

УДК 549.2

Т.В. Посухова, Ф.Н. Колуме

АЛМАЗЫ ИЗ РОССЫПЕЙ ЗАПАДНОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ — ПРОБЛЕМА ПЕРВОИСТОЧНИКОВ

Изучены алмазы и их спутники из кимберлитов Койду, россыпи на р. Бафит в Сьерра-Леоне и россыпи Чикапа в Демократической Республике Конго. Минералы из россыпей характеризуются хорошей сохранностью и не несут следов длительной транспортировки. В россыпях найдены гранат, ильменит и циркон, но по особенностям химического состава они не отвечают минералам из кимберлитов. Алмазы из россыпей мантийные, однако прямых аналогов среди известных кимберлитовых и лампроитовых трубок у них нет.

Ключевые слова: месторождения алмаза, спектроскопия, россыпи, кимберлиты.

Diamonds and accompanying minerals from the Bafit placer, Koidu kimberlites and Chikapa placers have been examined. Diamonds and accompanying minerals from the placers have not morphological features which is typical for the long transportation. Garnets, zircons and ilmenites are established, but their chemical compositions are not similar to kimberlitic one. Comparison of diamonds and accompanying minerals from the Bafit and Chikapa placers with the diamonds from different kimberlitic pipes show, that they have not analogy in the African and Yakutic kimberlitic sources.

Key words: diamond deposit, spectroscopy, placers, kimberlites.

Введение. Проблема поисков коренных источников для россыпей — одна из основных задач прикладной минералогии. Существует множество россыпных месторождений алмазов, для которых коренные источники пока не установлены. Типичными примерами таких районов на территории Африки являются Сьерра-Леоне и Демократическая Республика Конго (ДРК). Мы обобщили результаты исследования специально подобранных коллекций алмаза и сопутствующих минералов из россыпей по р. Бафит-Нгоку в Сьерра-Леоне и по рекам Касай и Лубембе в ДРК. Коренные источники этих россыпей неизвестны. Цель исследований — выявление и изучение типоморфизма алмазов и их спутников, сравнение их с минералами из коренных источников и реконструкция генезиса алмазов. Алмазы из музейной коллекции россыпей по р. Бафит-Нгоку изучались только неразрушающими методами. Для алмазов из россыпи Чикапа были приготовлены плоскопараллельные пластины, что расширило диапазон применяемых методик.

Геологическая характеристика россыпей. Месторождения алмазов в Сьерра-Леоне расположены на Либерийском щите. Россыпи богаты (330 кар./м³). Несмотря на открытие кимберлитов Койду, Сефалу (на востоке) и Тонго (на юге), вопрос об источниках россыпей в северной и восточной частях долины р. Сева остается открытым [Ваганов, 2000]. Нами изучались алмазы и сопутствующие минералы из аллювиальных россыпей по р. Бафит-Нгоку (рис. 1, а). Бассейн водосбора включает отложения биримской и таркбайской серий протерозоя.

В ДРК известны два основных района алмазности (рис. 1, б): в Касаи — россыпи, в Бакванге — россыпные (Мбужи-Майи) и коренные (Тишикаса, Тишбуа) месторождения. Алмазы Бакванги низкого качества, зональные [Амтауэр и др., 1995]. В россыпях Касаи около г. Чикапа добывают алмазы высокого качества (0,9 кар./м³). Добыча проводится из конгломератов позднемелового возраста и слоев гравия, расположенных на террасах и по дну притоков р. Касай и в бассейне р. Лулуа-Луэбо. Бассейн водосбора включает толщи Луалаба юрского возраста и Кванго мелового возраста. Предполагают, что коренные источники россыпей находятся на территории Анголы [Ваганов, 2000].

Минералы — спутники алмаза из россыпей. Было проведено визуальное и оптическое изучение минералов из шлихов. Их диагностика подтверждена измерением плотности, рентгенометрически и методами ИК-спектроскопии. В шлихах россыпи по р. Бафит-Нгоку (рис. 2, а) присутствуют минералы двух сортов: минералы, типичные для вмещающих метаморфических пород (кварц, циркон, гранат, корунд, магнетит, гематит, эпидот, апатит), и минералы, характерные для кимберлитов (гранат, хромит, ильменит, циркон). Так как генетическая принадлежность полигенных минералов может быть определена по их химическому составу, мы провели сравнение минералов из шлихов и минералов из кимберлитов Койду.

Гранат, 44 зерна неправильной формы, от светло-красного до темно-красного цвета, размеры 5–20 мм. Сравнение наших данных (рис. 2) с литературными [Харькив и др., 1995] показало, что в шлихе нет зе-

