic, *c-f* – diopside: *c* – with splintered end corrosion, *d-e* – prismatic, *f* – light green-blue omphacites.]

Табл. 1. Состав тяжелых фракций проб из разных горизонтов трубки Катока по результатам полуколичественного анализа (в вес. %)
 [Table 1. Composition of heavy fractions of samples from different horizons of the Catoca pipe according to the results of semi-quantitative analysis (wt. %)]

Минерал	Mineral	Проба	Проба	Проба	Проба	Проба
		Sample	Sample	Sample	Sample	Sample
		Кат-1-891	Кат-2-840	Кат-3-840	Кат-4-888	Кат-1-891
пирит	pyrite			0.03		
магнетит	magnetite	1.11	0.06	10.39	17.12	1.11
мартит	martite		0.1			
пикроильменит	picroilmenite	90.9	68.45	58.68	65.11	90.9
хромшпинелид	Cr-spinel		0.08	7.93	0.08	
пироп лиловый	pyrope purple	3.81	14.55	10.52	9.86	3.81
пироп фиолетовый	pyrope deep purple	0.37	1.44	0.26	2.79	0.37
пироп красный	pyrope red		2.32	1.64	1.3	
гранат розовый	garnet pink	0.86	1.66	0.45	1.12	0.86
гранат оранжевый	garnet orange	2.59	10.78	4.15	1.49	2.59
хромдиопсид	Cr-diopside	ед.зн.	ед.зн.	0.6	0.01	ед.зн.
клинопироксен	clinopyroxene	ед.зн.	ед.зн.	0.19	ед.зн.	ед.зн.
сростки пироба и хромдиопсида	aggregates of pyrope and Cr-diopside			0.14		
слюда	mica	ед.зн.				ед.зн.
амфибол	amphibole			4.33		
апатит	apatite	ед.зн.	ед.зн.	0.03		ед.зн.
циркон	zircon	0.37	0.57	0.67	1.12	0.37

Клинопироксены – хромдиопсид, диопсид и, возможно, омфацит светло-зеленовато-голубоватые призматические зерна (рис.6,d; рис.7, *a-f*). Хромдиопсид – изумрудно-зеленый, обломки по спайности преобладают, редко целые округлые зерна, как правило, полупрозрачные. Диопсид прозрачный, светло-зеленый, часто на нем занозистая торцевая коррозия.

Пробы различаются по набору и содержаниям ИМК (табл. 1). Минимальный выход тяжелой фракции отмечен в пробе из восточной части трубки Кат-1-891,

максимальный – в пробе Кат-3-840 из выветрелого кимберлита юго-западной части диатремы.

Из вышеописанных проб подготовлены монофракции ИМК для исследования особенностей поверхности зерен в режиме электронной микроскопии и лазерной томографии. Пиропы характеризуются многообразием морфологии зерен, окраски и форм рельефа поверхности. Среди первичных поверхностей проявлены тонкоматированная (почти гладкая), матированная, шагреневая, волнисто-гребенчатая, бугорчатая (рис.8, *a-f*).

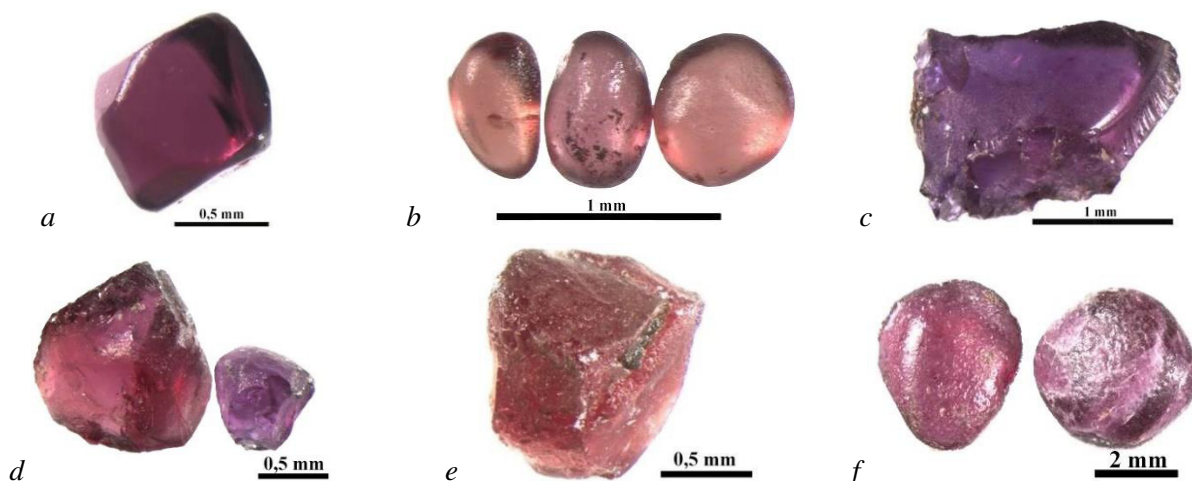


Рис. 8. Первичные поверхности пиропов из кимберлитов поля Катока: *a* – тонко матированная; *b, c* – матированная; *d, e* – шагреновая; *f* – волнисто-гребенчатая.

[**Fig. 8.** Primary surfaces of pyropes from kimberlites of the Catoca field: *a* – finely matted; *b, c* – frosted; *d, e* – shagreen; *f* – wavy-comb.]

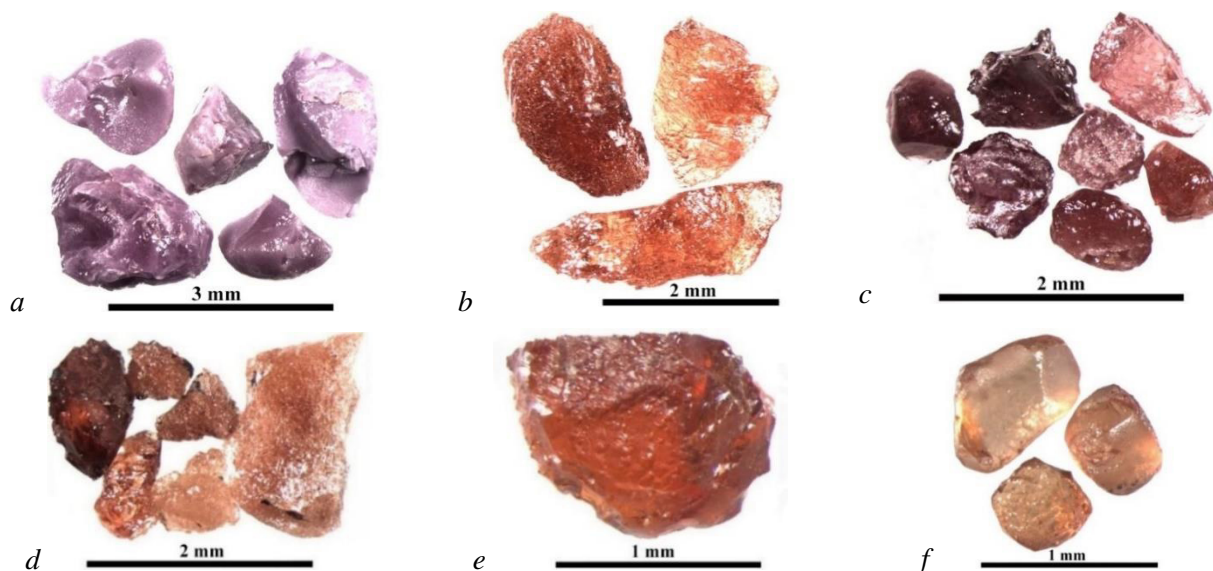


Рис. 9. Гипергенные изменения пиропов из кимберлитов поля Катока: *a* – помутнение лиловых пиропов; *b-d* – густая сеть каналов травления внутри зерен оранжевых и красных пиропов; *e* – пирамидально-черепитчатый рельеф; *f* – кубоиды оранжевых пиропов с каплевидным рельефом.

