

пень раскрытия в крупности 10–30 мкм, обладают сверх высокой шламоемкостью и супертонким взаимопрорастанием.

Заключение

На основании проведенных минералого-технологических исследований представительной пробы руды аномальной зоны Ковдорского месторождения можно сделать вывод, что минеральный состав этой руды очень сложный. Наличие нескольких разновидностей апатита не позволяет получить качественный апатитовый концентрат. Тонкое срастание магнетита с циркелитом и особенно с гатчеттолитом ведет к потерям тантало-ниобатов с железорудным концентратом. Получить селективные редкометалльные концентраты с высокими технологическими показателями (содержание, извлечение) не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев, Б.В. // Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова / Б.В. Афанасьев. — СПб.: Изд-во «Роза ветров», 2011. — 224 с.
2. Глушкова, В.Б. // Фазовые переходы в окислах циркония, гафния и редкоземельных элементах / В.Б. Глушкова: Дис... д-ра хим. наук. — Л.: Ин-т химии силикатов им. И.В. Гребенщикова АН СССР, 1972. — 285 с.
3. Газалева, Г.И. // Теория, техника и технология процессов измельчения минерального сырья / Г.И. Газалева: Учебник. — Екатеринбург, 2017. — 352 с.
4. Козин, В.З. // Исследование руд на обогатимость: Учеб. пособие / В.З. Козин. — Екатеринбург: УГГУ, 2009. — 380 с.
5. Лапин, А.В. Микрорентгеноспектральный (электронно-зондовый) анализ редкометалльных руд и продуктов их обогащения с помощью микроанализатора с волновой дисперсией (WDS) / А.В. Лапин, Е.Н. Левченко, И.М. Куликова, О.А. Набелкин, В.И. Иванов / Метод. рекомендация НСОММИ № 186. — М.: ВИМС, 2016. — 55 с.
6. Минеральное сырье. Краткий справочник / Под ред. В.П. Орлова. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. — 302 с.
7. Римская-Корсакова, О.М. Геология месторождений Ковдорского массива / О.М. Римская-Корсакова, Н.И. Краснова. — СПб.: СПбГУ, 2002. — 146 с.
8. Субботин, В.В. Изучение бадделеита Ковдорского месторождения / В.В. Субботин, Г.Ф. Субботин: Сборник материалов КНЦ, 1995. — 180 с.
9. Цыпин, Е.Ф. Обогащение в стадиях рудоподготовки: науч. монография / Е.Ф. Цыпин. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. — 303 с.
10. Kalashnikov, A.O. Scandium of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential resource / A.O. Kalashnikov et al. // Ore Geology Reviews. — 2016. — Vol. 72. — P. 532–537.
11. Mikhailova, J.A. 3D mineralogical mapping of the Kovdor phosphorite–carbonatite complex (Russia) / J.A. Mikhailova et al // Mineralium Deposita. — 2016. — Vol. 51 (1). — P. 131–149.
12. Ruh, R. Thermal Analysis / R. Ruh, H. Carrett // 2-th International Conference on Thermal Analysis. — 1969. — № 5. — P. 25–30.
13. Tobias, A. A machine vision system for estimation of size distributions by weight of limestone particles / A. Tobias, M.J. Thurley, J.E. Carlson // Minerals Engineering. — 2012. — Vol. 25. — P. 38–46.
14. Tripathy, D.P. // Novel methods for separation of gangue from limestone and coal using multispectral and joint color–texture features / D.P. Tripathy, K. Guru Raghavendra Reddy // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. — 2017. — Vol. 98 (1). — P. 109–117.
15. Yakovenchuk, V.N. Kampelite, Ba₃Mg₁₅Sc₄(PO₄)₆(OH)₃·4H₂O, a new very complex Ba–Sc phosphate mineral from the Kovdor phosphorite–carbonatite complex (Kola Peninsula, Russia) / V.N. Yakovenchuk et al. // Mineralogy and Petrology. — 2017. — DOI 10.1007/s00710-017-0515-1.