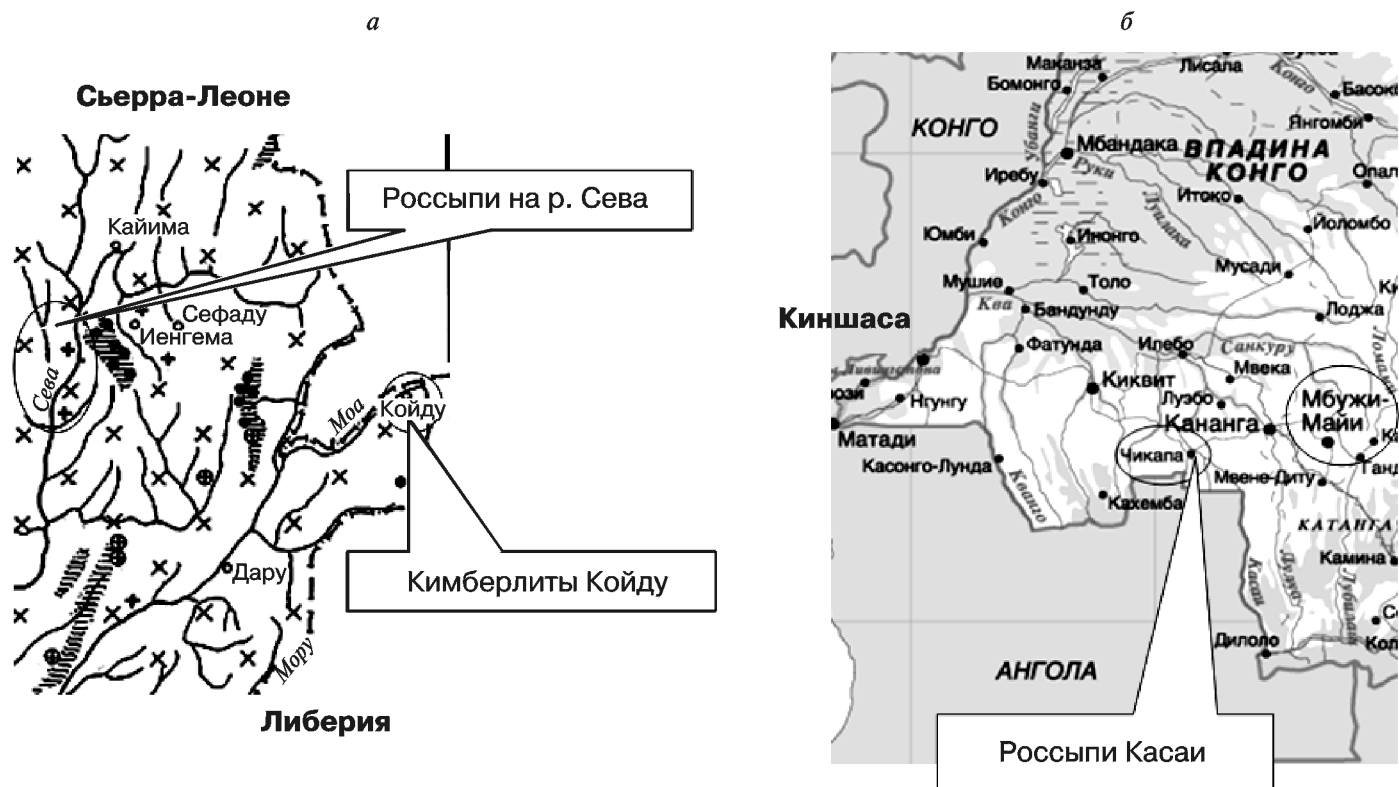


Рис. 1. Карты Сьерра-Леоне (а) и Демократической Республики Конго (б) с выделенными контурами алмазоносных площадей

рен, схожих по составу с гранатами из алмазоносных ассоциаций.

Циркон, 5 зерен размером 2–5 мм, плохо окатанных. Результаты наших исследований показывают, что цирконы из россыпи не связаны с кимберлитами, которые отличаются от цирконов других генетических типов (из гнейсов) по спектру редких земель и отношению Zr/Hf [Харьков и др., 1995].

Корунд, 10 зерен размером от 3 до 5 мм, зерна плохо окатаны, скорее всего, это продукт дезинтеграции вмещающих метаморфических пород, хотя нельзя исключить и другой генезис. Корунд установлен в качестве включения в алмазах [Буланова и др., 1993; Hutchison et al., 2004], но эти находки редки, и корунд из алмазоносных пород изучен мало.

Хромит, одно зерно размером 4 мм, очень плохо окатано. Хромиты из включений в алмазах содержат 61–66% Cr₂O₃ и 3–8% Al₂O₃, содержание титана не превышает 0,7–0,8% [Харьков и др., 1995]. Исследованное нами зерно этим критериям не отвечает.

Ильменит — наиболее распространенный минерал в пробах. Были изучены морфология, магнитные свойства и состав ильменита из кимберлитов Койду (39 зерен) и р. Бафит-Нгоку (97 зерен). Зерна ильменита из кимберлитов имеют размеры 2–10 мм, они не окатаны, имеют угловатую форму, покрыты рубашкой лейкоксона. Ильмениты из россыпи плоские, изометричные и угловатые, размер 1–5 мм, имеют отдельность. Выделено 5 групп ильменита, различающихся по величине магнитной восприимчивости: 1) от 0 до 0,06; 2) от 0,10 до 0,38; 3) от 0,38 до 0,80;

4) от 1,68 до 3,32; 5) от 5,37 до 13,22. В кимберлитах ильменит ферримагнитный при комнатной температуре, содержит изоморфную примесь Fe₂O₃. Методом электронно-зондового анализа выявлена фазовая неоднородность образцов из кимберлитов Койду, похожая на таковую у ильменита из кимберлитов трубки Зимняя (Якутия). Ильмениты из шлихов гомогенны и имеют другой состав (рис. 2). Они обогащены марганцем, что характерно для ильменитов из эклогитов [Гаранин и др., 1991]. Таким образом, ильмениты из шлихов и из кимберлитов различаются по химическому составу и физическим свойствам, т.е. минералы из россыпей Бафит-Нгоку не были вынесены из известных кимберлитовых тел и имеют другой коренной источник.

Минералы из алмазоносных конгломератов Чикапа, представленные в тяжелой фракции, имеют размер 1–3 мм. Были изучены и рентгенометрическими методами подтверждены следующие спутники алмазов: *магнетит* и его производные (*мартит* и *гематит*), последние преобладают; *ставролит* встречается часто; *ильменит* (слабомагнитный) представлен окатанными зернами; *гранат* встречается часто, зерна окатанные (3–6 мм), разноокрашенные; *циркон* встречается редко. Распределение алмазов и минералов-спутников равномерное, что плохо согласуется с концепцией о перенесении алмазов на значительное расстояние.

Минералогическая характеристика алмазов. Из россыпи Бафит-Нгоку изучена коллекция алмазов мелкой размерности (<0,5 кар.) технического каче-