[**Fig. 9.** Hypergenic alterations of pyropes from kimberlites of the Catoca field: *a* – turbidity of purple pyropes; *b-d* – dense network of etching channels inside the grains of orange and red pyropes; *e* – pyramidal-tiled relief; *f* – cuboids of orange pyropes with a drop-shaped relief.]

Вторичные гипергенные изменения пиропов отчетливо проявлены в пробе Кат-4-888 из выветрелой КБ трубки Катока. Они выражены помутнением зерен, потерей прозрачности и дислокационным типом гипергенной коррозии в виде развития густой сети каналов травления внутри зерен пиропов. Из вторичных поверхностей на части зерен минерала (особенно оранжевых пиропов) развит каплевидный (кубоидный) и дислокационный рельефы растворения (рис.9, *a-f*).

Пирамидально-черепитчатая поверхность, широко проявленная на многих зернах, имеет конвергентный характер. На пиробах присутствуют микроагрегатные пористые реликты келифитовых кайм, а на свободных поверхностях, где каймы отсутствуют, проявлен кор

розионный рельеф пирамидально-черепитчатого и дислокационного типов (рис. 10-12). Сочетание этих типов коррозии нередко наблюдаются на поверхностях одного зерна.

Пикроильменит – довольно распространённый ИМК кимберлитовых пород северо-востока Анголы, где он представлен монокристалльными и, в меньшей степени, агрегатными зёрнами. Доминируют изометричные, округлые и угловатые непрозрачные зёрна, обломки размером от долей до 5-8 мм (иногда до 12-15 мм). Они имеют матированную, шагреновую (шероховатую), шиповидную и микропирамидальную первичную поверхность, образованные в стадию глубинного морфогенеза (рис.13, *a-f*).

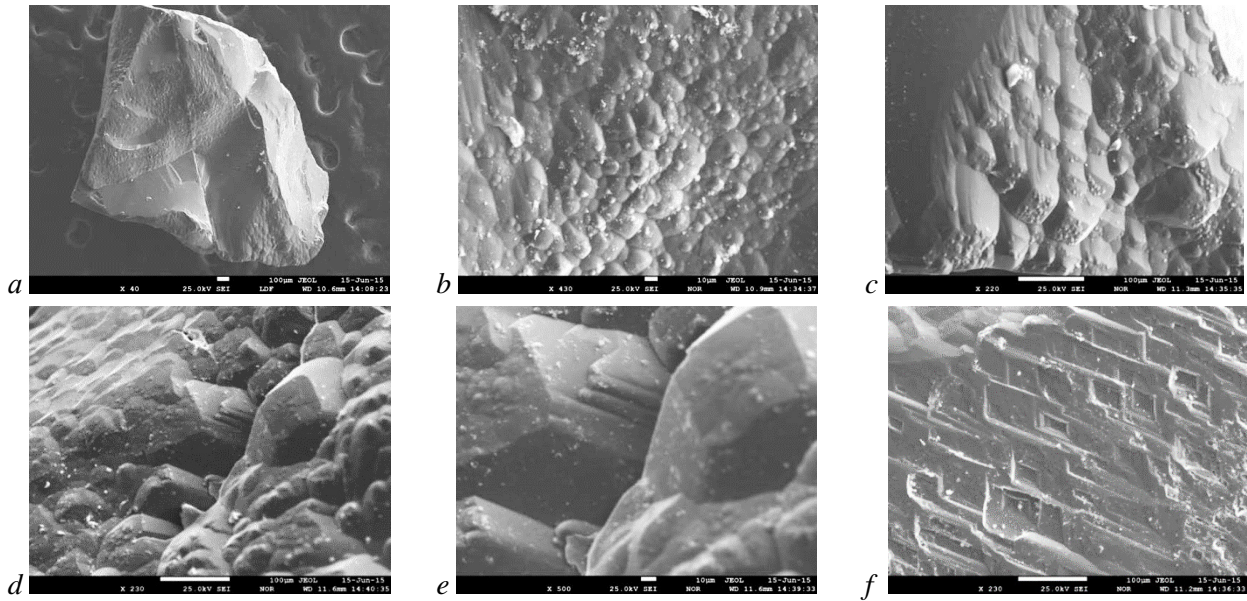


Рис. 10. Коррозионный рельеф пиропов. РЭМ-фото в режиме BSE: *a* – общий вид; *b-g* – детали поверхности зерна: *b-e* – пирамидально-черепитчатый рельеф с элементами каплевидного; *f, g* – дислокационный рельеф.

[**Fig. 10.** Corrosive relief of pyrope. SEM photo in BSE mode: *a* – general view; *b-g* – details of the grain surface: *b-e* – pyramidal-tiled relief with tear-shaped elements; *f, g* – dislocation relief.]