© Коллектив авторов, 2018

Левченко Елена Николаевна // levchenko@imgre.ru
 Газалева Галина Ивановна // gazaleeva_gi@umbr.ru
 Власов Игорь Александрович // umbr@umbr.ru
 Бузунова Татьяна Александровна // umbr@umbr.ru

Зинчук М.Н., Зинчук Н.Н. (Западно-Якутский научный центр АН, Республика Саха (Якутия))

О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ НЕКОТОРЫХ ИНДИКАТОРНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ

*Проведенными исследованиями установлено, что для каждого типа кимберлитовых пород, слагающих трубки, характерно свое соотношение индикаторных минералов (ИМК). Присутствие в кимберлитах определенных групп глубинных ксенолитов и ксенозерен их минералов, химический и геохимический состав кимберлитов позволили сформулировать концепцию о свойствах образований верхней мантии, являющихся источником магмы каждого из выделяемых типов кимберлитов. Подтверждена существующая точка зрения, что причиной различной продуктивности кимберлитов является глубина залегания корней магматических очагов. С изучением ИМК связано совершенствование направления исследований для создания наиболее рациональных схем переработки руды и обеспечивающих кристаллосберегающие технологии, а также расширение областей применения алмазов с учетом их реальной структуры и физических особенностей, в том числе выявления природных объектов с повышенным качеством алмазного сырья. **Ключевые слова:** алмаз и его парагенетические спутники, алмазоносные поля, Сибирская платформа.*

Zinchuk M.N., Zinchuk N.N. (Academy of Sciences of Republic Sakha (Yakutia))

ABOUT PERSPECTIVES OF STUDYING KIMBERLITE INDICATOR MINERALS

*Analysis of the results of carried out investigations of mantle modules in kimberlite diatremes of main diamondiferous regions of the Siberian platform was made. Detailed complex investigations of diamond and its paragenetic accessory minerals allow establishing material-indicative parameters of kimberlite magmatism of various productivity and geologic-structural position of kimberlite bodies, and address issues about primary sources of placer diamonds, as well. The presence in kimberlites of definite groups of depth xenoliths and xenograins of their minerals, chemical and geochemical composition of kimberlites allowed formulating a concept about properties of upper mantle formations, being the source of magma for each of distinguished type of kimberlites. Upgrading the line of research on creation of more efficient ore processing flowsheets and providing crystal-integrity technologies, expansion of diamond application areas with consideration of their real structure and physical features, as well as revelation of natural targets with increased quality of diamond raw material, are all related with investigation of primary indicator minerals of kimberlites. **Keywords:** diamond and its paragenetic accessory minerals, diamondiferous fields, Siberian platform.*

Важными составными компонентами кимберлитовых пород, обычно называемыми индикаторными минералами кимберлитов (ИМК), являются глубинные