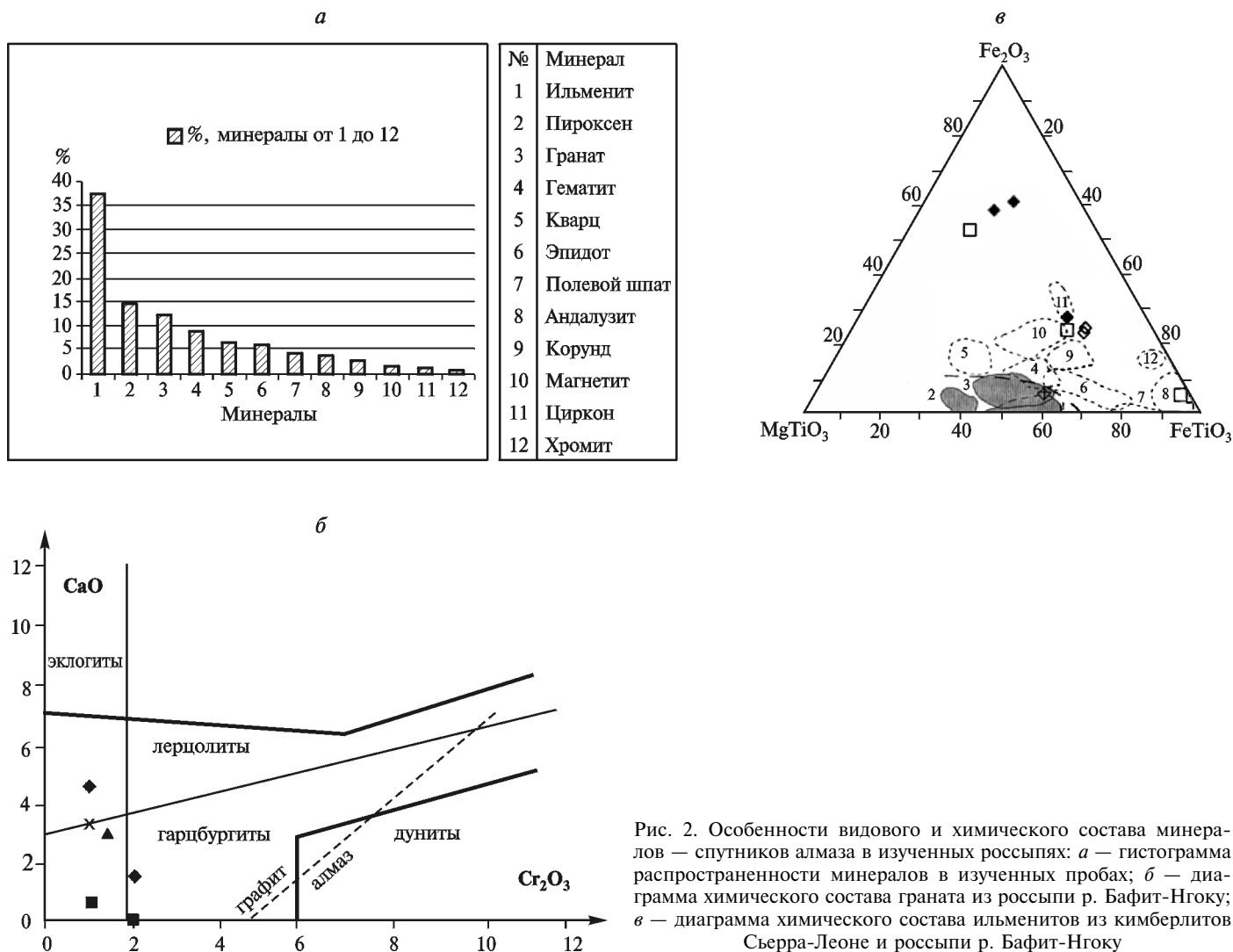


Рис. 2. Особенности видового и химического состава минералов — спутников алмаза в изученных россыпях: *a* — гистограмма распространности минералов в изученных пробах; *б* — диаграмма химического состава граната из россыпи р. Бафит-Нгоку; *в* — диаграмма химического состава ильменитов из кимберлитов Сьерра-Леоне и россыпи р. Бафит-Нгоку

ства. Кристаллы ювелирного качества в коллекцию не были включены (рис. 3, *a*). По данным местных геологов, в этой россыпи найдены и крупные кристаллы (>1 кар.). Таким образом, гранулометрический анализ показывает слабую сортировку зерен, которая типична для континентальных ореолов ближнего сноса. По форме (рис. 3, *б*) преобладают осколки (64,5%). Количество округлых алмазов небольшое (4,5%). Отмечено значительное количество сростков (15,5%). Среди окрашенных алмазов (рис. 3, *в*) преобладают коричневые (24,5%), чистых бесцветных алмазов 31%. Значительную долю составляют кристаллы в оболочке — темно-зеленые сверху и бесцветные внутри. В кристаллах много включений, трещин и других структурных неоднородностей, что может свидетельствовать о небольшой дальности транспортировки.

Фотолюминесценция (УФС, 365 нм) у большинства кристаллов отсутствует (рис. 3, *з*). Среди люминесцирующих кристаллов наибольшее количество светится голубым и синим цветом. Голубая люминесценция обычна для алмазов из кимберлитов и вызвана сложными полиатомными центрами азота

типа N3 [Вечерин и др., 1997]. Розовая люминесценция, которая обусловлена центрами N-V, редка. Установлена белая люминесценция (9%), которая ранее наблюдалась в центральных частях крупных зонально-секториальных кристаллов [Бескрованов, 1992]. Важная особенность изученных кристаллов — изменение цвета люминесценции центральных зон с оранжевого на желто-зеленый при раскалывании алмазов на воздухе. Можно предположить, что это результат окисления каких-то включений, которыми богаты эти алмазы.

Было проведено разделение алмазов по типам в соответствии с классификацией Ю.Л. Орлова (1984). Основу коллекции составляют кристаллы *IV разновидности*, т.е. алмазы в оболочках, с кубическими формами роста. Они не прозрачны, цвет изменяется от желто-зеленого до светло-коричневого. Алмазы инертны к воздействию УФ, иногда светятся розовым, тускло-голубым или желто-зеленым свечением, связанным с наличием V_2 -дефекта. Иногда на фоне слабого желто-зеленого свечения ядро алмаза люминесцирует голубым цветом. Кристаллы *VII разновидности* также встречены в большом количестве.