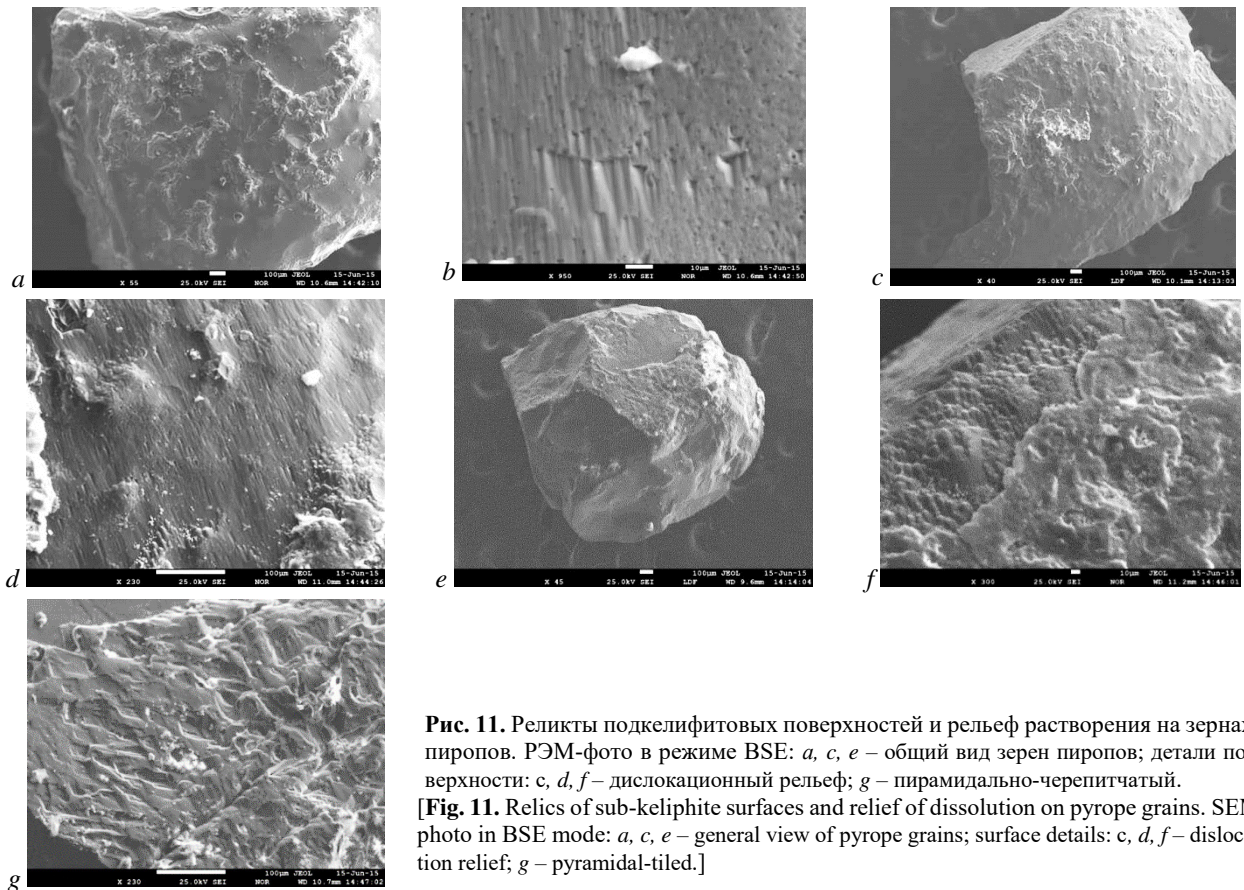


Рис. 11. Реликты подкельфитовых поверхностей и рельеф растворения на зернах пиропов. РЭМ-фото в режиме BSE: *a, c, e* – общий вид зерен пиропов; детали поверхности: *c, d, f* – дислокационный рельеф; *g* – пирамидально-черепитчатый.

[**Fig. 11.** Relics of sub-keliphite surfaces and relief of dissolution on pyrope grains. SEM photo in BSE mode: *a, c, e* – general view of pyrope grains; surface details: *c, d, f* – dislocation relief; *g* – pyramidal-tiled.]

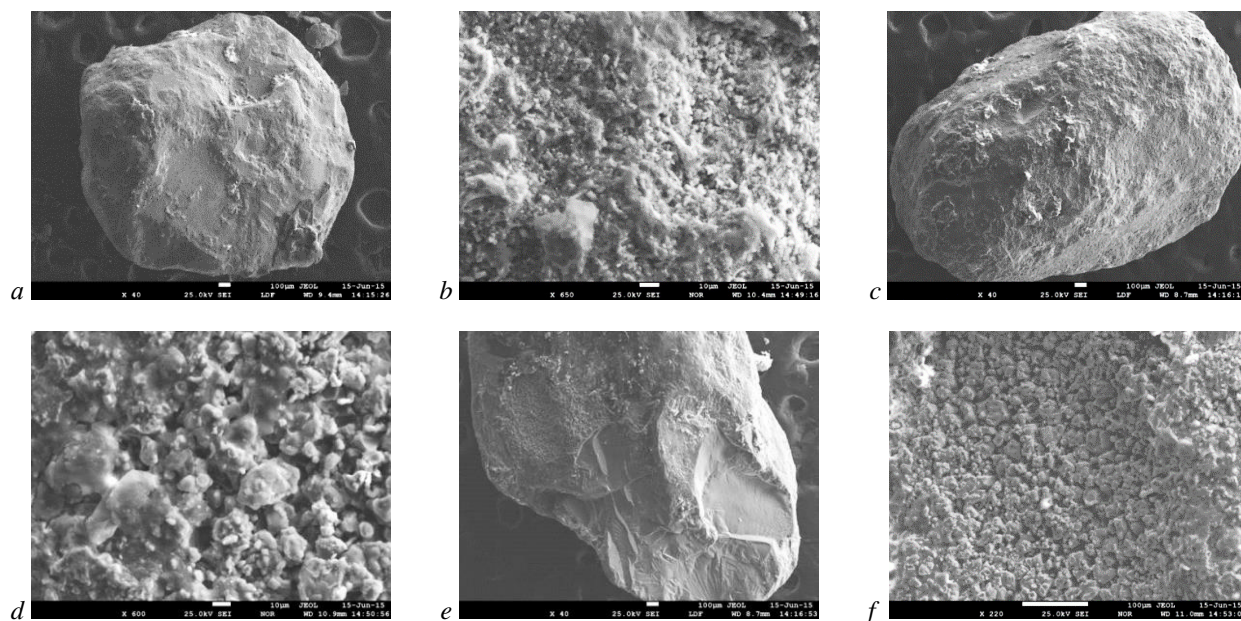


Рис. 12. Строение келифитовых кайм на пиропе из кимберлитов поля Катока: РЭМ-фото в режиме BSE: *a, c, e* – общий вид пиропов; *b, d, f* – пористые каймы.

[**Fig. 12.** Construction of kelyphite rims on pyropes from kimberlites of the Catoca field: SEM photo in BSE mode: *a, c, e* – general view of pyropes; *b, d, f* – porous borders.]

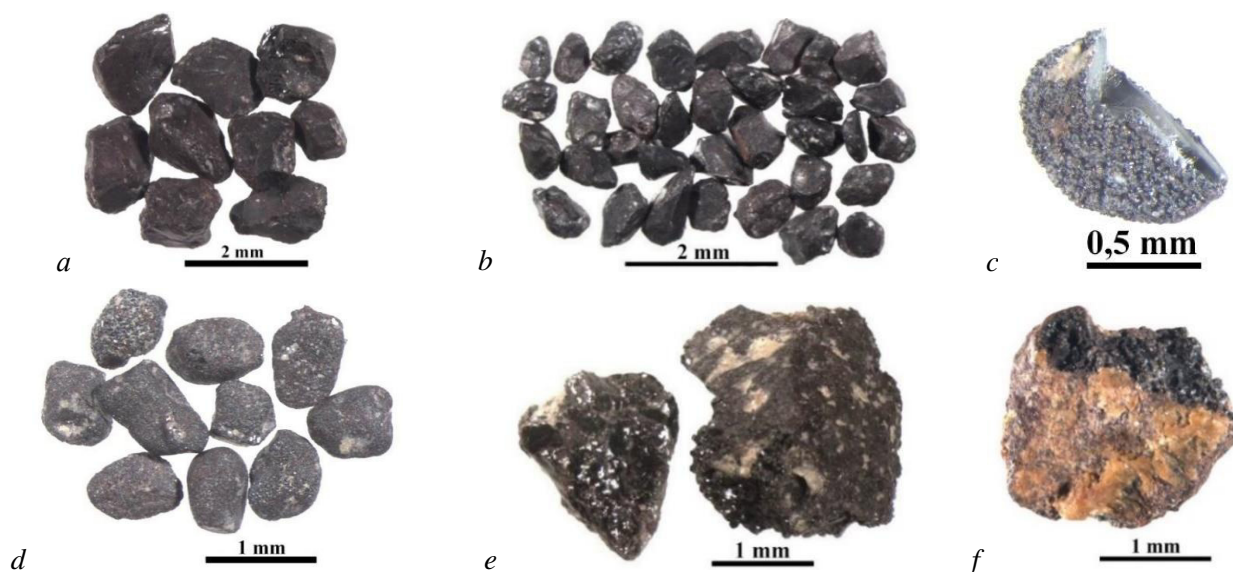


Рис. 13. Типы поверхностей монокристалльных и агрегатных зерен пикроильменитов: *a, b* – матированная; *c* – шиповидная; *d* – шагреновая; *f, g* – агрегатные зерна с шагреновой поверхностью.

[**Fig. 13.** Types of surfaces of monocrystalline and aggregate grains of picroilmenite: *a, b* – frosted; *c* – spiny; *d* – shagreen; *f, g* – aggregate grains with a shagreen surface.]