ассоциации, включающие алмаз, гранат-пироп, пикроильменит, хромшпинелид, оливин, хромдиопсид и некоторые другие. Источником многих из них служат дезинтегрированные породы верхней мантии [1–9]. Поскольку в большинстве перечисленных ИМК, имеющих близкие окраски, могут быть похожими на алмаз, попадая при технологической обработке пород в тяжелую фракцию, является целесообразным провести их сравнительные исследования. В выборках *гранатов* анализировались в основном пиропы из перидотитовых парагенезисов и пироп-альмандиновые гранаты эклогитовых парагенезисов, реже альмандины, которые отнесены к глубинным ассоциациям на основании находок алмазов в парагенезисах с гранатом такого типа в трубках Накынского кимберлитового поля (НКП). Для обработки результатов анализов состава гранатов (пиропов), помимо основной классификационной $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ диаграммы Н.В. Соболева [6], которая отражает барофильные и парагенетические зависимости, использованы и другие диаграммы с отражением различных компонентов, к примеру, TiO_2 и Na_2O , которые могут характеризовать процессы эволюции поднимающихся магматических расплавов. В результате получены материалы для сравнения отдельных районов и трубок по значимым выборкам. Анализировались гранаты из концентрата фракций +0,25–0,5 и +0,5–1,0, который отличается по составу от более мелкой фракции, где доля гранатов алмазной фации [7] значительно выше. Крупные пиропы чаще всего более богаты TiO_2 и соответствуют пироксенитовым ассоциациям или перекристаллизованным, импрегнированным расплавом, перидотитам. Помимо обычных прогнозных оценок алмазности кимберлитов по пиропам на диаграмме $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ полезны также определения уровней концентрации расплавов, поскольку прогрев, сопровождающий внедрение расплавов, может способствовать росту алмазов хорошего качества [1, 4]. Целесообразно рассмотреть особенности составов гранатов по соотношению оксидов хрома и кальция из различных полей и трубок с общим анализом тенденций распространения их основных парагенезисов. В составах гранатов из трубок Далдынского кимберлитового поля (ДКП) проявляется тренд $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ в пределах лерцолитового поля, который для трубки Зарница обнаруживает дискретный характер с разрывом в интервале 8–9 % Cr_2O_3 [3, 9]. Гранаты пироксенитовых ассоциаций (с повышенной долей CaO , TiO_2 и Na_2O), слагающие существенную долю концентрата, образуют прерывистые линии смешения с перидотитовыми парагенезисами, отвечающие иногда зональности в пределах образца [5]. Количество групп обогащения соответствует четырем уровням концентрации расплавов. Гранаты из трубки Удачная отличаются тем, что тренд их составов трассирует границу с гарцбургитовым полем, а доля пироксенитовых гранатов значительна, но они не столь контрастно отличаются по составу от перидотитовых, отражая процессы кимберлитобразования, что может быть вызвано «сглаживанием» границ за счет метасоматической

проработки мантийной литосферы под трубкой [9]. Составы гранатов из кимберлитовых трубок Алакит-Мархинского поля (АМКП) обычно образуют протяженный тренд в пределах лерцолитового поля, субкальциевые разности минерала появляются в массовых количествах, начиная с 6 % Cr_2O_3 . В трубке Сытыканская более хромистые гранаты менее обогащены кальцием, что вместе с содержанием TiO_2 и Na_2O может свидетельствовать об их пироксенитовом источнике из гранат-шпинелевой фации мантии. Гранаты из трубки Комсомольская также отличаются обогащением TiO_2 на уровне гранат-шпинелевого перехода и глубже (то есть на двух уровнях), один из которых соответствует алмаз-пироповой фации глубинности. Субкальциевые гранаты характерны для глубинных минеральных парагенезисов трубки Юбилейная, при тенденции обогащения TiO_2 на уровне гранатовой и гранат-шпинелевой фаций верхней мантии. Наиболее богаты субкальциевыми гранатами кимберлиты трубки Айхал. В составах гранатов из трубок Верхне-Мунского поля — ВМКП (Заполярная, Новинка и Деймос) лерцолитовый тренд хорошо выражен лишь до 6,5 % Cr_2O_3 , что наглядно видно на примере трубки Заполярная. Гранаты из кимберлитовых трубок НКП (особенно трубки Нюрбинская) на диаграмме $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ образуют протяженный лерцолитовый тренд до 10–12 % Cr_2O_3 и параллельный ему в области гарцбургитовых составов; дунитовые парагенезисы с очень низкими содержаниями CaO встречаются при содержаниях Cr_2O_3 10–12 % в кимберлитах трубки Ботубинская и редки в трубке Нюрбинская. Обоим телам свойственны алмазоносные парагенезисы с альмандином (~24–26 % FeO), которые составляют нередко более 50 % тяжелых минералов.