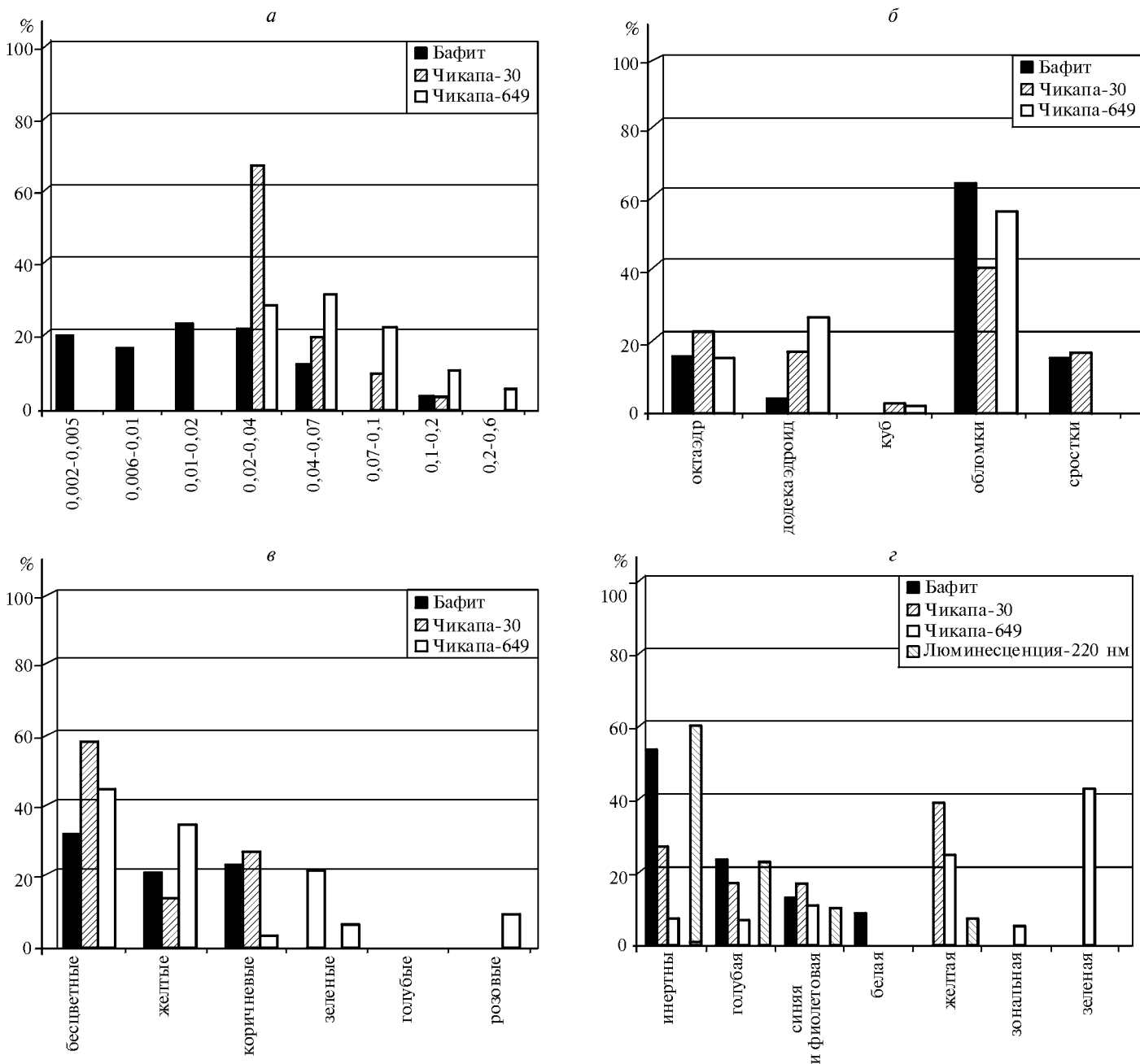


Рис. 3. Распределение кристаллов алмазов в изученных россыпях: а — по массе; б — по форме; в — по цвету; г — по люминесценции

Практически все кристаллы имеют темно-коричневый цвет, что обусловлено большим количеством дефектов и включений. УФ-люминесценция розовая и связана с А-дефектом. Кристаллы I, II и III разновидности находятся в подчиненном количестве. Для кристаллов I разновидности характерна синяя или голубовато-синяя люминесценция, связанная с N3-дефектом. Все кристаллы имеют хорошо выраженный октаэдрический габитус и наименьшее количество включений. У кристаллов II разновидности цвет изменяется от слабо-желтого до интенсивно-желтого. УФ-люминесценция отсутствует или имеет молочно-белый цвет, что связано с наличием С-дефекта и внутренним разупорядочением структуры. Кристаллы III разновидности — обломки с несохранными пер-

вичными формами, трещиноватые, с большим количеством включений. Люминесценция голубоватая до насыщенной голубой.

Узоры двупреломления разнообразны. В кристаллах II разновидности были видны темные «фантомы» октаэдрической, округлой формы. Они приурочены к периферийной зоне и представляют собой полуокружность с еще более темной каемкой. На кристалле III разновидности вокруг включения, находящегося в центре, видно несколько зон в виде светлых пятен, образующих замкнутую фигуру. На кристаллах IV разновидности наблюдались узоры в периферийной зоне, приуроченные к трещинам, уходящим внутрь кристалла. Вокруг них наблюдаются микроскопические крестообразные фигурки. В кристаллах

III разновидности узоры создавали объемные фигуры, только изредка напоминающие крестообразную форму. Разнообразие узоров обусловлено особенностями внутреннего строения кристаллов, распределением в них дислокаций, включений, дефектов, связанных с пластической деформацией и механическими ударами [Орлов, 1984]. Очевидно, что такие дефектные кристаллы могли сохраниться только при отсутствии длительной транспортировки.

На оптических спектрах алмазов хорошо видна бесфоновая линия 415 нм, относящаяся к системе N3, т.е. алмазы содержат азот в различных формах и относятся к типу Ia. Спектры комбинационного рассеяния (СКР) показали, что ни в одном из кристаллов нет включений графита. Все включения дают сильную люминесценцию на длине волны 522 нм и поэтому можно предположить, что они, вероятно, представлены углеводородами. Ширина линии фундаментального поглощения алмаза (1332 см^{-1}) является показателем степени совершенства его структуры и позволяет судить о наличии фазовой и структурной неоднородностей. Установлено, что эта величина изменяется от 0,13 до 0,25. Отсутствие значительного расширения пика показывает, что все изученные кристаллы имеют совершенную структуру, т.е. структурные дефекты (смещение слоев, дефекты упаковки) малы, примеси лонсдейлита нет, значит, все изученные алмазы мантийные, а импактных алмазов в коллекции нет.

Особенности микроморфологии кристаллов были изучены методом РЭМ. Установлены практически все известные формы роста и растворения поверхности: штриховка на гранях, ступеньки роста, дитригональные слои, каналы и ямки травления, каплевидный рельеф, полосы пластической деформации. Механические повреждения (царапины, серповидные выколы), износ ребер и вершин не выявлены. Кристаллы имеют хорошо заметные сколы. Видны трещины, уходящие внутрь кристалла.

Изучение состава минеральных включений проведено на приборе CamScan 4DV Link AN-10000. Проверялись характеристические линии Si, O, S, Fe, Mg, Ca, Cr, Ti. Предварительные (качественные) данные показывают, что в состав включений входят такие элементы, как Si, Al, Mg, Fe, Ca, K, P. Полученные результаты дают четкое представление о наличии во включениях силикатов, главным образом гранатов различного состава — от чистых пиропов до Fe-альмандинов. В обр. 12 выявленный набор химических элементов может отвечать рихтериту и тетраферрифлогопиту. Судя по сложному компонентному составу и сопоставлению с литературными данными [Klein-BenDavid et al., 2004], можно предположить, что это включение, вероятно, представляет собой нераскристаллизованный расплав. Установлены включения (обр. 32), представленные чистым углеродом. Нигде не обнаружены характеристические линии S, т.е. сульфиды не выявлены. Отсутствуют и характе-

ристические линии Ti и Cr, т.е. включений оксидов (хромита, ильменита, рутила) нет.

Для россыпей Конго сначала были обобщены результаты морфологических исследований для 649 кристаллов, взятых из террас и со дна рек Касай, Лубембе, Лонгачимо, Чикапа и Чипумбу (рис. 3). Более детально изучено 30 образцов алмазов с включениями. По гранулометрии отобранная коллекция оказалась близка к коллекции из Западной Африки. Алмазы небольшие (от 2 до 50 камней на карат). Алмазы с массой более 20 кар. редки. Преобладают кристаллы с массой от 0,02 до 0,09 кар. По габитусу преобладают обломки кристаллов, у которых исходная форма была либо октаэдрической, либо додекаэдрической. Додекаэдры гладкогранные, а октаэдры имеют слоистые формы. Характерны кристаллы с корродированной поверхностью. Кубические формы редки. Преобладают октаэдрические формы, которые относятся к *I разновидности* по классификации Ю.Л. Орлова (1984). Большинство алмазов бесцветно. Это главным образом додекаэдриды, которые имеют различные оттенки: от желтоватого до сероватого, с небольшими дефектами (трещины, точки, включения). Кристаллы желтого цвета тоже широко распространены. Желтые кристаллы имеют, как правило, октаэдрический габитус, отмечены и кубические формы. Незначительная часть алмазов окрашена. Присутствуют зеленоватые, серые, голубые и коричневые кристаллы. Установлено небольшое число «алмазов в оболочке». Выявлено сходство с алмазами из россыпей Сьерра-Леоне. В обоих случаях среди окрашенных кристаллов преобладают желтые и коричневые алмазы (рис. 3, в). Это в основном обломки и осколки, причем сильнодефектные. Окраска связана с включениями минералов железа, развивающихся по трещинам.