Каналы травления, кавернозный и ямчатый рельефы являются признаками выветривания – гипергенного растворения (рис. 14, *a-h*). Часть магнитных зерен минерала покрыта буроватыми корочками гидроксидов железа и пылеватого магнетита. Для пикроильменитов трубки Катока отмечены высокие концентрации железа ($\text{FeO} > 40\%$) и титана ($\text{TiO}_2 < 39\%$) и низким магния ($\text{MgO} < 5\%$). Отдельные исследователи [17] отметили факт обогащения Mg внешних областей зёрен минерала, что подтверждает утверждения об эволюции кимберлитовой магмы от большей железистости к по-

вышенной магниальности. Пикроильмениты с низкими отношениями $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ характерны для кимберлитов с более высокими содержаниями алмазов, чем ильмениты с повышенным количеством Fe^{3+} , что объясняется [18–22] повышенной активностью кислорода в кимберлитовой магме, влияющем на их сохранность. Следует при этом отметить, что высокие концентрации магния считается позитивным фактором алмазоносности, что объясняет в целом высокую продуктивность отдельных магматических типов кимберлитов трубки Катока. В зоне гипергенеза в условиях тропического

климата гидратация пикроильменита приводит к образованию по нему новообразований лейкоксена и аризонита, что в целом характерно для кимберлитов северо-востока Анголы [23–24].

Полученные результаты съемки на рентгеновском микротомографе Skyscan фирмы Bruker морфологиче-

ских особенностей пиропов и пикроильменитов из выветрелых кимберлитов позволяют уверенно диагностировать коррозионный характер трещин в зернах (рис. 15). Форма трещин, бугорчатая поверхность в плоскостях трещин и закругленные края явно указывают на коррозионный тип.

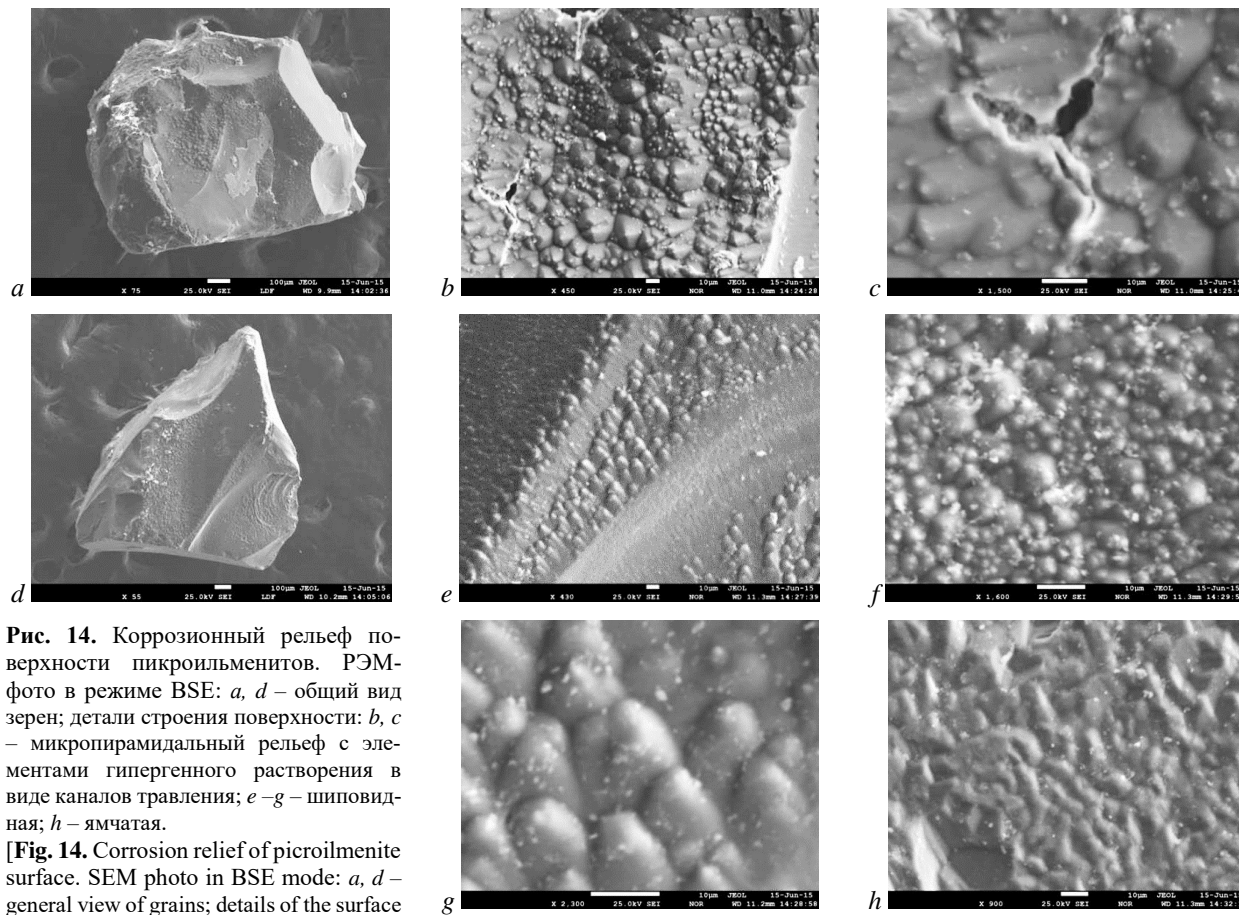


Рис. 14. Коррозионный рельеф поверхности пикроильменитов. РЭМ-фото в режиме BSE: *a, d* – общий вид зерен; детали строения поверхности: *b, c* – микропирамидальный рельеф с элементами гипергенного растворения в виде каналов травления; *e–g* – шиповидная; *h* – ямчатая.

[Fig. 14. Corrosion relief of picroilmenite surface. SEM photo in BSE mode: *a, d* – general view of grains; details of the surface structure: *b, c* – micropyramidal relief with elements of hypergene dissolution in the form of etching channels; *e–g* – spiny; *h* – pitted.]

