

Особенности коры выветривания кимберлитов северо-востока Анголы

©2020 Н. Н. Зинчук[✉], Ю. Б. Стегницкий

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

Аннотация

Введение: Приведены результаты комплексного изучения геологического строения и вещественного состава коры выветривания кимберлитов северо-востока Анголы. Важной задачей прикладного характера является оценка степени обогащения коры выветривания глубинными минералами для вопросов прогнозирования и поисков новых месторождений алмазов как коренного, так и рассыпного типов.

Методика: В качестве эталонного объекта выбрана кимберлитовая трубка Катока, характеризующаяся не только незначительным эрозионным срезом и сохранением кратерной постройки, а и широким петрографическим спектром пород и их интенсивным постмагматическим и гипергенным изменением. Для изучения геологического строения и вещественного состава кор выветривания слабо эродированных кимберлитовых трубок Анголы была собрана коллекция штучных образцов и протолочных проб из верхних горизонтов трубки Катока и ряда других тел этого поля, а также вмещающих кимберлиты пород.

Результаты и обсуждение: В кимберлитовой трубке Катока выделяется два генетических типа пород: собственно кимберлиты с их производными и комплекс вулканогенно-осадочных образований, заполняющих верхние части кратера диатремы. В целом, профиль коры выветривания разделён на две части: нижнюю и верхнюю. Нижняя часть (зона дезинтеграции) представлена слабо изменёнными автолитовыми кимберлитовыми брекчиями, трещиноватыми и частично обохрёнными. Верхняя, наиболее гипергенно изменённая зона, в свою очередь, разделена на карбонатную и бескарбонатную.

Заключение: Отмечено два процесса изменения кимберлитовых пород региона. Первый – поэтапное превращение оливина в высокотемпературный, затем и низкотемпературный серпентин. Второй – деградация серпентина с одновременным возникновением серии разбухающих минералов, начиная с сапонита через ряд промежуточно метастабильных смешанослойных образований, из которых впервые идентифицированная упорядоченная разновидность лизардит-сапонита является относительно наиболее устойчивой по сравнению с другими упорядоченными смешанослойными фазами триоктаэдрического типа, что подчёркивает специфические условия формирования коры выветривания кимберлитов африканского региона.

Ключевые слова: кора выветривания, кимберлиты, вулканогенно-осадочные образования, африканский континент.

Для цитирования: Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б. Особенности коры выветривания кимберлитов северо-востока Анголы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2020. №2. С. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2856>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Введение

На Африканской платформе (АП) открыто много кимберлитовых тел, распространённых на обширной территории, сгруппированных в отдельные субпровинции, районы и поля [1–5]. До настоящего времени здесь достоверно установлен один генетический тип мантийных алмазов – кимберлитовый. Их коренные месторождения разрабатываются в Южно-Африканской Республике, Ботсване, Танзании, Заире, Зимбабве и Анголе. В настоящее время в Анголе насчитывается около тысячи проявлений кимберлитов, при этом экономически значимые трубки приурочены к полю Катока. Оно расположено в бассейне р. Чикапа на крайнем юге провинции Лунда-Норте. На западе поле граничит с провинцией Маланже, на юге – с провинцией Мошико, а на северо-востоке замыкает границу страны. В геолого-структурном отношении описываемая территория приурочена к западному склону щита Касаи архейско-протерозойского возраста и примыкающей к нему мезозойско-кайнозойской впадине Конго. Кимберлитовые проявления в пределах поля группируются в зону меридиального направления длиной 18 км и шириной 12–14 км. Всего здесь известно

более 150 кимберлитовых диатрем, оси большинства из которых ориентированы в северо-восточном и северо-западном направлениях. Среди известных кимберлитовых диатрем поля трубка Катока имеет размеры на поверхности 915x990 м, площадь 66 га. Она представляет уникальную в геологическом и вещественном плане диатрему (рис. 1), характеризующуюся незначительным эрозионным срезом с сохранившейся кратерной постройкой [6–9]. Вмещающие трубку породы представлены докембрийскими гнейсами и кристаллическими сланцами, перекрывающиеся – неогеновыми песками формации Калахари, палеоген-неогеновыми межформационными песками, слабо литифицированными песчаниками и современными аллювиальными отложениями. Форма трубки в плане почти изометричная. Более 80% её площади было перекрыто свалами и наносами практически пустых пород, представленных продуктами разрушения вмещающих трубку гнейсов и осадками формации Калахари мощностью от первых до 120 м. Непосредственно на дневную поверхность кимберлиты выходят только в западной части трубки на площади около 115 тыс. м² [10–12].

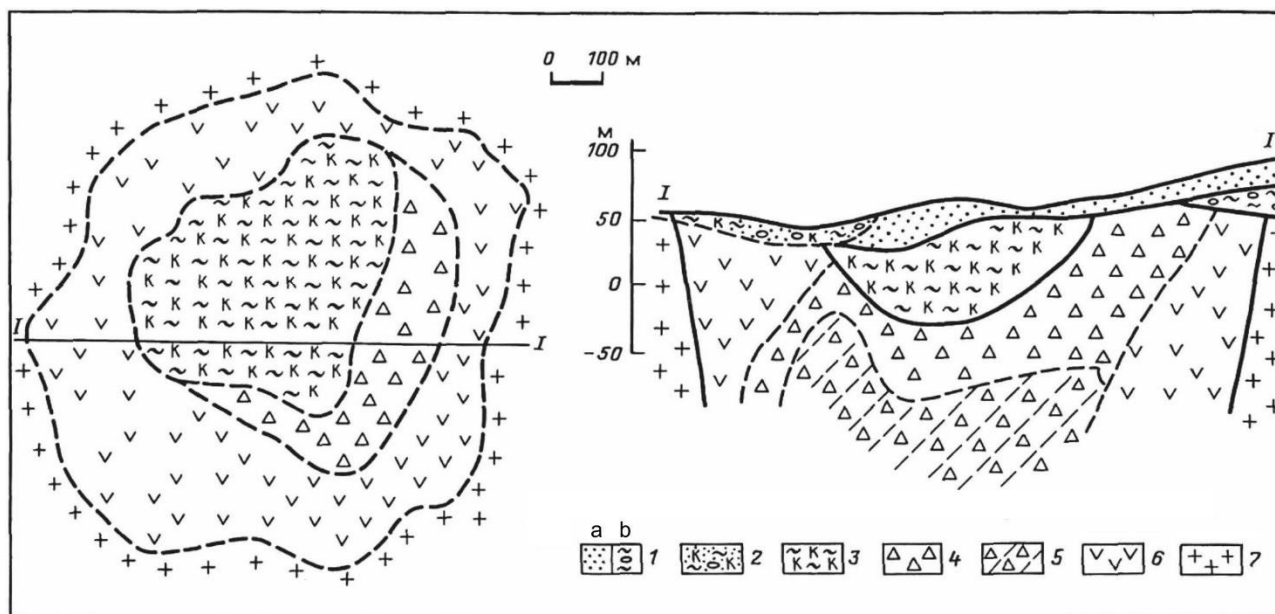


Рис. 1. Схематический план и разрез кимберлитовой трубки Катока: 1 – отложения группы Калахари: а – песчанистые, b – глинисто-песчанистые; 2 – алмазонасные аллювиально-делювиальные отложения; 3 – кратерные фации (аргиллиты и алевролиты); 4 – кимберлитовые брекчии; 5 – массивные интенсивно трещиноватые кимберлиты; 6 – порфировые кимберлиты; 7 – гнейсы.