Цвет люминесценции изучался для коротковолнового (220 нм) и длинноволнового (365 нм) УФС. Были выделены три группы — с зеленой, желтой и синей люминесценцией. Зеленая люминесценция слабая, желтая насыщенная. Насыщенность голубой люминесценции разная — от синей до почти бесцветной, голубоватой. Фиолетовая люминесценция характерна для сростков и двойников. У многих кристаллов фотолюминесценция отсутствует, эти кристаллы непрозрачные, в них много включений. Некоторые кристаллы имели зональную люминесценцию (рис. 3, г) — концентрическую (с ядром в центре) и чередующуюся (с двуцветной полосой). Желтая зона имеет насыщенную окраску и характеризуется наличием V_1 -дефектов, которые типичны для алмазов типа Ia V_1 . Выявлены отличия от алмазов из россыпей Сьерра-Леоне, для которых характерно преобладание инертных кристаллов, а кристаллы с желтой люминесценцией не отмечены. На спектрах люминесценции (рис. 4) выявлено присутствие основных полиатомных азотных дефектов (N3, N3 и S2), характерных для мантийных алмазов. Выделены

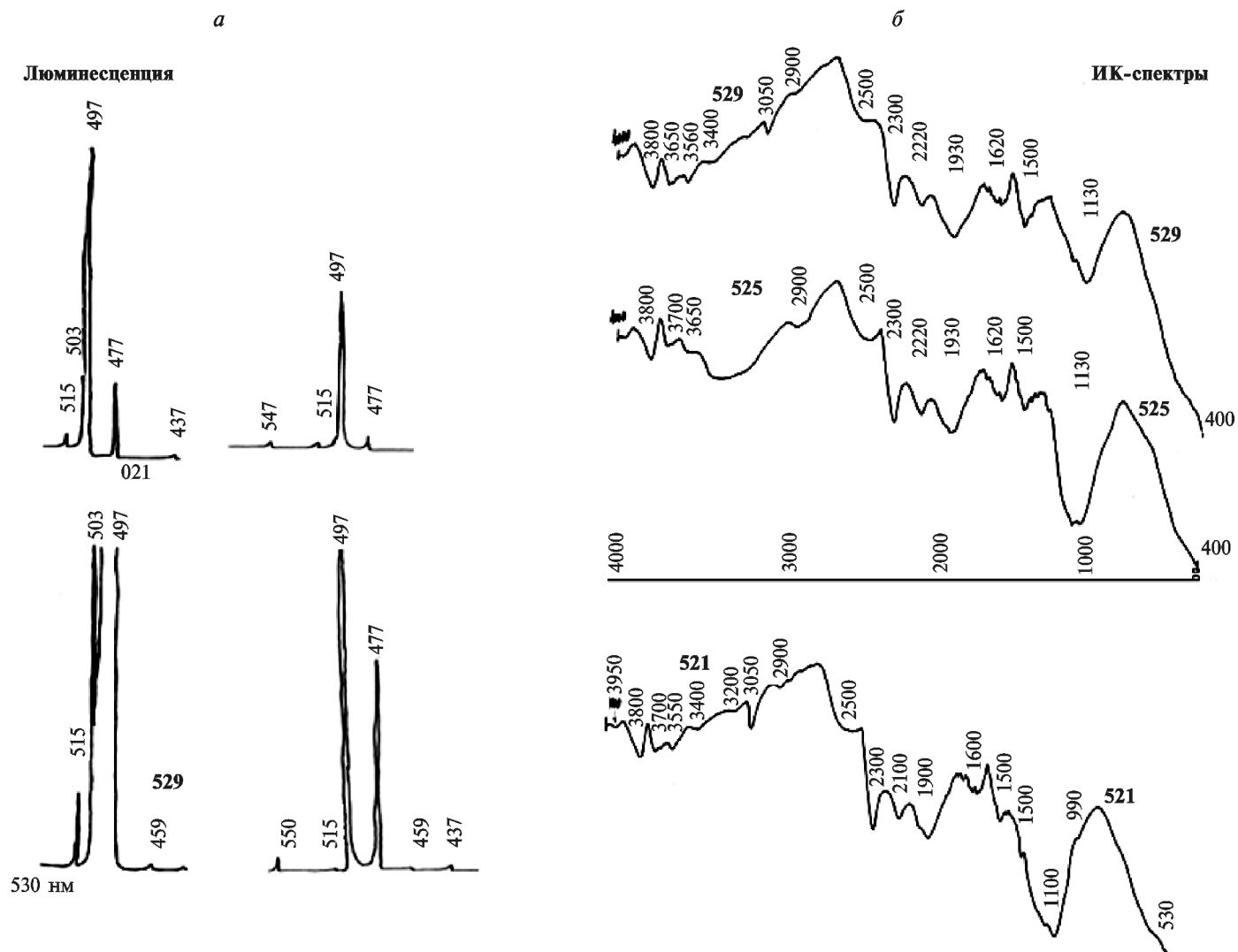


Рис. 4. Типичные спектры люминесценции (а) и ИК-спектры поглощения (б) алмазов из россыпи Чикапа

два типа спектров: тип 1 — видны слабые полосы 437 и 459 нм и очень интенсивные полосы, связанные с наличием N3-дефекта (497–495,3 нм) и центра S2 (503,7 нм); тип 2 — видны слабые полосы 437 и 477 нм, менее интенсивные полосы 515 и 503,7 нм, связанные с наличием S2-дефекта, и очень интенсивная полоса, связанная с входжением N3-дефекта (497 нм). Для алмазов с желтой фотолюминесценцией характерны S₁-дефекты. Зеленая люминесценция характеризует малоазотные кристаллы (IIa) с N3- и N4-дефектами.

Микроморфология поверхности разнообразна. Большинство алмазов плоскогранные и гладкие, имеются угловатые сколы. Встречаются правильные формы и зерна со следами растворения (рис. 5). Установлены формы роста на плоскостях (111). На додекаэдрических кристаллах видны следы растворения — от тонкой шагрени до каплевидно-заноэистой, иногда бугристой поверхности. Установлено 6 разных форм: каналобразные трещины, геометрически правильные треугольные фигуры, дисковые скульптуры, пирамидальные холмики, матовая поверхность, линии

скольжения. Выявлены механические повреждения — царапины, выколки, износ ребер и вершин.

Выявлены 4 типа узоров двупреломления: 1) преобладает полосчатый узор, обусловленный зональным строением кристаллов по октаэдру; 2) узор, создаваемый изоклинами; 3) темный фантом додекаэдра; 4) решетчатый узор. Первые три узора известны для алмазов I разновидности [Орлов, 1984]. Узор типа микроклиновой решетки обусловлен пластической деформацией. Полосы узора пересекают зоны роста кристалла и направление линий скольжения. Этот узор известен для алмазов II разновидности. Двупреломление в алмазах вызвано внутренними напряжениями. Такие кристаллы должны легко разрушаться при транспортировке, нахождение их свидетельствует о близости коренного источника, который не может находиться в Анголе на расстоянии более 400 км.