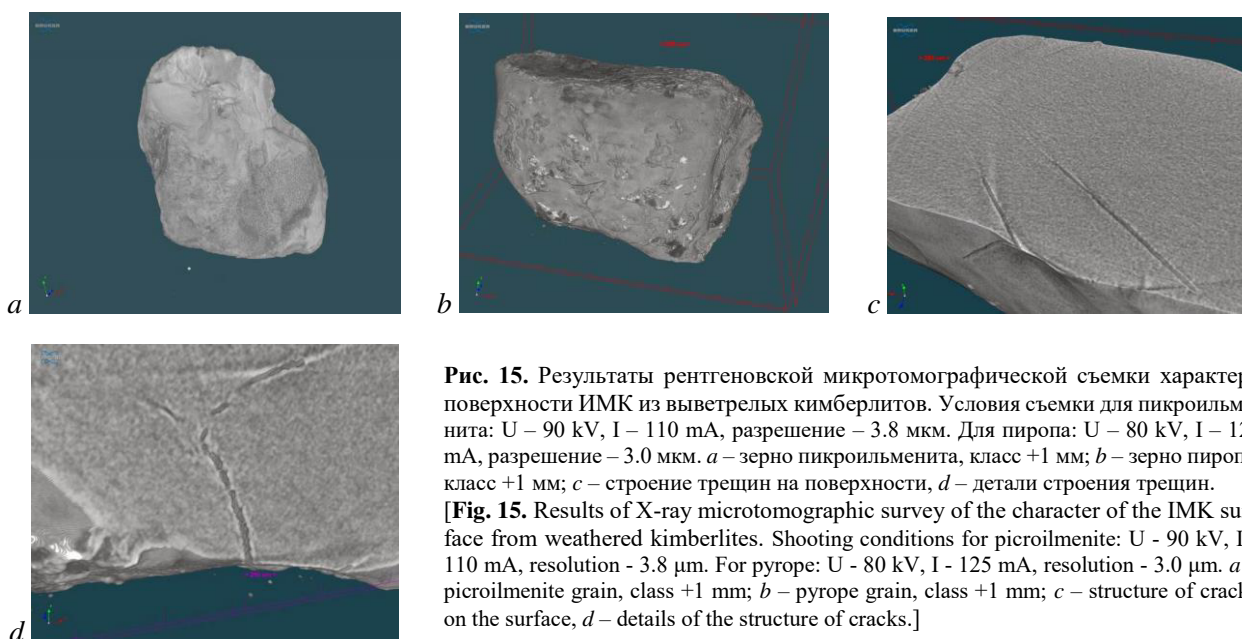


Рис. 15. Результаты рентгеновской микротомографической съемки характера поверхности ИМК из выветрелых кимберлитов. Условия съемки для пикроильменита: *U* – 90 kV, *I* – 110 mA, разрешение – 3.8 мкм. Для пиропы: *U* – 80 kV, *I* – 125 mA, разрешение – 3.0 мкм. *a* – зерно пикроильменита, класс +1 мм; *b* – зерно пиропы, класс +1 мм; *c* – строение трещин на поверхности, *d* – детали строения трещин.

[Fig. 15. Results of X-ray microtomographic survey of the character of the IMK surface from weathered kimberlites. Shooting conditions for picroilmenite: *U* - 90 kV, *I* - 110 mA, resolution - 3.8 μm. For pyrope: *U* - 80 kV, *I* - 125 mA, resolution - 3.0 μm. *a* – picroilmenite grain, class +1 mm; *b* – pyrope grain, class +1 mm; *c* – structure of cracks on the surface, *d* – details of the structure of cracks.]

Обсуждение результатов

Проведёнными исследованиями отмечены существенные отличия различных типов кимберлитов, слагающих диатремы северо-востока Анголы. Массивному ПК характерно минимальное количество ксенолитов, сравнительно равномерное распределение по породе вкрапленников псевдоморфоз по оливину и другим минералам, повышенное количество в основной массе кристаллической фазы, а также идиоморфных и субидиоморфных микрофенокристаллов. Учитывая текстурно-структурные особенности такой тип пород классифицирован как крупно- или средневоидофировый кимберлит. Для АКБ свойственна высокая концентрация автолитовых обособлений и обломков массивных кимберлитов ранней фазы внедрения, обломков вмещающих пород, относительно крупные размеры псевдоморфоз по первичным минералам (особенно оливину), а также повышенная роль процессов доломитизации. КБ и АКБ являются доминирующими породами жерловой фации. Они вскрываются практически всеми глубокими скважинами глубже 250-270 м. КБ с массивной текстурой цемента принадлежит большая доля в объёме периферийной части кратера, выделяемой визуально как ПК. Среди образований кратерной части доминируют вулканогенно-осадочные (туфогравелиты, туфопесчаники и туфоалевролиты) и эпикластические образования с различным количеством кимберлитового материала. Последние представляют собой отложения, сформированные в бассейне кратерного озера за счёт разрушения вмещающих метаморфических и кимберлитовых пород (в том числе продуктов их выветривания) и неоднократного переотложения дезинтегрированного материала. По сути это отложения различных генетических типов – аллювиально-делювиальные, временных потоков, гравитационные (обвальные, осыпные и оползневые), делювиальные, делювиально-колювиальные, образования подножий, пролювиальные – щебнисто-суглинистые с включениями небольших глыб (делювиальные брекчии), находящиеся в виде прослоев и линз среди аллювиально-делювиальных слоёв осадков смешанного литологического состава с послойными доминантами различных по зернистости глинистых песчаников и алевролитов (реже гравелитов). Значительный объём в кратерной части занимают пролювиальные образования с плохой отсортированностью и слабой окатанностью материала, представленные песчано-глинистыми образованиями с включениями гальки и щебня.

Исходные (материнские) кимберлитовые породы, подвергшиеся выветриванию, по текстуре, структуре и вещественному составу в целом отвечают таковым как для поля Катока, так и для других провинций мира. Аналогично последним при изменении кимберлитов региона первичные пороодообразующие минералы замещены минералами серпентиновой группы, несущими в себе информацию о материнской породе даже при отсутствии реликтов самого оливина. Особенно сильно исходных пород описываемого региона является перемешивание кимберлитового материала с таковым

из вмещающей гранито-гнейсовой толщи и дресвянистыми продуктами их гипергенного преобразования с образованием неоднородной смеси литических обломков и минералов, совместное выветривание которых привело к формированию специфического состава новообразованных продуктов. Последнему в значительной мере способствовало преобразование накопленного материала в условиях жаркого климата с контрастным изменением ливневых и засушливых сезонов [25-26]. Отмеченные особенности пород, заполняющих диатремы описываемого региона, привели к определённым изменениям в содержании и распределении по глубинам минералов тяжелой фракции, важнейшими среди которых являются алмазы и другие ИМК. Установлена относительная стабильность распределения по собственно кимберлитам ряда габитусных форм алмазов (октаэдров, переходных форм и додекаэдров), что может свидетельствовать о едином магматическом источнике минерала. Основными типами окраски алмазов из кимберлитов региона является [12] идиохроматическая (жёлтая, коричневая, фиолетовая и отчасти зелёная). Аллохроматическая окраска связана с непрозрачными включениями в кристаллах мелкодисперсного графита (серая), окислов и гидроокислов тёмных рудных минералов (бурая, коричневая и чёрная) или тонких плёнок силикатов (голубовато-зелёная). Установлено, что кристаллы алмаза из разных типов кимберлитов морфологически специализированы, а каждой диатреме характерно своё соотношение облика кристаллов. Характер распределения и соотношение разновидностей и габитусных типов кристаллов в ВОП и в осадочном комплексе иной, чем в магматических выделениях, что связано с переотложением в первых алмазов из разрушенных пород диатремы [27]. На формирование ВОП и распределение в них алмазов влияли такие экзогенные факторы, как гидродинамика среды осадконакопления, гравитационное осаждение минералов тяжелой фракции (включая алмазы), существенно определяющие образование внутрикратерных россыпей и гранулометрический спектр накопленных в них алмазов. Кроме алмаза, наибольшей сохранность в изучаемых кимберлитах отличаются гранаты, ильменит (пикроильменит) и клинопироксены [28]. В изменённых кимберлитах оливин нацело замещён вторичными новообразованиями и представлен псевдоморфозами, выполненными агрегатом серпентина, мелкочешуйчатого хлорита, карбоната, а иногда и магнетита. Самые высокие концентрации ИМК (как и тяжелой фракции в целом) установлены в породах жерловой фации, причём нередко встречается в примерно равном количестве пироп и пикроильменит. Наибольшее средняя концентрация тяжёлых минералов отмечена в кластопорфировых кимберлитах и кимберлитовых брекчиях, причём почти половина представлена электромагнитными образованиями. Наибольшим разнообразием тяжёлых минералов отличаются КБ. С переходом к ВОП заметно увеличивается доля пикроильменита при существенной роли пироба, а в туфогравелитах одновременно с пиропом повышается количество

хромдиоксида, содержание которого в отдельных участках кратерной части превышает 20% всех первичных минералов. Довольно часто, наряду с высокими количествами пирропа и пикроильменита, отмечается повышенная роль флогопита (слюдястые КБ жерловой фации). В крупных гранулометрических фракциях (более 0.5 мм) постоянно встречается гранат-пироксеновые сростки. Практически во всех изученных фракциях присутствуют магнетит и лимонит, придающие породам бурый цвет различной интенсивности.