[Fig. 1. Schematic diagram and section of a Catoca kimberlite pipe: 1 – sediments of the Kalahari group: a – sandy, b – clay-sandy; 2 – diamondiferous alluvial-deluvial deposits; 3 – crater facies (mudstones and siltstones); 4 – kimberlite breccias; 5 – massive intensely fractured kimberlites; 6 – porphyry kimberlites; 7 – gneisses.]

По данным геологоразведочных и добычных работ трубка Катока обладает сложным внутренним строением [13–16]. Её центральная часть площадью около 250 тыс. м² сложена вулканогенно-осадочными образованиями (ВОО), слагающими чашеподобное тело в кратерной части, простирающееся до глубины 270 м от дневной поверхности (рис. 2). По периферии в виде кольцевой зоны шириной от 150 до 250 м располага-

ются кимберлитовые туфы и туфобрекчии, а в южной части карьером вскрыты порфировые кимберлиты (ПК), тело которых может представлять фрагмент кимберлитового силла [17–19]. С глубиной, по мере перехода от кратерной части трубки к диатремовой, углы падения бортов рудного тела существенно выполаживаются (от 80 до 40 градусов). Начиная с глубины 250–270 м от поверхности под породами кратерной части

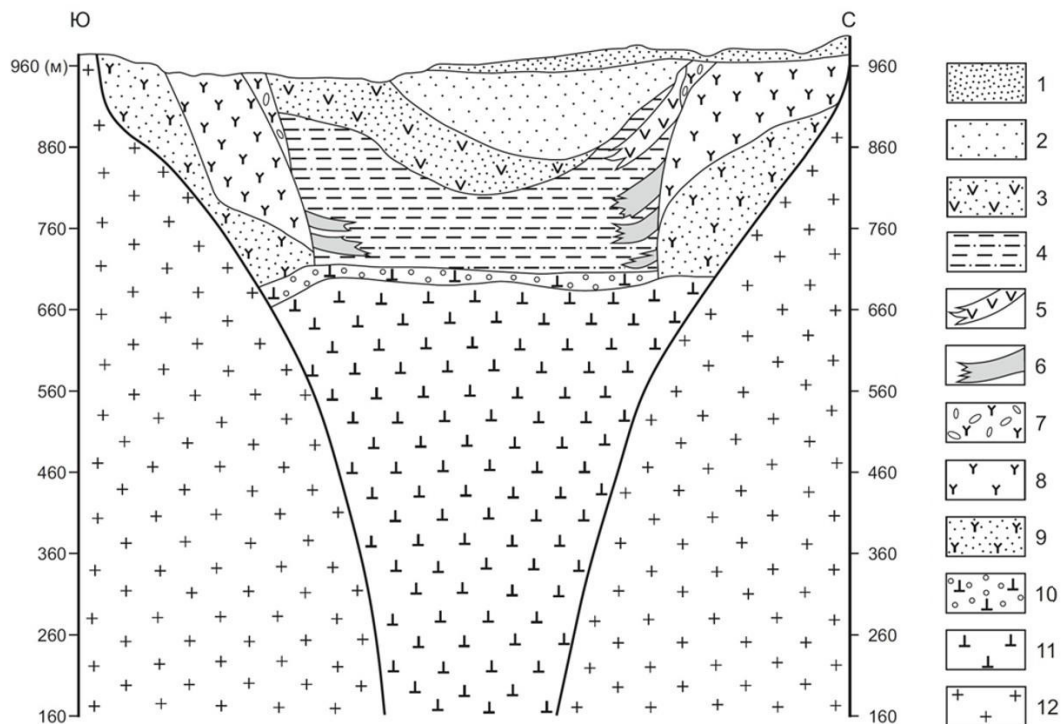


Рис. 2. Геологическое строение кимберлитовой трубки Катока: 1 – перекрывающие песчано-глинистые отложения группы Калахари; 2–9 – Породы кратерной фации: 2–5 – эпикластические отложения кратерной фации: 2 – песчаники; 3 – алевролиты, песчаники, конгломераты с примесью кимберлитового материала; 4 – переслаивание туфопесчаников, туфоалевролитов, туфогравеллитов с псепфитовыми кимберлитовыми туфами; 5–6 – оползни пирокластических пород на поверхность вулканогенно-осадочных пород; 7–9 – вулканокластические породы: 7 – кимберлитовые брекчии; 8 – туфы, ксенотуфы; 9 – кимберлитовые туфобрекчии, туфопесчаники, песчаники; 10 – ксенолитовый горизонт основания кратерной фации: туфопесчаники, туфоалевролиты, туфоаргиллиты, брекчии гнейсов с кимберлитовым цементом, глыбы гнейсов; 11 – породы диатремовой фации (автолитовые кимберлитовые брекчии; туффизитовые кимберлиты, порфиновые кимберлиты); 12 – кимберлитомещающие архейские гнейсы.

[**Fig. 2.** Geological structure of the Catoca kimberlite pipe: 1 – overlapping sandy–clay sediments of the Kalahari group; 2–9 – Cities of the crater facies: 2–5 – epiclastic deposits of the crater facies: 2 – sandstones; 3 – siltstones, sandstones, conglomerates mixed with kimberlite material; 4 – intercalation of tuff sandstones, tuff aleurolites, tuffogravellites with psephitic kimberlite tuffs; 5–6 – landslides of pyroclastic rocks on the surface of volcanic–sedimentary rocks; 7–9 – volcaniclastic rocks: 7 – kimberlite breccias; 8 – tuffs, xenotuffs; 9 – kimberlite tuff breccias, tuff sandstones, sandstones; 10 – xenolithic horizon of the base of the crater facies: tuff sandstones, tuff aleurolites, tuff argillites, breccias of gneisses with kimberlite cement, blocks of gneiss; 11 – rocks of the diatreme facies (autolithic kimberlite breccias; tuffizite kimberlites, porphyry kimberlites); 12 – kimberlite–bearing Archean gneisses.]

(центральная часть) вскрываются кимберлитовые породы жерловой фации – кимберлитовые брекчии (КБ) и автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ). Значительная часть трубки Катока была перекрыта мощным чехлом рыхлых неогеновых и неоген-палеогеновых песчаных отложений, а в долине руч. Катока – современными аллювиальными отложениями небольшой мощности. Непосредственно на вмещающих породах и кимберлитах залегают межформационные пески, а в низах разреза – слабо литифицированные песчаники. Нижняя часть такого разреза содержит рассеянную примесь кимберлитового материала в виде индикаторных минералов кимберлитов (ИМК). Мощность отложений резко увеличивается по мере приближения от периферии к центру трубки. На межформационных песках залегают мелко- и тонкозернистые пески формации Калахари. В основании слоя содержится 1–2-метровый маркирующий горизонт гравелитов кремнистых пород с суглинисто-супесчаным заполнителем, являющийся базальным для отложений данной формации. Мощность песков Калахари в контуре трубки и на

её склонах существенно не меняется и не превышает 20 м. Во вскрытом карьере и скважинами разрезе уверенно выделяются гетерогенные группы пород двух фаций кимберлитового вулканизма [20–22]: жерловой и кратерной, а также кимберлиты предположительно гипабиссальной (субвулканической) фации.