Изучение внутренней неоднородности кристаллов проводилось также методом рентгеновской вычислительной микротомографии (BT-50-1 «Геотом»). Исследовано 13 образцов. Измерялась интенсивность рентгеновского излучения, приведенная к эталону

(алюминий) в условных единицах (у.е.). В четырех кристаллах были обнаружены внутренние дефекты — трещины, заполненные включениями, параллельные системы трещин и минеральные включения черного цвета (рис. 5). Размер включений от 50 до 220 мкм. По степени ослабления рентгеновского излучения выделено несколько групп (у.е.): 396–1045, 3900–4000, 6000–7036, 14 900. Полученные величины соответствуют силикатным фазам. Черные включения не являются графитом, так как интенсивность углерода составляет 2800 у.е.

По ИК-спектрам поглощения выявлено нескольких групп, различающихся по формам нахождения азота и совершенству структуры (рис. 4). В прозрачных бесцветных образцах установлено присутствие азота в форме А-дефекта (пик 1282 см^{-1}) и V_1 -дефекта (пики 1200 и 1100 см^{-1}). Алмазы отнесены к типу Ia по физической классификации. Кроме полос, связанных с примесью азота, появляются пики 3450 и 1650 см^{-1} , связанные с присутствием молекулярной воды. Присутствие СН-связей диагностируется по наличию пиков 310 , 2900 , 3250 и 1500 см^{-1} . Иногда в спектрах присутствуют слабые пики 530 , 630 , 710 см^{-1} . На некоторых спектрах видно расслоение пиков, связанных с решеточным поглощением алмаза, — 1950 и 2130 см^{-1} . В других случаях наблюдается четкий пик на 2300 см^{-1} , что свидетельствует о разной степени совершенства структуры этих алмазов. В обр. 624, который полупрозрачен, имеет светло-коричневый цвет из-за наличия большого количества внутренних дефектов, присутствует пик, отвечающий азоту в форме А (1282 см^{-1}). Пики, связанные с наличием V_1 -дефекта не обнаружены, т.е. образец

относится к типу IaA по физической классификации. Интенсивные пики поглощения на 1650 и 3400 см^{-1} свидетельствуют о присутствии H_2O . Пики 1400 и 3090 см^{-1} соответствуют углеводородным связям. Кроме того, в спектре присутствуют пики 730 , 610 , 500 см^{-1} . Образцы 495 и 521 прозрачные, имеют светло-желтый цвет, содержат мелкие включения и трещины, относятся к типу Ia по физической классификации. Присутствует пик 1282 см^{-1} , связанный с наличием А-дефекта, и пик, связанный с V_1 -дефектом (1100 см^{-1}). Установлены пики 1600 – 1690 и 3400 – 3450 см^{-1} , свидетельствующие о присутствии молекулярной воды. Пики 1500 и 3090 см^{-1} соответствуют углеводородным связям.

Кроме того, наблюдаются пики 3200 и 3000 см^{-1} и расщепление пика, связанного с решеточным поглощением алмаза на 1900 и 2100 см^{-1} . В обр. 525, который прозрачен и имеет светло-розовый цвет, также обнаружено присутствие азота в А-форме (1282 см^{-1}), но дополнительно наблюдаются слабые пики на 1130 и 1320 см^{-1} , возможно соответствующие С-дефекту. Интенсивные пики на 1620 и 3350 см^{-1} свидетельствуют о наличии молекулярной воды. Пик, связанный с решеточным поглощением алмаза, расщеплен на две полосы — 1930 и 2120 см^{-1} . Присутствуют слабые пики и на 520 , 700 см^{-1} . Как показывают полученные в последнее время данные [Navon, 2001; Yelisseyev et al., 2004], выделенные группы алмазов различаются по времени нахождения в мантии и постростовой истории.

Методом цветной катодолюминесценции выявлено несколько типов свечения (рис. 5): 1) в центральных частях кристаллов свечение ярко-голубое, почти

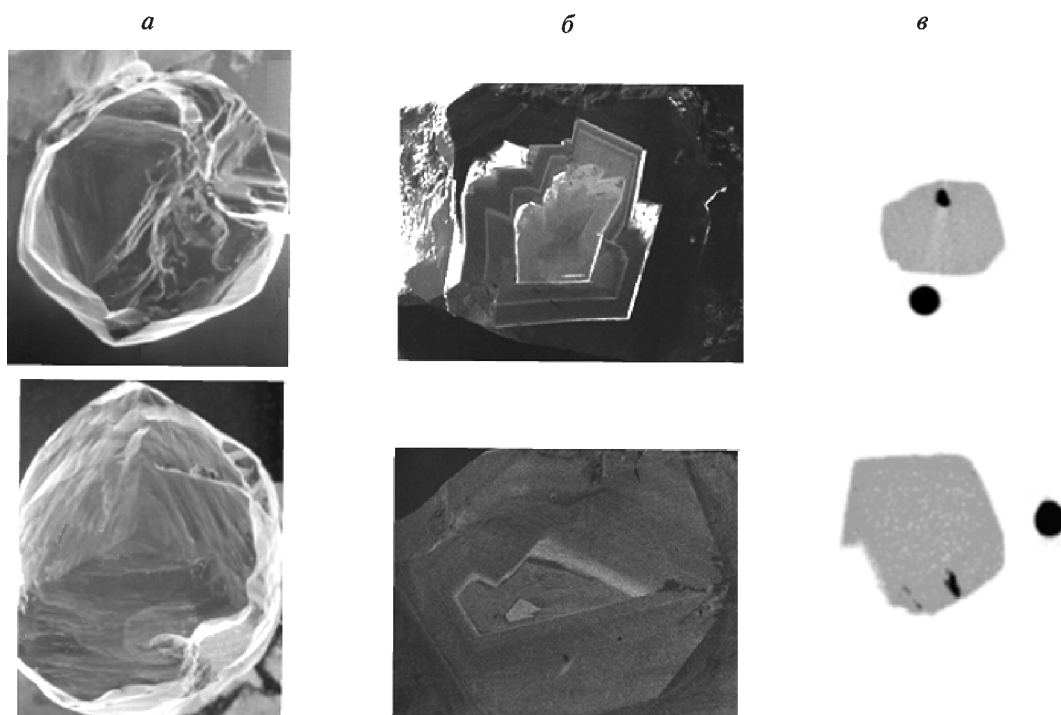


Рис. 5. Особенности строения кристаллов алмаза из россыпи Чикапа: а — по данным РЭМ; б — по данным катодолюминесценции; в — по данным микротомографических исследований

белесое, чрезвычайно интенсивное, распределяется равномерно либо его интенсивность не закономерно меняется, появляются более яркие пятна, ограненные или произвольной формы; 2) в промежуточной области интенсивное свечение синего цвета, чередование более светлых и темных зон, формирующих прямолинейную или прямолинейно-ступенчатую зональность по октаэдру; 3) в периферийной области кристалла очень слабое темно-синее равномерное свечение; 4) вокруг включений на границе областей наблюдается интенсивное свечение различных оттенков зеленого, что связано с внутренними напряжениями в структуре алмаза.