Заключение

В целом высокие концентрации тяжёлых минералов вообще и ИМК в частности являются характерными признаками пород кимберлитового поля Катока, что предполагает эффективное применение шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений в исследуемом регионе. Наличие на африканском континенте диатрем со слабо эродированными верхними горизонтами указывает на несущественную их эрозию, а также на незначительный размыв и перенос в коррелируемые осадочные толщи кимберлитового материала. Такие факторы являются осложняющим для применения шлихоминералогического метода. В этой связи более эффективным является комплексирование геолого-геофизических, минералогических и геохимических методов поисков. При этом только прецизионные минералого-геохимические исследования ИМК позволяют нацеливать поисковые работы на выявление алмазоносных кимберлитовых трубок.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 суперпоясов. – Воронеж: ВГУ. 2008. 622 с.
2. Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д. Стратегия ведения и результаты алмазописковых работ // *Горный вестник*. 1997. №3. С. 53–57.
3. Устинов В. Н., Голубев Ю. К., Загайный А. К., Стегницкий Ю. Б. Алмазоносные территории Африки и их значение для расширения сырьевой базы алмазодобывающей промышленности. Минеральные ресурсы России // *Экономика и управление*. 2017. № 6. С. 66–72.
4. Стегницкий Ю. Б., Абрамов В. Ю., Кукуй И. М. Прогнозно-поисковая модель алмазоносной трубки северо-востока Анголы // Сб.: *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические и инновационно-технологические направления их повышения*. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ-НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). Мирный: МГТ. 2018. С.185–190.
5. Ганга Ж., Зинченко В. Н., Носыко С. Ф., Ротман А. Я. Алмазоносность и перспективы обнаружения новых кимберлитовых месторождений на северо-востоке Анголы // *Региональная геология и металлогения*. 2004. №22. С.116–123.
6. Зинченко В. Н. Кимберлиты северо-востока Анголы. Геологическое строение, алмазоносность, алмазы. Saarbrücken, PalmariumAcademicPublishing. 2014. 240 с.
7. Зуев В. М., Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Маккенда А. Слабоэродированные кимберлитовые трубки Анголы // *Геология и геофизика*. 1988. №3. С.56–62.
8. Ротман А. Я., Зинчук Н. Н., Носыко С. Ф., Шимуни Ж. Основные генетические типы алмазных месторождений северо-востока Анголы // Сб.: *Геология алмазов - настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России)*. Воронеж: ВГУ. 2005. С. 594–609.
9. Ротман А. Я., Зинчук Н. Н., Носыко С. Ф., Егоров К. Н., Чёрный С. Д., Стегницкий Ю. Б., Бондаренко А. Т., Василенко В. Б., Крючков А. И. Модель слабоэродированных кимберлитовых диатрем на примере трубки Катока (Ангола) // Сб.: *Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения*. Мирный: МГТ. 2003. С. 152–169.
10. Ротман А. Я., Зинчук Н. Н., Носыко С. Ф., Крючков А. И., Егоров К. Н., Стегницкий Ю. Б. Геология и вещественный состав кимберлитовой трубки Катока (Ангола) // Сб.: *Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века*. Воронеж: ВГУ. 2003. С. 111–121.
11. Зинченко В. Н. Морфология алмазов кимберлитовых трубок поля Катока (Ангола) // *ЗРМО*. 2007. №6. С. 91–102.
12. Зинченко В. Н. Алмазы кимберлитовой трубки Катока // *Региональная геология и металлогения*. 2007. №30-31. С. 150–161.
13. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. 2-е изд. М.: Наука. 1984. 264 с.
14. Горшков А. И., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П., Мохов А. В., Сивцов А. В. Новый упорядоченный смешанослойный минерал лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки // *Доклады Академии наук*. 2002. Т.382. №3. С. 374–378.
15. 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.
16. Мацюк С. С., Зинчук Н. Н. Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии. М.: Недра. 2001. 428 с.
17. Харьков А. Д., Левин В. И., Маккенда А., Сафронов А. Ф. Кимберлитовая трубка Камафука-Камазамбо (Ангола) – самая крупная в мире // *Изв. АН СССР*. 1992. №6. С. 114–123.
18. Ротман А. Я., Зинчук Н. Н., Ащепков И. В., Егоров К. Н. Кимберлитовый магматизм и вопросы алмазоносности // Сб.: *Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века*. Воронеж: ВГУ. 2003. С. 856–891.
19. Стегницкий Ю. Б. Вещественно-индикационные параметры кимберлитов и их использование при разведке и эксплуатации месторождений (на примере трубок Нюрбинская и Катока): Автореф ... дис. кан. геол.-мин. наук. Мирный: 2006. 22 с.
20. Егоров К. Н., Зинчук Н. Н., Ротман А. Я., Носыко С. Ф., Сонеева Л. А. Геохимия (ICP-MS) и мантийный источник кимберлитов северо-востока Анголы // *Отечественная геология*. 2006. №2. С. 20–28.

21. Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б., Зинчук М. Н. Продукты выветривания кимберлитовых пород и их роль при образовании россыпей алмазов (на примере трубок Накынского поля и Катока) // Сб.: *Природные и техногенные россыпи. Проблемы. Решения.* Труды III Международной научно-практической конференции. Симферополь: КО Укр.ГГРИ. 2007. С. 160–167.
22. Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б., Котельников Д. Д. Особенности вторичных слоистых силикатов в породах трубки Катока (Ангола) // *Бюллетень МОИП. Отдел. геологич.* 2006. Т.81. Вып.3. С. 72–76.
23. Стегницкий Ю. Б., Колесник А. Ю., Кукуй И. М., Антонова Н. В. Геохронологическая характеристика некоторых кимберлитовых тел северо-востока Анголы // Сб.: *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозные, методические и инновационно-технологические направления их повышения.* Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ-НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). Мирный: МГТ. 2018. С. 191–195.
24. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Стегницкий Ю. Б., Жухлистов А. П. Стадийность и направленность преобразования серпентина и флогопита в кимберлитах трубки Катока (Ангола) // *Известия ВУЗов. Геология и разведка.* 2005. №2. С. 16–23.
25. 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.
26. Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Ротман А. Я., Кузнецова Л. Г., Минин В. А., Холодова Л. Д. Сравнительная характеристика постмагматического изменения кимберлитов Якутии и Африки // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2008. №1. С. 34–46.
27. Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б. Продукты выветривания кимберлитовых пород как дополнительный критерий при поисково-разведочных работах на алмазы (на примере трубок Накынского поля Якутии и Катока, Ангола) Анголы // Сб.: *Геология алмазов - настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г.Мирный и алмазодобывающей промышленности России).* Воронеж: ВГУ. 2005. С.1369–1383.
28. Гулевская Н. С., Николаева Э. В., Стегницкий Ю. Б., Романова Е. А. Минералогические особенности кимберлитовых тел юго-западной части алмазоносного района Лунда, Ангола // Сб.: *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозные, методические и инновационно-технологические направления их повышения.* Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ-НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). Мирный: МГТ. 2018. С. 72–77.

Heavy fraction minerals from altered kimberlites of the Catoca field (Angola)

©2021 N. N. Zinchuk✉, Yu. B. Stegnitskiy, E. A. Romanova

*West-Yakutian Scientific Centre of the SR (Yakutia) Academy of Sciences,
16 Tchernischewski sch., 678170 Mirni, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The article presents the results of a comprehensive study of the features of the composition and distribution of the heavy fraction from the kimberlites of the Catoca field (north-eastern Angola). The reference object of this study is the kimberlite pipe. In the weakly eroded Catoca kimberlite pipe with a preserved crater structure, a wide petrographic spectrum of rocks was determined. The rocks were often intensively altered as a result of hypergene processes with the almost complete destruction of relict minerals and shading of the primary structural and textural features.