Результаты исследований и обсуждение

Кимберлиты на африканском континенте изучались многими исследователями (в том числе и российскими специалистами), причём нередко анализировались и коры выветривания (КВ). Несмотря на, в целом, неплохую изученность отдельных объектов, многие вопросы остаются актуальными и в настоящее время, так как для каждой диатремы свойственна характерная только для неё геологическая обстановка возникновения, становления и формирования как исходных, так и конечных продуктов выветривания стабильных в данных физико-химических условиях. Одной из важных задач прикладного характера в этих исследованиях является оценка степени обогащения КВ глубинными

минералами для вопросов прогнозирования и поисков новых месторождений алмазов как коренного, так и рассыпного типов. Процесс выветривания и возникновения новых твердых фаз, как известно [3, 14, 23, 24], обуславливается климатом, минеральным составом исходных пород и гидродинамическими условиями среды. Последние определяются, с одной стороны, климатом, с другой – рельефом и водопроницаемостью пород.

Для изучения геологического строения и вещественного состава КВ слабо эродированных кимберлитовых трубок Анголы была собрана коллекция штучных образцов и протоочных проб из верхних горизонтов трубки Катока и ряда других тел этого поля, а также вмещающих кимберлиты пород. Кимберлитовая трубка Катока выбрана в качестве эталонной для комплексного исследования в виду максимальной доступности ее изучения. Кроме этого она представляет собой уникальное во многих отношениях геологическое тело, как в качестве месторождения, так своеобразное по вещественному составу объекта. Он характеризуется широким петрографическим спектром пород и их интенсивной измененностью вторичными и корообразовательными процессами с почти полным разрушением реликтовых минералов и затушеванностью первичных текстурно-структурных признаков. И еще один признак из ряда уникальных – относительно хорошая сохранность одного из глубинных ИМК – хромдиопсида, обычно подвергающегося вторичным преобразованиям одним из первых (вслед за оливином).

В кимберлитовой трубке Катока выделяются два генетических типа пород: собственно кимберлиты с их производными и комплекс вулканогенно-осадочных образований (рис. 2). Все породы верхних горизонтов трубки претерпели вторичные изменения, в том числе и выветривание, которое интенсивно проходило благодаря возникновению вокруг нее серии трещин, а также образования в центральной ее части кратера (маара), в который сносился и материал дезинтегрированных вмещающих гранитогнейсовых пород.

Геологическое строение и особенности выветривания кимберлитов рассмотрены одновременно с аналогичными параметрами вмещающих пород. Это гнейсы полевошпат-пироксенового состава с прожилками и прослойками кварцитов и кварц-биотитовых сланцев различной степени выветрелости (от глинистых до монолитных прочных разновидностей). Общий контакт с кимберлитами резкий, с крутыми (до субвертикальных) стенками. Отметка поверхности гнейсов совпадает с отметками поверхности кимберлитов трубки и переход от одной поверхности к другой проходит без резких уступов. Гнейсы темно-серого цвета, полосчатые, массивные, различной степени трещиноватости, преимущественно прочные. Кровля гнейсов скального массива на западной оконечности трубки Катока в районе ручья находится на отметках 900 м, вдоль южного и северного контактов она поднимается до 940–960 м, в восточной оконечности диатремы – до 960–970 м. На всем протяжении выхода кимберлитов на них происходит оползание вмещающих их выветрелых гнейсов.

Гнейсы и кимберлиты перекрыты довольно мощным чехлом рыхлых неогеновых и неоген-палеогеновых, преимущественно песчаных, отложений группы Калахари, а в долине ручья – современными аллювиальными и техногенными отложениями небольшой мощности. Мощность песчаного чехла за пределами трубки составляет 20–45 м. В контуре трубки, на ее склонах мощность песков верхнего слоя существенно меняется и не превышает 20 м, зато межформационных песков (нижний слой) резко увеличивается по мере приближения от периферии к центру диатремы. Суммарная мощность их в центре достигает 130–140 м. Нижняя часть разреза межформационных песков содержит рассеянную примесь пикроильменитов, пиропов и убогое количество алмазов.

С целью определения глинистых минеральных фаз выветрелых гнейсов, посредством рентгенографического анализа изучались образцы из вмещающих пород в уступах карьера трубки Катока (рис. 3). Выветрелые гнейсы характеризуются различной цветовой гаммой и содержат монтмориллонит, сапонит, каолинит-монтмориллонитовые смешанослойные образования (КМСО), кварц и гематит. Рентгеноаморфная фаза по данным термического анализа представлена каолинитом и смектитами. При этом зеленовато-желтые и коричнево-желтые разновидности содержат больше монтмориллонита (10–25%) по сравнению с темно-коричнево-бурыми выветрелыми гранитогнейсами, где преобладает КМСО – до 80% .

КВ кимберлитовых вмещающих гнейсов имеет определенную зональность. Верхняя ее часть (10–25 м) представлена плотными, твердыми и тугопластичными суглинками, жирными на ощупь из-за обилия сапонитизированных прожилков кварцитов белого и голубого оттенков. Отчетливо наблюдается унаследованная текстура полосчатых перемятых крутопадающих гнейсов с обилием зеркал скольжения, покрытых жирным на ощупь, влажным глинистым налетом. Нижняя (10–15 м) часть глинисто-древянистого состава серовато-зеленого и зеленовато-серого цвета. Она водонасыщена, содержит много рыхлого кварцита диаметром 2–3, реже 5–6 мм. Порода, за исключением некоторых фрагментов, легко разрушается. Кварц-биотитовые сланцы выветрелые до супесей или тонкоплитчатого рухляка. С глубины 30–40 м преобладают выветрелые древесные, древесно-щебнистые породы с беспорядочной сетью трещин. Переходная зона к материнским слабо выветрелым разновидностям составляет обычно 3–5 м (зона начальной дезинтеграции).

В пределах развития КВ гнейсов в уступах карьера отмечается растрескивание стенок откосов с образованием промоин по трещинам. Сдвиги в гнейсах направлены в сторону карьера, с вовлечением в сдвиговые блоки прилегающей части кимберлитов, переувлажненной фильтрующимися с верхних горизонтов грунтовыми водами. Поток грунтовых вод, разгружаясь в сторону карьера, доходит до водоупорного кимберлита и вынужден перемещаться по контакту с гнейсами вниз по уступу, просачиваясь на поверхность. Выветривание



Рис. 3. Выветрелые кимберлитовмещающие гнейсы в юго-западной части карьера трубки Каток на горизонтах +970 (а) и +960 (б) м.

[Fig. 3. Weathered kimberlite-bearing gneisses in the southwestern part of the Catoca pipe quarry at +970 (a) and +960 (b) m.]

продуктов дезинтеграции гнейсов, попавших в кратер трубки, продолжалось здесь совместно с пирокластическим кимберлитовым материалом, в определенной вновь образованной физико-химической системе. Таковы, в целом, основные положения, являющиеся основанием изучения процессов, проходивших в кратере в прошлом и равновесных в современных условиях.