Особого внимания заслуживает *хромдиопсид*, являющийся весьма чутким индикатором условий магмообразования. Он встречается практически во всех трубках, будучи, как и пироп, продуктом дезинтеграции мантийных перидотитов в основном из литосферной части мантии. Его реликты можно обнаружить даже в кимберлитах высокой степени серпентинизации; заметно увеличивается его количество в глубинных частях кимберлитовых трубок, начиная с уровня 600 м и более. Составы хромистых клинопироксенов значительно варьируют в пределах трубок и между отдельными кимберлитовыми полями. Обычно хромистость положительно коррелируется с глубиной образования и степенью метасоматической проработки магматической колонны. Увеличение степени плавления перидотитов также приводит к увеличению хромистости, если в системе достаточно Na_2O . По составу клинопироксена существует резкая зональность в пределах Сибирской алмазоносной провинции (САП). Наиболее истощенные перидотиты установлены в кимберлитах ДКП, где присутствуют даже глубинные деформированные перидотиты, в которых образование клинопироксена связано с проработкой глубинными карбонатитовыми расплавами [6]. Вариации состава *клинопироксенов* из кимберлитов ДКП показы-

вают, что более железистые (~ 4 % FeO), но малохромистые клинопироксены в кимберлитах отвечают гранат-шпинелевым и шпинелевым перидотитам. В трубках Долгожданная и Иреляхская глубинные Cr-диопсиды из перидотитов образованы в процессе магматического замещения силикатным железистым расплавом с уменьшением доли Cr₂O₃ и Na₂O. Силикатный расплав менее характерен для процессов алмазообразования, однако может способствовать перекристаллизации при разогреве вблизи контактовых зон. Самые хромистые пироксены (до 6 % Cr₂O₃) близки по составу к космохлору. Не менее пяти групп, выделяемых по уровню содержания Na₂O и Cr₂O₃, соответствуют слоистости в мантии и, возможно, отдельным пульсациям метасоматических процессов. Судя по редкой встречаемости перидотитов с характеристиками, близкими к таковым ДКП, процессу метасоматоза подвержена практически вся мантийная колонна в алмаз-пироповой фации. В трубке Айхал составы пироксенов очень близки к хромдиопсидам из трубки Юбилейная, но они несколько менее щелочные; в них больше разновидностей истощенного типа и железистых составов, особенно малоглубинных. Из экспериментальных данных известно о прямой зависимости содержания гейкилитового минала от давления [7]. При этом необходимо учитывать, что и сравнительно малоглубинные *ильмениты* из метасоматитов в мантийных перидотитах также могут быть магнезиальными — дополнительным показателем принадлежности к мантийным метасоматитам является повышенная хромистость минерала [5]. Исключением являющиеся ксенолиты глимеритов, особенно с существенно оливиновыми вмещающими породами, повышение содержания хрома в которых часто не наблюдается. Аналогично ведут себя и многие ильменитсодержащие породы, которые, судя по термобарометрии, могут быть очень глубинными и образовываться вблизи основания литосферы, но также не отличающиеся повышенной хромистостью и чрезвычайно высокими содержаниями MgO. Анализ состава ильменита из различных кимберлитовых трубок, специфика распределения концентраций основных компонентов (TiO₂, MgO, NiO, Al₂O₃, FeO, Fe₂O₃, MnO, V₂O₅), а также высокозарядных элементов-примесей — Nb, Ta, Hf, Y и, как правило, REE, являются показателем условий фракционирования кимберлитового расплава в магматических камерах [9] и в продвигающейся колонне кимберлитовых масс в основании литосферы. Следует отметить, что кроме указанной индикаторной роли минерала в эволюции поднимающихся в земную кору кимберлитовых расплавов, его химизм отражает специфику строения верхней мантии под кимберлитовыми проявлениями, при сходстве составов ильменита отдельно взятых кустов кимберлитовых трубок [3]. Важную роль в определении условий мантийного петрогенезиса, продуцирующего кимберлитовые расплавы, играет *хромит*. Хромитовые тренды имеют четко выраженные зависимости от давления, которое коррелирует с хромистостью; выявлена тенденция обогаще-