Methodology: In order to study the features of the distribution of the heavy fraction in the sections of kimberlite rocks and the concentration rate of deep minerals in the weathering zone, we analysed a representative amount of data on the recovery of core samples. We studied the features of the heavy fraction distribution in more than fifty sections of wells, which exposed the Catoca field kimberlites. For analysis, we used the results of recovery of core samples at the concentration plant, for comparison, we also used the data of studies of crushed bulk samples and lump ore samples.

Results and discussion: Based on the complex of features, we found rocks of three facies: hypabyssal (sub-volcanic), vent (or diatreme), and crater. Each of them is characterised by its own ratio of different types of magmatic (hypabyssal and vent facies) and volcanogenic-sedimentary (crater facies) formations.

Conclusions: The noted features of the composition of the rocks filling the diatremes of the described region led to certain changes in the content and depth distribution of the heavy fraction. The most important of the fraction in terms of prospecting are the kimberlite indicator minerals (KIMs). Garnets (mainly pyrope), picroilmenite, and clinopyroxenes are the most preserved minerals in the studied kimberlite rocks. The highest concentrations of heavy minerals (including KIMs) are found in the vent facies. In general, this parameter is typical for the diatremes of the Catoca field. This highlights the possible high perspective of the use of the black sand mineralogical method of prospecting for kimberlite pipes in this zone and other territories similar in geological structure.

Keywords: kimberlite pipes, petrographic types of rocks, indicator minerals, heavy fraction.

For citation: Zinchuk N. N., Stegnitskiy Yu. B., Romanova E. A. 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. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3335>.

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



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

REFERENCES

- 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.).
- Zinchuk N. N., Zuev V. M., Koptil V. I., Cherny S. D. Strategiya vedeniya i rezultatyalmazoposkovykh rabot [Diamond management strategy and results]. *Gornyi vestnik*, 1997, no.3, pp.53–57. (In Russ.).
- Ustinov V. N., Golubev Yu. K., Zagainy A. K., Stegnitskiy Yu. B. Diamond-bearing territories of Africa and their importance for expanding the raw material base of the diamond mining industry. Mineral resources of Russia. *Ekonomika i upravlenie – Economics and Management*, 2017, no. 6, pp. 66–72. (In Russ.).
- Stegnitskiy Yu. B., Abramov V. Yu., Kukuy I. M. Prognozno-poiskovaya model' almazonosnoi trubki severo-vostoka Angoly [Prediction and exploration model of a diamondiferous pipe in the northeast Angola]. *Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognosno-resursnye, metodicheskie i innovatsionno-tekhnologicheskie napravleniya ikh povysheniya. Materialy U Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 50-letiyu Almaznoi laboratorii TsNIGRI-NIGP AK «ALROSA» (PAO)*. [Efficiency of exploration for diamonds: forecast-resource, methodological and innovative-technological directions for their increase. Materials At the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 50th anniversary of the Diamond Laboratory of ZNIGRI-NIGP AK ALROSA (PAO)]. Mirny, MGT, 2018, pp.185–190. (In Russ.).
- Ganga J., Zinchenko V. N., Nosyko S. F., Rotman A. Ya. Almazonosnost' i perspektivy obnaruzheniya novykh kimberlitovykh mestorozhdenii na severo-vostoke Angoly [Diamond content and prospects for the discovery of new kimberlite deposits in the north-east of Angola]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya – Regional geology and metallogeny*, 2004, no. 22, pp.116–123. (In Russ.).
- Zinchenko V. N. *Kimberlity severo-vostoka Angoly. Geologicheskoe stroenie, almazonosnost', almazy* [Kimberlites of the northeast Angola. Geological structure, diamond content, diamonds]. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2014, 240 p. (In Russ.).
- Zuev V. M., Kharkiv A. D., Zinchuk N. N., Mackenda A. Slaboerodirovannye kimberlitovye trubki Angoly [Weakly eroded kimberlite pipes of Angola]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 1988, no. 3, pp.56–62. (In Russ.).
- Rotman A. Ya., Zinchuk N. N., Nosyko S. F., Shimuni Zh. Osnovnye geneticheskie tipy almaznykh mestorozhdenii severo-vostoka Angoly [The main genetic types of diamond deposits in the northeast Angola]. *Geologiya almazov - nastoyashee i budushchee (geologi k 50-letnemu yubileyu g. Mirnyi i almazodobyvayushchei promyshlennosti Rossii)* [Geology of diamonds – the present and the future (geologists on the occasion of the 50th anniversary of Mirny and diamond mining industry of Russia)]. Voronezh: Voronezh State University, 2005. pp. 594–609. (In Russ.).
- Rotman A. Ya., Zinchuk N. N., Nosyko S. F., Egorov K. N., Black S. D., Stegnitskiy Yu. B., Bondarenko A. T., Vasilenko V. B., Kryuchkov A. I. Model' slaboerodirovannykh kimberlitovykh diatrem na primere trubki Katoka (Angola) [A model of weakly eroded kimberlite diatremes through the example of the Catoca pipe (Angola)]. *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy AK «ALROSA»: sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya*. [Geological aspects of the mineral resources base of AK ALROSA: current status, prospects, solutions]. Mirny, MGT 2003, pp. 152–169. (In Russ.).
- Rotman A. Ya., Zinchuk N. N., Nosyko S. F., Kryuchkov A. I., Egorov K. N., Stegnitskiy Yu. B. Geologiya i veshchestvennyi sostav kimberlitovoi trubki Katoka (Angola) [Geology and material composition of the Catoca kimberlite pipe (Angola)] *Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na poroge 21 veka*. [Problems of forecasting, prospecting and studying of mineral deposits on the threshold of the 21st century]. Voronezh, Voronezh State University, 2003, pp.111–121. (In Russ.).
- Zinchenko V. N. Morfologiya almazov kimberlitovykh trubok polya Katoka (Angola) [Morphology of diamonds of kimberlite pipes of the Catoca field (Angola)]. *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva – Notes of the Russian Mineralogical Society*, 2007, no. 6, pp. 91–102. (In Russ.).
- Zinchenko V. N. Almazy kimberlitovoi trubki Katoka [Diamonds of the Catoca kimberlite pipe]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya – Regional Geology and Metallogeny*, 2007, no. 30-31, pp.150–161. (In Russ.).
- Orlov Y. L. *Mineralogiya almaza* [Mineralogy of diamond]. 2nd ed. Moscow, Nauka publ., 1984, 264 p. (In Russ.).
- Gorshkov A. I., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D., Shlykov V. G., Zhukhlistov A. P., Mokhov A. V., Sivtsov A. V. Novyi uporядochennyi smeshanosloiny mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Yuzhnoi Afriki [New ordered mixed-layer mineral lysardite-saponite from kimberlites of South Africa]. *Doklady Akademii nauk – Reports of RAN*, 2002, vol. 382, no.3, pp.374–378. (In Russ.).
- Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D., Gorshkov A. I. Identifikatsiya i genesis lizardit-saponitovogo smeshanosloinogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoi iz trubok Yuzhnoi Afriki [Identification and genesis of a lysardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites of one of the pipes in South Africa]. *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and minerals*, 2003, no.1, pp.87–96. (In Russ.).
- Matsuk S. S., Zinchuk N. N. *Opticheskaya spektroskopiya mineralov verkhnei mantii* [Optical Spectroscopy of minerals of the upper mantle]. Moscow, Nedra publ., 2001, 428 p. (In Russ.).
- Kharkiv A. D., Levin V. I., Mackenda A., Safronov A. F. Kimberlitovaya trubka Kamafuka-Kamazambo (Angola) – samaya krupnaya v mire [The kimberlite pipe Kamafuka-Kamazambo (Angola) is the largest in the world]. *Izv. AN SSSR – Izv. USSR Academy of Sciences*, 1992, no.6, pp.114–123. (In Russ.).
- Rotman A. Ya., Zinchuk N. N., Aschepkov I. V., Egorov K. N. Kimberlitovyi magmatizm i voprosy almazonosnosti [Kimberlite magmatism and diamond bearing issues]. *Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na poroge 21 veka* [Problems of forecasting, prospecting and studying of mineral deposits on the threshold of the 21st century]. Voronezh, Voronezh State University, 2003, pp. 856–891. (In Russ.).
- Stegnitskiy Yu. B. *Veshchestvenno-indikatsionnye parametry kimberlitov i ikh ispol'zovanie pri razvedke i ekspluatatsii mestorozhdenii (na primere trubok Nyurbinskaya i Katoka)*. Diss. cand. geol.-min. nauk [The material composition of kimberlites and their use in the exploration and operation of deposits (Nyurbinskaya and Catoca pipes): PhD. in geol.-min. Diss.]. Mirny, 2006, 22 p. (In Russ.).
- Egorov K. N., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya., Nosyko S. F., Soneeva L. A. Geokhimiya (ICP-MS) i mantiinyi istochnik kimberlitov severo-vostoka Angoly [Geochemistry (ICP-MS) and the