Характерной особенностью выветривания вмещающих образований и верхней диатремовой части кимберлитовых трубок, выполняющих кратерную постройку пород, является наличие в качестве главного породобразующего слоистого силиката сапонита – магнезиального филлосиликата и реликтовых алюмосиликатов, представленных полевыми шпатами. Подобная ассоциация встречается повсеместно в ксенотуфах и в вулканогенно-осадочных породах, содержащих кальцит и доломит (рис. 4) и в различной степени пропитанных гематитом. Красный цвет и содержание многих белых включений внешне придают породе сходство с латеритом, от которого она отличается минеральным составом. Практически все находящиеся в данных породах минералы являются неравновесными в процессе латеритизации. Известно, что латерит (по крайней мере, верхняя его часть) не должна содержать карбонатов, смектитов и полевых шпатов. Для нее не характерен и кварц, поскольку он если не полностью растворяется, то в значительной мере редуцирован. Латерит образуется в условиях выветривания [3, 23], когда вместе с основаниями выносятся из силикатов почти весь кремнезем. Лейкократовые силикаты и все другие алюмосодержащие минералы замещаются гидроксидами алюминия, даже в КВ кварцсодержащих пород (гранитах, гнейсах). Латеритное выветривание возможно при определенных климатических и гидродинамических условиях. Прежде всего, это жаркий климат, низкое нахождение зеркала трещинных вод, трещиноватость пород, обуславливающая их дренаж, и интенсивные осадки. Выпадающие дожди обычно слабокислые и соприкосновение их с силикатами вызывает гидролиз последних, который сводит-

ся к удалению оснований и замещению их водородом. Вместе с основаниями выносятся соответствующее количество кремнезема и удаляются все растворимые соли. В результате на месте исходных минералов остаются гидроокислы алюминия, титана и успевшее окислиться железо в виде окислов и гидроокислов. Происходит и удаление кремнезема из ранее образовавшихся каолинитов. В условиях обводненности пород свободные гидроокислы алюминия не образуются, а возникают вторичные силикаты (сиаллитное выветривание). При хорошем дренаже ниже зеркала грунтовых вод (т.е. в обводненной части), возникают каолиниты, при плохом – гидрослюды и гидрохлориты, смектиты. Из сказанного следует, что нижние обводненные зоны содержат каолинит и смектиты. Что касается карбонатов, то они могут в верхней части появиться только в результате изменения (даже сезонного) климата. В подобных условиях вместе с повышением щелочности грунтовых вод увеличивается и количество кремнекислоты, и возникают силикаты. Но это уже наложенный процесс, при котором поровые растворы подтягивают к дневной поверхности вместе с основаниями и кремнекислоту и на поверхности может возникнуть смектит.

Породы, выполняющие кратер диатремы, в значительной степени представлены продуктами выветривания гнейсов, включающими кварц, полевые шпаты и слюды. Отсутствует или находится в незначительном количестве каолинит. Это свидетельствует о том, что выветривание вмещающих пород происходило в условиях горного типа пенеплена, когда дезинтеграция пород (физическое выветривание) значительно опережало их химическое разложение. Образование кратера глубиной более 200 м привело к возникновению местного горного рельефа. На выходах вмещающих пород возникла дресва, которая селевыми потоками сносилась в кратерную полость. Все это происходило при плохом дренаже трещинных вод, обильных осадках и сезонных изменениях климата. Часть песчаников могла попасть в кратер в уже готовом виде.



0534/23



0534/18



0534/25



0534/19



0534/28



0534/21



0534/29

Рис. 4. Неизменённые кимберлиты нижних частей разреза трубки Катока.
[**Fig. 4.** The unchanged kimberlites of the lower parts of the Catoca pipe section.]

В отличие от базитов каолинизация кислых пород происходит во много раз медленнее [23, 25]. Причиной тому большая устойчивость кислых плагиоклазов и калишпатов, а также наличие кварца. Это приводит к образованию мощной зоны дресвы. Возможны также преобразования гидроксидов алюминия и каолинитов в самом кратере, где установилась щелочная среда (наличие карбонатов). Поскольку сапонит встречен и в КВ гнейсов, то возникает вопрос об обогащении системы магнием. В гнейсах до 30% биотита и при выветривании железо обособляется в виде оксидов или гидроксидов, а магний входит в новообразованные минералы.

Главные исходные породообразующие минералы, которыми сложены выполняющие кратерную постройку породы, можно разделить на кимберлитовые и ксеногенные. К первым относятся хромдиопсид и флогопит. Наличие кальцита предполагается по определению для некоторых образцов по реакции с HCl. Оливин здесь отсутствует. Из других ИМК обнаружены пиропы, пикроильмениты и шпинелиды. Терригенный материал из вмещающих пород представлен кварцем, плагиоклазом, пироксеном, калишпатов и биотитом. Присутствуют также амфиболы (роговая обманка и тремолит). Последний вместе с серпентином относится к автометаморфическим образованиям, а роговая обманка к чуждым кимберлитам породам. Все идентифицированные минералы в термальных условиях или в процессе химического выветривания подвергаются гидролизу. Сильные основания выщелачиваются, а их место занимает водород. Слоистые силикаты в большинстве случаев трансформируются в другие соединения со слоистой структурой. Остальные разрушаются полностью и с реликтов исходной структуры (кремнекислородных тетраэдров) формируются новые силикаты.

В целом же породы кимберлитовой трубки (рис. 5) сложены минералами: а) сугубо кимберлитовыми и их производными (пироксеном, флогопитом, серпентином, кальцитом, акцессориями); б) вмещающих гнейсов



Рис. 5. Выветрелые кимберлиты верхних частей разреза трубки Катока.
[Fig. 5. Weathered kimberlites of the upper parts of the Catoca pipe section.]

(кварц, полевые шпаты, пироксены, амфиболы, слюды); в) выветрелых и инфильтрационных образований (каолинитом, смектитом, кальцитом, доломитом, окислами и гидроокислами железа).

Некоторые минералы содержатся как во вмещающих породах, так и в кимберлитах. Гнейсы кристаллического фундамента кроме пироксенов, амфиболов, слюд нередко содержат еще гранат и ильменит. В сланцах присутствует биотит. Все перечисленные минералы могут находиться в заметном количестве, а иногда их достаточно много. Поэтому по наличию любого из них нельзя без микронзондового анализа определить состав исходной породы, из которой этот минерал попал в кимберлитовую трубку. Известно, что гидробиотит возникает, прежде всего, за счет изменения биотита, а вермикулит развивается по флогопиту. Наличие обоих минералов в измененных кимберлитовых породах свидетельствует о различных источниках их происхождения.

Ввиду общности фемических минералов для кимберлитов и вмещающих пород кристаллического фундамента репером может являться распределение более устойчивых по отношению к вторичным изменениям соединений – кварца, калиевого полевого шпата, кислых плагиоклазов, реликты которых встречаются повсеместно. Выполняющие кратерную постройку породы представляют собой смесь генетически несвязанных между собой минералов, которые после попадания на дневную поверхность выветривались, а продукты разрушения сносились в образовавшийся маар, заполнявшийся постепенно материалом КВ. Отмечаются невыветрелые минералы среди вулканогенно-осадочных образований трубки. Они также присутствуют в загрязненных кимберлитовых брекчиях, что свидетельствует о наличии дресвянистой КВ гнейсов, вещество которой было захвачено при взрывном извержении. Сложными для интерпретации являются преобразования смеси пород, накопившихся в кратерной полости. Прежде всего, важны преобразования *in situ* (без привноса растровыми компонентами со стороны), т.е. обычное изменение с образованием остаточной КВ, снабжавшей образовавшийся кратер материалом. Выветриванию предшествовали гидротермальные процессы, которые привели к серпентинизации оливина и частичному изменению пироксенов и слюд.