Полученные данные свидетельствуют, что рост изученных кристаллов происходил неравномерно. Сначала формировалась центральная зона кристалла (затравка), потом происходила смена условий и начинался рост криволинейных граней периферийной зоны, т.е. процесс кристаллизации алмаза многостадийен. Отмечено чередование процессов роста с процессами растворения, что подтверждается наличием регенерированных сколов на поверхности.

Первоисточники изученных алмазов. Установление первоисточников россыпных алмазов требует ответа на два основных вопроса — о локализации коренного источника и его типизации.

Задача локализации коренного первоисточника в рамках нашей работы решалась на основе микротопографических исследований характера поверхности кристаллов алмаза и сопровождающих их минералов-спутников (МСА). Представленные в статье материалы позволяют говорить о невысокой степени износа алмазов и МСА. Гранулометрический анализ показывает слабую сортировку зерен. В пробах отмечено довольно значительное количество сростков, что свидетельствует о небольшой дальности транспортировки и отсутствии прибрежно-морской обработки. В россыпях сохранились «алмазы в оболочке», которые легко подвергаются разрушению при транспортировке. Они преобладают в пробах из россыпей по р. Бафит-Нгоку и в виде единичных экземпляров найдены в пробах из района Чикапа. Исследования РЭМ показали отсутствие (район Бафит-Нгоку) или слабое развитие (район Чикапа) механических повреждений алмазов, т.е. царапин, выколов, износа ребер и вершин. Эти наблюдения позволяют говорить о континентальном характере сноса. Близость первоисточника подтверждается присутствием большого числа трещиноватых зерен, а также зерен со сложными узорами двупреломления, с многочисленными включениями. К доказательствам указанного относится и наличие в кристаллах полос пластической деформации и трещин, по которым кристалл не раскололся. Не противоречат этому выводу и результаты изучения МСА.

Близость коренного источника подтверждена отсутствием следов износа на поверхности минералов из проб, отобранных в районе Бафит-Нгоку.

Установленные в пробах из района Чикапа зерна со следами высокой окатанности не относятся к мантийным парагенезисам и выносятся из вмещающих пород. Таким образом, морфологические особенности кристаллов алмаза и МСА показывают, что они слабо подвержены процессам механического износа, поэтому можно предполагать незначительное удаление россыпей от первоисточника.

Задача типизации поискового ореола также требует комплексного подхода, так как микрокристаллы алмаза могут иметь различный генезис [Квасница и др., 1999]. Сопоставление наших данных с литературными показывает, что все алмазы из россыпи имеют мантийное происхождение. Фазовая и структурная неоднородность (примесь лонсдейлита) не выявлены. Данные спектроскопии КР показали, что все кристаллы имеют совершенную структуру. Наблюдение узоров двупреломления и применение спектроскопических методов позволило выявить наличие в алмазах из россыпей N3-дефекта, который характерен для высокоазотных кимберлитовых алмазов типа IA. Распределение алмазов по цвету, форме и люминесценции показало, что в коллекции присутствуют все типы алмазов (I, II, III, IV, VII разновидности), характерные для мантийных алмазов [Вечерин и др., 1997].

Первоисточниками мантийных алмазов могут быть различные типы пород: кимберлиты группы I с высокой концентрацией барофильных минералов, слюдистые кимберлиты группы II или лампроиты. Эти типы первоисточников различаются прежде всего по особенностям МСА [Ваганов, 2000]. Кимберлиты группы I характеризуются высоким содержанием ильменита и граната, а лампроиты — низким. Алмазы в изученных россыпях имеют специфический набор спутников, среди которых преобладает корунд, а пиропов, хромитов и пикроильменита, характерных для кимберлитов, в россыпи нет. Полученные нами данные показывают, что не существует связи между ильменитами из кимберлитов Койду и россыпью Бафит-Нгоку. Особенности состава ильменита из кимберлитов Сьерра-Леоне сближают их с кимберлитовыми трубками Северной Якутии и Южной Африки, такими, как Зимняя и Монастери, где также развит ильменит со структурами распада [Гаранин и др., 1991]. В ильмените из россыпи Бафит-Нгоку таких структур нет. По составу ильменит из кимберлитов более железистый, а из россыпей более марганцевый. В соответствии с этим критерием можно было бы предположить лампроитовый первоисточник изученных россыпей, однако в шлихе отсутствует хромит — главный спутник алмаза в лампроитах Австралии и кимберлитах группы II Южной Африки [Ваганов, 2000]. Таким образом, отсутствие в россыпях характерных минералов — спутников алмаза можно объяснить не столько их удаленностью от первоисточника, сколько специфичностью этих первоисточников.

Предположение о лампроитовом первоисточнике не подтверждается при изучении особенностей морфологии и внутреннего строения кристаллов алмаза в россыпях. Сравнение алмазов коллекции по габитусу с различными кимберлитовыми и лампроитовыми трубками [Квасница и др., 1999] показало, что по коренному источнику коллекция является кимберлитовой, так как большая часть кристаллов имеет октаэдрическую огранку, а в лампроитах преобладают кривогранные алмазы сложной комбинационной огранки [Ваганов, 2000]. Для изученных алмазов при уменьшении размера кристаллов наиболее характерными формами становятся додекаэдры и осколки. Кристаллов с ярко выраженной октаэдрической формой становится меньше, как и в кимберлитовых трубках Якутии [Зинчук и др., 1993].

Распределение изученных кристаллов по цветовым группам также довольно необычно. Как правило, и в коренных месторождениях, и в россыпях преобладают бесцветные кристаллы, их количество составляет более 50% [Зинчук, Коптиль, 2003]. В нашем же случае преобладают алмазы различных оттенков желтого и коричневого цвета. Их окраска связана с включениями минералов Fe, развивающихся по трещинам, что типично для кор выветривания и вторичных коллекторов, которые также обогащены желтыми и зелеными алмазами [Ваганов, 2000]. Большое количество коричневых алмазов установлено в некоторых кимберлитах Канады [Gurney et al., 2004], в которых также присутствуют «алмазы в оболочке» [Yeliseyev et al., 2004].