mantle source of kimberlites of the northeast Angola]. *Otechestvennaya geologiya – Indigenous Geology*, 2006, no. 2, pp. 20–28. (In Russ.).

21. Zinchuk N. N., Stegnitskiy Yu. B., Zinchuk M. N. Produkty vyvetrivaniya kimberlitovykh porod i ikh rol' pri obrazovanii rossypei almazov (na primere trubok Nakynskogo polya i Katoka) [Weathering products of kimberlite rocks and their role in the formation of diamond placers (for example, pipes of the Nakynsky field and Catoca)]. *Prirodnye i tekhnogennye rossypi. Problemy. Resheniya. Trudy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Natural and man-made placers. The problems. The solutions. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference]. Simferopol, KO Ukr.GRI, 2007, pp.160–167. (In Russ.).

22. Zinchuk N. N., Stegnitskiy Yu. B., Kotelnikov D. D. Osobennosti vtorichnykh sloistykh silikatov v porodakh trubki Katoka (Angola) [Features of the secondary layered silicates in the rocks of the Catoca pipe (Angola)]. *Byulleten' MOIP. Otdel. Geology. – MOIP Bulletin. The Department of geology*, 2006, vol. 81, no. 3, pp.72–76. (In Russ.).

23. Stegnitskiy Yu. B., Kolesnik A. Yu., Kukuy I. M., Antonova N. V. Geokhronologicheskaya kharakteristika nekotorykh kimberlitovykh tel severo-vostoka Angoly [Geochronological characteristics of some kimberlite bodies of the northeast Angola] *Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnye, metodicheskie i innovatsionno-tekhnologicheskie napravleniya ikh povysheniya. Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 50-letiyu Almaznoi laboratorii TsNIGRI-NIGP AK «ALROSA» (PAO)* [Efficiency of exploration works on diamonds: forecast-resource, methodological and innovative-technological directions of their increase. Materials At the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 50th anniversary of the Diamond Laboratory of ZNIGRI-NIGP AK ALROSA (PAO)], Mirny, MGT., 2018, pp. 191–195. (In Russ.).

24. Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D., Stegnitskiy Yu. B., Zhukhlistov A. P. Stadiinost' i napravlennost' preobrazovaniya serpentina i flogopita v kimberlitakh trubki Katoka (Angola) [The staged and directional transformation of serpentine and phlogopite in kimberlites of the Catoca pipe (Angola)]. *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka – News of universities. Geology and exploration*, 2005, no. 2, pp.16–23. (In Russ.).

25. Zinchuk N. N., Savko A. D., Kraynov A. V. *Kimberlity v istorii Zemli*. [Kimberlites in 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.).

26. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya., Kuznetsova L. G., Minin V. A., Kholodova L. D. Sravnitel'naya kharakteristika postmagmaticheskogo izmeneniya kimberlitov Yakutii i Afriki [Comparative characteristics of post-magmatic changes in kimberlites of Yakutia and Africa]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2008, no.1, pp. 34–46. (In Russ.).

27. Zinchuk N. N., Stegnitskiy Yu. B. Produkty vyvetrivaniya kimberlitovykh porod kak dopolnitel'nyi kriterii pri poiskovo-razvedochnykh rabotakh na almazy (na primere trubok Nakynskogo polya Yakutii i Katoka, Angola) Angoly [Kimberlite weathering products as an additional criterion for prospecting and exploration for diamonds (on the example of pipes of the Nakyn field of Yakutia and Catoca, Angola) Angola]. *Geologiya almazov - nastoyashchee i budushchee (geologi k 50-letnemu yubileyu g.Mirnyi i almazodobyvayushchei promyshlennosti Rossii)* [Geology of diamonds – the present and the future (geologists on the occasion of the 50th anniversary of Mirny and the diamond mining industry of Russia)] Voronezh, VSU, 2005, pp.1369–1383. (In Russ.).

28. Gulevskaya N. S., Nikolaeva E. V., Stegnitskiy Yu. B., Romanova E. A. Mineralogicheskie osobennosti kimberlitovykh tel yugo-zapadnoi chasti almazonosnogo raiona Lunda, Angola [Mineralogical features of kimberlite bodies in the southwestern part of diamondiferous region of Lunda, Angola]. *Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnye, metodicheskie i innovatsionno-tekhnologicheskie napravleniya ikh povysheniya. Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 50-letiyu Almaznoi laboratorii TsNIGRI-NIGP AK «ALROSA» (PAO)*. [Efficiency of geological exploration for diamonds: resource-forecasting, methodological and innovative-technological directions for their increase. Materials At the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 50th anniversary of the Diamond Laboratory ZNIGRI-NIGP AK ALROSA (PAO)]. Mirny, MGT., 2018, pp. 72–77. (In Russ.).

Zinchuk Nikolay Nikolaevich – д. г.-м. н., профессор, академик АН РС (Я), председатель ЗЯНЦ АН РС (Я), Мирный, Российская федерация; E-mail: nnzinchuk@rambler.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9682-3022>

Stegnitckiy Yuriy Bogdanovich – к.г.-м. н., ведущий научный сотрудник, ЗЯНЦ АН РС (Я), Мирный, Российская федерация; E-mail: ysteg@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2047-4946>

Romanova Ekaterina Aleksandrovna – н.с. ЗЯНЦ АН РС (Я), Мирный, Российская Федерация; E-mail: rin_an@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-7793-9361>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Nikolay N. Zinchuk – PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., academician AN RS (Ya), West-Yakutian Scientific Centre of RS (Y) AS, Mirny, Russian Federation; E-mail: nnzinchuk@rambler.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9682-3022>

Yuri B. Stegnitskiy – PhD in Geol.-Min, leading researcher, West-Yakutian Scientific Centre of RS (Y) AS, Mirny, Russian Federation; -mail: ysteg@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2047-4946>

Ekaterina A. Romanova – reseach assistant, ZYANZ AN RS (Y), Mirny, Russian Federation; E-mail: rin_an@mail.ru; ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7793-9361>

All authors have read and approved the final manuscript.