Есть основание предполагать, что климат до внедрения кимберлитовой магмы был близким к настоящему жаркому с контрастным посезонным изменением влажных и засушливых периодов. Об этом свидетельствует состав обвалившихся в кратер пород. Рельеф данной территории возвышенный, довольно расчлененный. В процессе выветривания создаются определенные физико-химические условия на каждом конкретном участке, которые контролируются вышеупомянутыми факторами. Среди них часто может меняться только климат. Последний определяет состав вторичных продуктов, которые могут существовать только в данной конкретной обстановке. Будучи временно конечными, они преобразуются в другие, ста-

бильные в иных условиях.

В верхней приповерхностной части кимберлитовой трубки происходит некоторое передвижение по вертикали зоны, обогащенной карбонатом кальция. Рентгенометрическим анализом из карбонатов установлено два минерала – кальцит и доломит (рис. 6). Можно предположить присутствие в описываемых образованиях арагонита, характерного для парагенетической ассоциации с доломитом вообще, и для апокимберлитов в частности.

По данным распределения минералов в верхней части кимберлитовой трубки наблюдаются определенные особенности: верхняя часть кимберлитового тела обогащена кварцем, полевыми шпатами, большим количеством сапонита. В нижней части преобладает серпентин, содержание которого находится в обратной зависимости от количества смектита. В верхней части диагномы на глубине примерно 300 м от поверхности в кимберлите встречена ассоциация слоистых минералов, отличающаяся от перекрывающих и подстилающих пород. Комплексное исследование тонкодисперсных выделений из этих пород позволили идентифицировать [26, 26] в смеси сапонит в ассоциации с лизардитом структурного типа А, ассоциирующим с небольшой примесью модификации 1Т. При этом модификация А свойственна полубеспорядочная, а для 1Т – более высокая степень совершенства структуры. В отдельных участках описываемых пород в процессе постмагматических и гипергенных преобразований образуется впервые идентифицированное нами [28–30] упорядоченное лизардит-сапонитовое смешанослойное образование (ЛССО). Исходя из высот сапонитового (~15 Å) и лизардитового (7,30 Å) слоёв, для идентифицированного смешанослойного образования установлена высота его кристаллической решётки (диагностического первого базального рефлекса) примерно в 22 Å. Установлена кристаллохимическая модель идентифицированного лизардит-сапонита, где по нормали к слоям упорядоченно чередуются 1:1 слои лизардита и 2:1 сапонита, разделённые межслоевыми промежутками разного типа. Обменные катионы (в основном Са) и молекулы H₂O в открытых межслоевых промежутках структуры минерала располагаются между двумя смежными тетраэдрическими сетками 1:1 и 2:1 слоёв. В межслоевом промежутке, образованном другой тетраэдрической сеткой 2:1 слоя и октаэдрической 1:1 слоя, действуют водородные связи между атомами Н внешних гидроксидов октаэдрической O_{баз} тетраэдрических сеток. Слои 2:1 полярны, их тетраэдрические сетки, примыкающие к октаэдрической и тетраэдрической сеткам 1:1 слоя, различаются по катионному составу – Si и Si, Al соответственно.

В нижней части описываемого разреза породы содержат преимущественно лизардит, образующийся за счёт преобразования оливина. В большей части этой толщи лизардит ассоциирует с сапонитом, являющимся продуктом последовательного изменения серпентина в условиях повышения кислотности среды, связанной с взаимодействием кимберлитового матери-

ала с вмещающими диатрему кислыми породами. В КВ отмечена ассоциация лизардита с упорядоченным ЛССО. В отличие от этого, в отложениях вулканогенно-осадочной толщи серпентин практически полностью исчезает и в дисперсной части присутствует сапонит с переменной примесью слюды. Такое распределения слоистых минералов позволяет утверждать, что исходным минералом указанной последовательности на постоливиновой стадии изменения кимберлитов диатремы является серпентин.

Сапонит и смектит возникли, по всей вероятности, вследствие силификации серпентина. Разница заключается в том, что на образование первого из них был израсходован весь (или почти весь) серпентин, поскольку среда была богата SiO_2 и Al_2O_3 (полевые шпаты и кварц), а смектит возник за счет самого серпентина, а также пироксенов и амфиболов, содержащих по сравнению с оливином и серпентином повышенное количество кремнезема. Значительную часть магnezии при этом отнял у системы в процессе своей кристаллизации и доломит. Смектит, по всей вероятности, представлен тоже магниальной разностью, которая по составу более всего отвечает стивенситу, у которого, в отличие от сапонита, отсутствует замещение в кремнекислородной сетке кремния алюминием, а некоторая нехватка октаэдрических катионов не может обеспечить только незначительный заряд слоя в целом и компенсация происходит за счет поглощенного кальция. Таким путем возникают смешанослойные образования, которые могут образоваться как за счет существующего серпентина, так и в процессе изменения клинопироксена, когда за его счет возникает смектит (вернее, смектито-подобные слюды: очевидно близкие к стивенситу) и серпентин.

Интерпретируя имеющиеся результаты исследования по керну опорных скважин, можно выделить зоны профиля КВ кимберлитовых пород. Из построенных по результатам рентгенографических исследований диаграмм следует (рис. 6), что наиболее разнообразной в минеральном отношении является вулканогенно-осадочная толща. Большинство минералов вулканогенно-осадочных пород в нижней части разреза не встречаются. К таковым относится кварц, полевые шпаты, вермикулит, амфибол, каолинит и гематит. Часть из этих и других минералов несомненно привнесены (в частности, полевые шпаты), часть возникла в процессе становления самой породы или дальнейшего ее изменения, включая выветривание. К несомненно привнесенным относятся полевые шпаты, кварц, значительная часть