На основе проведенных исследований алмазы были разделены по типам в соответствии с классификацией Ю.Л. Орлова. Установлено, что преобладают кристаллы IV разновидности (район Бафит-Нгоку) или обломки бесцветных нелюминесцирующих октаэдрических кристаллов (район Чикапа) с характерным зональным внутренним строением, отражающим полистадийность процессов алмазообразования. Выявленное распределение алмазов по типам нехарактерно для кимберлитов Якутии и Южной Африки, в которых обычно преобладают кристаллы I разновидности [Зинчук, Коптиль, 2003]. По преобладанию кристаллов «в оболочке» (IV разновидность) изученная нами коллекция близка к алмазам из россыпей Заира, кимберлитам из района Мбужи-Майи [Амтауэр и др., 1995] и к кимберлитам Арни и Марк северо-запада Канады [Gurney et al., 2004]. Сопоставлены с литературными и данные по фотолюминесценции. Исследования, проведенные на трубке Удачная [Зинчук и др., 1993], показали, что на глубоких горизонтах (250 м) преобладают кристаллы с голубой люминесценцией, а в верхних горизонтах (25 м) увеличивается доля инертных алмазов. Поэтому можно предположить, что и в нашем случае были размыты верхние горизонты трубки и образовались россыпи, в которых преобладают инертные кристаллы.

Генетическая индивидуальность алмазов хорошо выявляется при изучении включений. Наши исследова-

ния показали, что алмазы в россыпях относятся к ультраосновной (пиропы) и эклогитовой (альмандины) сериям. По присутствию К и Р можно предположить наличие гидроксилсодержащих силикатов (К-рихтерита, флогопита) или нераскristализованного стекла. Такие включения описаны в кубических алмазах и в алмазах «в оболочке» [Буланова и др., 1993]. Включения в этих алмазах насыщены H_2O , CO_3^{2-} , SiO_2 , K_2O , CaO и FeO , в них отмечается наличие слоистых гидросиликатов, карбонатов, фосфатов и молекулярного CO_2 . Присутствие молекулярной воды отмечено по данным ИК-спектроскопии и в изученных алмазах. Полученные нами данные позволяют предположить участие в формировании алмазов щелочных карбонатных расплавов и мантийных флюидов [Tomlinson et al., 2004; Pal'yanov et al., 2002]. При этом не обнаружены характеристические линии S, а также Ti и Cr, т.е. изученные включения относятся только к группе силикатов, а сульфиды и оксиды, характерные для включений в алмазах из кимберлитов группы I Якутии и Южной Африки, не установлены. Данные ИК- и КР-спектроскопии (рис. 4) позволяют предположить, что по характерным пикам, отвечающим углеводородным связям, в изученных кристаллах присутствуют включения углеводородов. Такие включения были описаны и изучены в алмазах из россыпей Северной Якутии. Суммируя полученные данные, можно заключить, что исследование включений подтверждает специфику мантийного коренного источника россыпи.

Выводы. 1. Изученные россыпи относятся к континентальному типу, они расположены на значительном удалении от коренного источника, так как алмазы и сопутствующие им минералы не изношены.

2. Результаты изучения показали, что ильменит и другие минералы из шлихов отличаются по химическому составу и физическим свойствам от минералов из кимберлитов, т.е. минералы изученных россыпей не были вынесены из известных кимберлитовых тел и имеют другой коренной источник.

3. Алмазы в изученных россыпях имеют присутствующий только им набор минералов-спутников, что объясняется специфичностью их первоисточников. Спектроскопические особенности алмазов и исследование включений подтверждают специфику мантийного коренного источника россыпи. Алмазы из россыпей Бафит-Нгоку и Чикапа по особенностям морфологии, оптическим свойствам и внутреннему строению не имеют прямых аналогов среди известных коренных месторождений алмазов Африки и Якутии.

4. Присутствие в коллекциях «алмазов в оболочке», значительная доля кристаллов дымчатой окраски, в спектрах которых установлено присутствие молекулярной воды и, возможно, углеводородов, сближает изученные алмазы с некоторыми кимберлитами Канады. Необходимо продолжать исследования на этих территориях, чтобы установить генезис алмазов и сопутствующих минералов в россыпях.

Большую помощь в проведении лабораторных исследований нам оказали сотрудники геологического и физического факультетов МГУ, ИГЕМ РАН и ВНИИ-

геосистем В.К. Гаранин, Е.Ю. Боровикова, Н.Н. Коротаева, Г.В. Сапарин, Я.Л. Ланцев и О.А. Якушева, которым авторы выражают искреннюю благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Амтауэр А., Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П. Кристаллы алмаза с оболочками из россыпей Заира // Докл. РАН. 1995. Т. 340, № 6. С. 94–99

Бескрованов В.В. Онтогенез алмаза. М.: Наука, 1992.

Буланова Г.П., Барашков Ю.П., Тальникова С.Б., Смелова Г.Б. Природный алмаз — генетические аспекты. Новосибирск: Наука, 1993.

Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира. М.: Геоинформмарк, 2000.

Вечерин П.П., Журавлев В.В., Квасков В.В. и др. Природные алмазы России. М.: Полярон, 1997.

Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Сошкина Л.В. Ильменит из кимберлитов. М.: Изд-во МГУ, 1991.

Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003.

Зинчук Н.Н., Спеццус З.В., Зуенко В.В., Зуев В.М. Кимберлитовая трубка Удачная. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1993.

Квасница В.Н., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм микрокристаллов алмаза. М.: Недра, 1999.

Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984.

Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Геолого-генетические основы шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений. М.: Недра, 1995.

Т.В. Посухова — кафедра минералогии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, доцент,
e-mail: tposukhova@mail.ru;
Ф.Н. Колуме — выпускник кафедры минералогии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
гражданин Демократической Республики Конго,
e-mail: mineral@geol.msu.ru

Gurney J.J., Hildebrand P.R., Carlson J.A. et al. The morphological characteristics of diamonds from the Ekati property, Northwest Territories, Canada // *Lithos*. 2004. Vol. 77, Iss. 1–4. P. 21–38.

Hutchison M.T., Nixon P.H., Harley S.L. Corundum inclusions in diamonds—discriminatory criteria and a corundum compositional dataset // *Ibid.* P. 273–286.

Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O. Mantle fluid evolution — a tale of one diamond // *Ibid.* P. 243–253.

Navon O. Diamond Formation in the Earth's Mantle // *Ibid.* 2001. Vol. 55, Sp. Iss. P. 321.

Pal'yanov N., Sokol A. G., Borzdov M., Khokhryakov A.F. Fluid-bearing alkaline carbonate melts as the medium for the formation of diamonds in the Earth's mantle: an experimental study // *Ibid.* 2002. Vol. 60, Iss. 3–4. P. 145–159.

Tomlinson E., Jones A., Milledge Ju. High-pressure experimental growth of diamond using C–K₂CO₃–KCl as an analogue for Cl-bearing carbonate fluid // *Ibid.* 2004. Vol. 77, Iss. 1–4. P. 287–294.

Yelisseyev A.P., Pokhilenko N.P., Steeds J.W. et al. Features of coated diamonds from the Snap Lake/King Lake kimberlite dyke, Slave craton, Canada, as revealed by optical topography // *Ibid.* P. 83–97.

Поступила в редакцию
12.10.2008