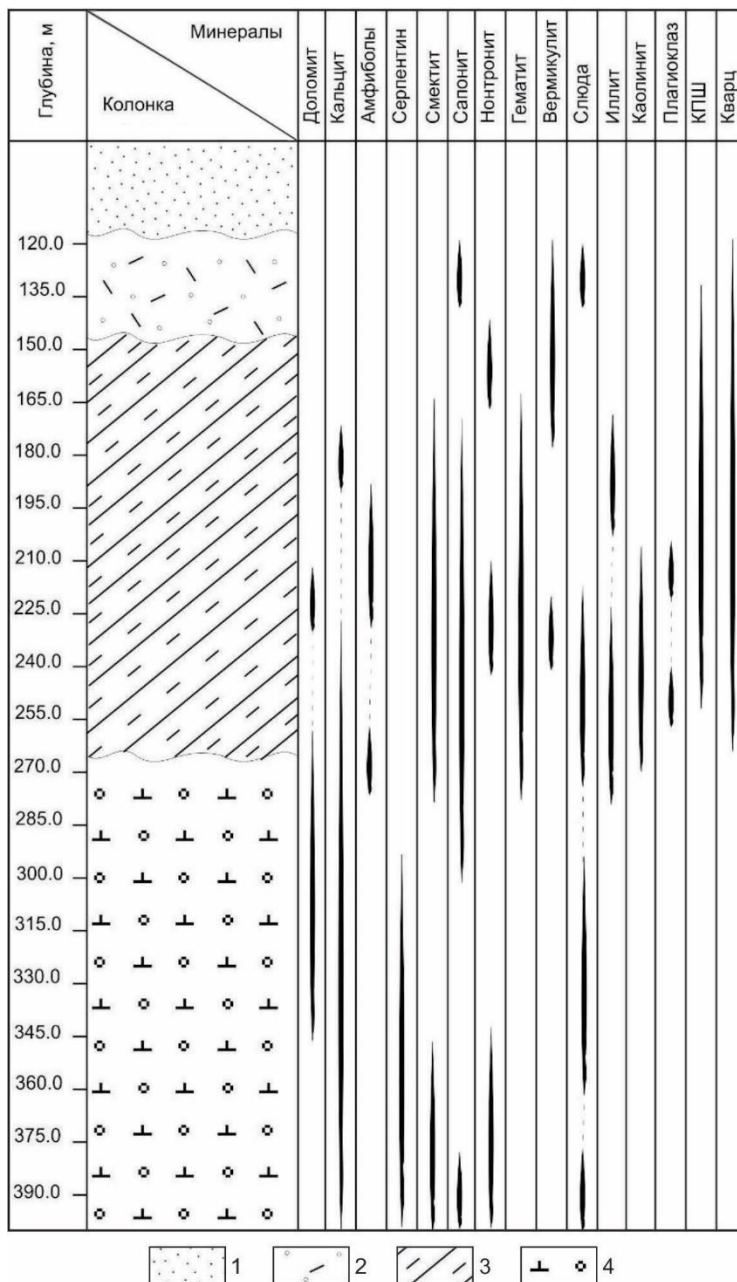


Рис. 6. Распределение вторичных минералов по опорному разрезу скважины пройденной в центральной части трубки Катока:

1 – межформационные пески; 2 – переотложенные взрыво-обломочные породы; 3 – вулканогенно-осадочные породы; 4 – кимберлитовые брекчии.

[Fig. 6. Distribution of secondary minerals along the reference section of a well drilled in the central part of the Catoca pipe: 1 – interformational sands; 2 – redeposited explosive-clastic rocks; 3 – volcanic-sedimentary rocks; 4 – kimberlite breccias.]

слюд, амфиболы. На месте образовался, по всей вероятности, гематит, и, возможно, каолинит и смектиты, а также карбонаты. Последние в тропиках, как известно, в зависимости от интенсивности осадков, могут перемещаться на определенное расстояние вниз или вверх. Серпентин в этих образованиях не установлен.

Почти полностью эти породы пропитаны пелитоморфным гематитом, а значит их следует отнести к КВ

вулканогенно-осадочных пород. В элловии произошла каолинизация полевых шпатов, вермикулитизация слюд и образование карбонатов в виде сети прожилков. Все эти минералы, так или иначе, не могут служить безальтернативным репером при выделении отдельных зон. Индикаторами могут служить карбонаты кальция, которые всегда чутко реагируют на рН среды. Кальцит (и арагонит) обычно не устойчивы при понижении рН, частом промывании пород, поскольку дождевая вода всегда слабокислая. Если приравнять всю КВ к таковой для ультраосновных пород, то при полном профиле согласно установившейся традиции должны быть зоны нонтронитов, которых в нашем случае практически нет, и зоны охр, нередко сопровождаемых кварцем. Присутствующие в КВ полевые шпаты, как и ассоциирующий с ними кварц, отнесены к терригенным образованиям, источником которых являются вмещающие диатрему гнейсы.

Анализ химического состава изучаемых образований показал существенные вариации концентрации всех петрогенных компонентов, которые довольно близки для других типов кимберлитовых пород (ПК, АКБ и КБ) при повышенной роли кремнезёмности вулканогенно-осадочных и эпикластических образований, которым свойственны также повышенные концентрации щёлочей (оксидов натрия и калия) при пониженной роли магнезии и железа. При переходе к собственно кимберлитовым образованиям диатремовой части (глубины ниже 250 м) количество оксида магния заметно увеличивается, а кремнезёма уменьшается при существенно проявленной контрастности содержаний [15]. Средние содержания элементов-примесей в различных генетических группах пород обнаруживают тенденцию постепенного уменьшения средних концентраций значений Cr, Ni, Co, Zn и Sr в направлении от кимберлитовых пород гипабиссальной и жерловой фаций к образованиям кратерной части. Никель ведёт себя как антагонист по отношению к другим элементам-примесям, постепенно увеличивая положительную корреляцию с кобальтом по направлению от кимберлитов к вулканогенно-осадочным образованиям. Отношение Ni/Co, характеризующее обычно глубинность образования исходных расплавов, имеет довольно высокие значения (в среднем выше 10, достигая в КБ 13,8).

Заключение

Таким образом, изученную КВ вулканогенно-осадочных пород можно разделить на бескарбонатную и карбонатную. Каолинизация полевых шпатов происходила, очевидно, на месте (*in situ*), о чем свидетельствует совместное нахождение его с плагиоклазом, по которому каолиниты в большинстве случаев образуются даже в условиях, неблагоприятных для развития данного процесса. Анализируя распределение минералов по разрезам кимберлитовых пород, можно отметить, что выветрелые кимберлитовые брекчии разделить на отдельные зоны по минеральному составу довольно затруднительно. Серпентин, который является

главным реликтовым минералом той части КВ, присутствует во всем данном интервале вплоть до глубины 400 м, ассоциируя со слюдой и кальцитом. Сметиты (сапонит и нонтронит) отсутствуют в верхней части выветрелых кимберлитов, что возможно связано с боковым подтоком трещинных вод, приведшим к образованию своего рода линейной КВ.

В отношении собственно кимберлитовой части диатремы можно утверждать, что вскрытые и изученные породы относятся к типичным образованиям КВ. Изученный профиль КВ можно разделить, исходя из состава и структуры исходных пород, на нижнюю и верхнюю зоны. Нижняя часть КВ, которая образовалась по АКБ, отнесена к зоне дезинтеграции (гидролиз здесь уменьшается, т.к. у серпентина больше водорода, чем у смектитов). Верхняя зона разделена на бескарбонатную и карбонатную. В целом, профиль КВ на кимберлитах северо-востока Анголы по своему составу, структуре и текстуре является характерным для пород этого семейства. Типовые новообразования представлены серпентином, образовавшимся вследствие гидролиза силикатов (в первую очередь оливина) в гидротермальных условиях. Все породы слабоэродированных трубок претерпели интенсивные вторичные изменения, включая выветривание, которое интенсивно проходило благодаря возникновению серии трещин, а также образованию кратерной впадины, в которую сносился и материал дезинтегрированных вмещающих гнейсовых пород. Разрушение последних продолжалось в маапе совместно с пирокластическим материалом. В результате в верхней части кратера возникла перемещенная КВ за счет самого же элловия.

При гипергенно-метасоматическом изменении кимберлитов региона можно отметить два процесса. Первый – поэтапное превращение оливина в высокотемпературный, а затем и низкотемпературный серпентин. Второй – деградация серпентина с одновременным возникновением серии разбухающих минералов, начиная с сапонита через ряд промежуточных метастабильных смешанослойных образований. Из них впервые идентифицированная упорядоченная разновидность лизардит-сапонита является относительно устойчивой по сравнению с другими упорядоченными смешанослойными фазами триоктаэдрического типа (типа хлорит-сапонитов и хлорит-вермикулитов). Возникновение упорядоченного ЛССО, по нашему мнению, происходило в закрытой системе при низких термобарических параметрах среды и медленно протекающем процессе деструкции первичных и синтезе вторичных минералов. Изолированность системы минералообразования определяла возможность сохранения в ней восстановительных условий, что сопровождалось перераспределением химических элементов между гипогенными минералами, поровыми растворами и гипергенными новообразованиями. Относительно низкие значения давления и температуры в зоне возникновения лизардит-сапонита обусловили значительное содержание в его структуре разбухающих слоёв. Невысокая динамика массопереноса вещества в системе

минералообразования способствовала тенденции развития упорядоченного чередования неразбухающих и разбухающих слоёв в структуре идентифицированного смешанослойного минерала. Одновременно с изменением кимберлитов и последовательным преобразованием минералов происходит синтез ряда Fe-содержащих фаз. Начиная с наиболее ранней стадии изменения оливина, ильменита, магнетита по минералам образуются плёночки пылевидных скоплений рудных новообразований, рассеянным также по основной массе пород, придавая образованиям различной интенсивности грязно-бурых цветовой облик.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваганов В. И. Алмазные месторождения России и Мира (основы прогнозирования). М.: Геоинформмарк. 2000. 370 с.
2. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир. 1983. 300 с.
3. 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. Воронеж: ВГУ. 2013. 99 с.
4. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Шевырёв Л. Т. Историческая минерагения. В 3-х томах. Том 1. Введение в историческую минерагению. Воронеж: ВГУ. 2005. 587 с; Том 2. Историческая минерагения древних платформ. Воронеж: ВГУ. 2007. 570 с. Том 3. Историческая минерагения подвижных суперпоясов. Воронеж: ВГУ. 622 с.
5. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов Мира. М.: Недра. 1998. 555 с.
6. Зинченко В. Н. Кимберлиты северо-востока Анголы. Геологическое строение, алмазоносность, алмазы. Saarbrücken, Palmarium Academic Publ. 2014. 240 с.
7. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Шевырёв Л. Т. Тектоника и алмазоносный магматизм. Воронеж: ВГУ. 2004. 426 с.
8. Зуев В. М., Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Маккенда А. Слабоэродированные кимберлитовые трубки Анголы // *Геология и геофизика*. 1988. №3. С. 56–62.
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. 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.
11. Носыко С. Ф., Ротман А. Я. Специфика кимберлитовых проявлений и перспективы алмазоносности северо-востока Анголы // Сб.: Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: ВГУ. 2003. С. 102–108.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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: прогнозно-ресурсные, методические и инновационно-технологические направления их повышения. Мирный: МГТ. 2018. С. 191–195.
17. 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. Мирный: МГТ. 2018. С. 185–190.
18. 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: прогнозно-ресурсные, методические и инновационно-технологические направления их повышения. Мирный: МГТ. 2018. С.72–77.
19. 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.
20. Стегницкий Ю. Б. Глинистые минералы коры выветривания кимберлитовых пород и возможности их использования при поисках и разведке коренных месторождений алмазов // Сб.: Вопросы методики прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых (применительно к объектам геологоразведочных работ АК «АЛРОСА»). Якутск: ЯФ СО РАН. 2004. С.167–173.
21. Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Ротман А. Я., Кузнецова Л. Г., Минин В. А., Холодова Л. Д. Сравнительная характеристика постамагматического изменения кимберлитов Якутии и Африки // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2008. №1. С.34–46.
22. Иванов А. С., Феликс Ж. Т., Стегницкий Ю. Б., Роговой В. В. Оценка потенциальной алмазоносности кимберлитовых пород трубки Луеле по составам пиропов // Сб.: Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические и инновационно-технологические направления их повышения. Мирный: МГТ. 2018. С. 92–96.
23. Зинчук Н. Н. Постамагматические минералы кимберлитов. М.: Недра. 2000. 538 с.
24. 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.

25. Савко А. Д., Шевырёв Л. Т., Зинчук Н. Н. Эпохи мощного корообразования и алмазосного магматизма в истории Земли. Воронеж: ВГУ. 1999. 102 с.

26. Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Закономерности изменения химического состава пород в зоне гипергенеза // *Гипергенез и рудообразование*. М.: Наука. 1988. С. 15–28.

27. 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.

28. 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 РАН*. 2002. Т. 382. №3. С. 374–378.

29. 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.

30. Зинчук Н. Н., Жухлистов А. П., Стегницкий Ю. Б., Котельников Д. Д. Лизардит и сапонит в кимберлитовой трубке Катока (Западная Африка) // *ЗРМО*. 2006. Ч. СXXXV. №1. С. 91–102.

PALEONTOLOGY, LITHOLOGY, STRATIGRAPHY

UDC 551.311.231:553.08

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2856>

Received: 17.02.2020

Accepted: 01.06.2020

Published online: 30.06.2020

ISSN 1609-0691

Features of the weathering crust of the kimberlites of north-east Angola

© 2020 N. N. Zinchuk✉, Yu. B. Stegnitskiy

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

Abstract

Introduction: The results of a comprehensive study of the geological structure and material composition of the weathering crust of the kimberlites in north-east Angola are presented. An important applied problem is the assessment of the degree of enrichment of the weathering crust by deep minerals for forecasting and searching for new diamond deposits of both primary and placer types.

Methodology: The Catoca kimberlite pipe, characterized not only by an insignificant erosional section and preservation of the crater structure, but also by a wide petrographic spectrum of rocks and their intense post-magmatic and hypergenic variation, was chosen as a reference object. The collection of ore samples and flow samples from the upper horizons of the Catoca pipe and a number of other bodies of this field, as well as rocks containing kimberlites, were collected for the study of the geological structure and material composition of weathering crusts of weakly eroded Angola kimberlite pipes.

Results and discussion: Two genetic types of rocks were distinguished in the Catoca kimberlite pipe: kimberlites with their derivatives and a complex of volcanic-sedimentary formations filling the upper parts of the crater of diatreme. In general, the profile of the weathering crust is divided into two parts: lower and upper. The lower part (disintegration zone) is represented by slightly altered autolithic kimberlite breccias, fractured and partially ocherized. The upper, the most hypergene-altered zone, in turn, is divided into carbonate and non-carbonate parts.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Conclusions: Two processes of changes in the kimberlite rocks of the region were revealed. The first process is the phased conversion of olivine to high-temperature, then low-temperature serpentine. The second process is the degradation of serpentine with the simultaneous emergence of a series of swellable minerals, starting with saponite through a series of intermediate metastable mixed-layer formations, out of which the ordered variety of lyzardite-saponite, identified for the first time, was relatively more stable compared to other ordered mixed-layer phases of the trioctahedral type. This finding emphasizes the specific conditions of crust formation of the weathering kimberlites of the African region.

Keywords: weathering crust, kimberlites, volcanic-sedimentary formations, African continent.

For citation: Zinchuk N. N., Stegnitskiy Yu. B. Features of the weathering crust of kimberlites of north-east Angola. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, No. 2, pp. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2856>

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

REFERENCES

- Vaganov V. I. *Almaznye mestorozhdeniya Rossii i Mira (osnovy prognozirovaniya)*. [Diamond deposits of Russia and the World (the basis of forecasting)]. Moscow: Geoinformmark publ., 2000, 370 p. (In Russ.).
- Dawson J. *Kimberlity i ksenolity v nikh*. [Kimberlites and xenoliths inside them]. Moscow: Mir publ., 1983, 300 p. (In Russ.).
- 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.).
- 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.).
- Kharkiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. *Korennye mestorozhdeniya almazov Mira*. [Indigenous deposits of diamonds of the World]. Moscow, Nedra publ., 1998, 555 p. (In Russ.).
- Zinchenko V. N. Kimberlites of the northeast Angola. *Geological structure, diamond content, diamonds*. Saarbrücken, Palmarium Academic Publ., 2014, 240 c.
- Zinchuk N. N., Savko A. D., Shevyrev L. T. *Tektonika i almazonosnyi magmatizm*. [Tectonics and diamondiferous magmatism]. Voronezh, VSU publ., 2004, 426 p. (In Russ.).
- Zuev V. M., Kharkiv A. D., Zinchuk N. N., Mackenda A. Slaboerodirovannyye kimberlitovyye trubki Angoly. [Weakly eroded kimberlite pipes of Angola]. *Geology and Geophysics*, 1988, no. 3, pp. 56–62. (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)]. *Sb.: Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy AK «ALROSA»: sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya* [Sat.: Geological aspects of the mineral resources base of AK ALROSA: current status, prospects, solutions]. Mirny, MGT, 2003, pp.152–169. (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 geology and metallogeny*, 2004, № 22, pp. 116–123. (In Russ.).
- Nosyko S. F., Rotman A. Ya. Geologiya i veshchestvennyi sostav kimberlitovoi trubki Katoka (Angola). [The specifics of kimberlite occurrences and the diamond potential of the north-east of Angola]. *Sb.: Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na poroge XXI veka* [Sat.: Problems of forecasting, prospecting and studying of mineral deposits on the threshold of the 21st century], Voronezh, VSU, 2003, pp. 102–108. (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)]. *Sb.: Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na poroge XXI veka* [Sat.: Problems of forecasting, prospecting and studying of mineral deposits on the threshold of the 21st century]. Voronezh, VSU, 2003, pp. 111–121. (In Russ.).
- Rotman A. Ya., Zinchuk N. N., Nosyko S. F., Shimuni Zh. Osnovnyye geneticheskie tipy almaznykh mestorozhdenii severo-vostoka Angoly. [The main genetic types of diamond deposits in the northeast Angola]. *Sb.: Geologiya almazov – nastoyashchee i budushchee (geologi k 50-letnemu yubileyu g.Mirny i almazodobyvayushchei promyshlennosti Rossii)*. [Sat.: 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, VSU, 2005, pp. 594–609. (In Russ.).
- 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)]. *Sb.: Prirodnye i tekhnogennyye rossypi. Problemy. Resheniya. Trudy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Sat.: Natural and man-made placers. The problems. The solutions. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference]. Simferopol, 2007, pp. 160–167. (In Russ.).
- Rotman A. Ya., Zinchuk N. N., Aschepkov I. V., Egorov K. N. Kimberlitovyy magmatizm i voprosy almazonosnosti [Kimberlite magmatism and diamond bearing issues]. *Sb.: Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na poroge XXI veka* [Sat.: Problems of forecasting, prospecting and studying of mineral deposits on the threshold of the 21st century]. Voronezh, VSU, 2003, pp. 856–891. (In Russ.).
- 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]. *Sb.: Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskie i innovatsionno-tehnologicheskie napravleniya ikh povysheniya*. [Sat.: Efficiency of exploration works on diamonds: forecast-resource, methodological and innovative-technological directions of their increase]. Mirny, MGT, 2018, pp. 191–195. (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]. *Sb.: Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy:*

- prognozno-resursnyye, metodicheskie i innovatsionno-tehnologicheskie napravleniya ikh povysheniya. [Sat.: Efficiency of exploration works on diamonds: forecast-resource, methodological and innovative-technological directions of their increase], Mirny, MGT, 2018, pp. 185–190. (In Russ.).
18. Gulevskaya N. S., Nikolaeva E. V., Stegnitskiy Yu. B., Romanova E. A. Mineralogicheskie osobennosti kimberlitovykh tel yugo-zapadnoi chasti amazonosnogo raiona Lunda, Angola. [Mineralogical features of kimberlite bodies in the southwestern part of diamondiferous region of Lunda, Angola]. *Sb.: Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskie i innovatsionno-tehnologicheskie napravleniya ikh povysheniya*. [Sat.: Efficiency of exploration works on diamonds: forecast-resource, methodological and innovative-technological directions of their increase], Mirny, MGT, 2018, pp. 72–77. (In Russ.).
19. 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.).
20. Stegnitskiy Yu. B. Glimistyie mineraly kory vyvetrivaniya kimberlitovykh porod i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya pri poiskakh i razvedke korennykh mestorozhdenii amazov. [Clay minerals of the weathering crust of kimberlite rocks and the possibility of their use in prospecting and exploration of primary diamond deposits]. *Sb.: Voprosy metodiki prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh (primenitel'no k ob'ektam geologorazvedochnykh rabot AK «ALROSA»)*. [Sat.: Issues of the methodology of forecasting and prospecting for mineral deposits (in relation to the objects of geological exploration of AK ALROSA)]. Yakutsk, NF SB RAS, 2004, pp. 167–173. (In Russ.).
21. 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.).
22. Ivanov A. S., Felix J. T., Stegnitskiy Yu. B., Rogovoy V. V. Otsenka potentsial'noi amazonosnosti kimberlitovykh porod trubki Luele po sostavam piprov. [Evaluation of the potential diamond content of kimberlite rocks of the Luele pipe according to pyrope compositions]. *Sb.: Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskie i innovatsionno-tehnologicheskie napravleniya ikh povysheniya*. [Sat.: Efficiency of geological exploration for diamonds: resource-forecasting, methodological and innovative-technological directions for their increase]. Mirny, MGT, 2018, pp. 92–96. (In Russ.).
23. Zinchuk N. N. *Postmagmaticheskie mineraly kimberlitov*. [Post-magmatic minerals of kimberlite]. Moscow, Nedra publ., 2000, 538 p. (In Russ.).
24. 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]. *Sb.: Geologiya amazov - nastoyashchee i budushchee (geologi k 50-letnemu yubileyu g.Mirnyi i almazodobyvayushchei promyshlennosti Rossii*. [Sat.: 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.).
25. Savko A. D., Shevyrev L. T., Zinchuk N. N. *Epokhi moshchnogo koroobrazovaniya i amazonosnogo magmatizma v istorii Zemli*. [Epochs of powerful crust formation and kimberlite magmatism in the Earth history]. Voronezh, VSU, 1999, 102 p. (In Russ.).
26. Hitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D. Zakonomernosti izmeneniya khimicheskogo sostava porod v zone gipergeneza. [Regularities of the rocks' chemical composition alteration (change) in the zone of hypergenesis]. *Gipergenez i rudoobrazovanie*. [Hypergenesis and ore formation]. Moscow, Science publ., 1988, pp. 15–28. (In Russ.).
27. 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)]. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2005, no. 2, pp. 16–23. (In Russ.).
28. Gorshkov A. I., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D., Shlykov V. G., Zhukhlistov A. P., Mokhov A. V., Sivtsov A. V. Novyi uporyadochennyi smeshanosloiny mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Yuzhnoi Afriki [New ordered mixed-layer mineral lysardite-saponite from kimberlites of South Africa]. *DAN = Proceedings of the Academy of Sciences*, 2002, vol. 382, no. 3, pp. 374–378. (In Russ.).
29. Egorov K. N., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya., Nosyko S. F., Soneeva L. A. Geokhimiya (ICP-MS) i mantiyni 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.).
30. Zinchuk N. N., Zhukhlistov A. P., Stegnitskiy Yu. B., Kotelnikov D. D. Lizardit i saponit v kimberlitovoi trubke Katoka (Zapadnaya Afrika) [Lizardite and saponite in the Catoca kimberlite pipe (West Africa)]. *3PMO*, 2006, Ч. XXXV, no. 1, pp. 91–102.

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>

Стегницкий Юрий Богданович – 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>

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; E-mail: ysteg@mail.ru
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2047-4946>

All authors have read and approved the final manuscript.