ния хромом в ранних микрофенокристаллах, а Fe и Ti — на более поздних стадиях [6]. Примечательно, что включения хромита в алмазах всегда высокохромисты: Cr₂O₃ составляет более 60 масс. %. На диаграммах Cr₂O₃–Al₂O₃ хромиты обычно обнаруживают четко выраженные обратные зависимости. Наблюдаемые в отдельных случаях отклонения обусловлены, вероятнее всего, вхождением ульвошпинелевого или магнетитового минала преимущественно к наиболее хромистой части шпинелевых трендов, что связано с близостью к глубинным магматическим источникам в основании литосферных колонн. Однако в зависимости от окислительных условий возможны варианты изоморфных замещений. Для *хромшпинелидов* трубки Зарница ДКП наблюдается расщепление тренда составов на обогащенный ульвошпинелевым компонентом и более характерный для рядом расположенной трубки Удачная. При этом тренд составов хромитов из трубки Зарница, как и ильменитов, проявляет дискретный характер, а трубки Удачная — более непрерывный ряд составов, вплоть до 10 масс. % Cr₂O₃ — значений шпинелевой фации. *Шпинелиды* из кимберлитов трубки Юбилейная, как и некоторых других трубок в Алакит-Мархинском поле (АМКП), также обнаруживают вариации составов и при этом наблюдается характерное расщепление трендов, что может соответствовать слоистости мантийного разреза. Подобный тренд проявлен и для хромшпинелидов и верхней части мантийной колонны. Шпинелиды из трубки Айхал также обнаруживают сходный тренд расщепления, но он менее контрастен, чем в Юбилейной и некоторых других трубках поля. В Малоботуобинском алмазоносном районе (МБАР) кимберлитовые тела (за исключением трубки Интернациональная) отличаются редкой встречаемостью хромшпинелидов [9]. Тренд состава хромитов трубки Интернациональная проявляет четкое деление на отдельные интервалы с существенным расщеплением на ветви, но между ветвями в более хромистой глубинной области наблюдаются линии смещения, что могло быть связано с отдельными промежуточными магматическими очагами. Судя по вариациям составов хромитов из трубки Заполярная ВМКП, практически вся перидотитовая колонна верхней мантии подвержена взаимодействию с жильной системой с обогащением и разогревом [7]. Эти же процессы можно предположить по гомогенному тренду составов клинопироксена и данным термобарометрии. Для трубки Нюрбинская НКП тренд обогащения ульвошпинелевым миналом очень крутой и состоит из двух отрезков. В менее глубинной части интервала степень взаимодействия поднимающихся протокимберлитовых масс менее выражена. Вполне возможно, что на более значительной глубине из этих расплавов вместо ильменита кристаллизовалась ульвошпинель при достаточно высоких степенях окисления и высоких температурах. Этим отчасти объясняется отсутствие ильменитовых мегакристаллов в кимберлитах НКП.

В целом для каждого типа кимберлитовых пород, слагающих трубки, количество ИМК алмазной ассо-

циации пропорционально алмазности той или иной разновидности кимберлита. Высокоалмазные кимберлитовые тела этой группы характеризуются содержанием не менее 5 % гранатов алмазной ассоциации от общего их числа. Обособляющиеся от них высокоалмазные кимберлиты НКП характеризуются [5, 9] пониженным содержанием гранатов алмазной ассоциации (более чем в два раза). Главная их особенность — преобладание низкохромистых разновидностей, составляющих не менее 66 % от общего количества, при появлении зерен с $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 12$ масс. %. В кимберлитах этого поля, характеризующихся снижением роли первых двух минералов, важное индикационное значение принадлежит хромшпинели.

Очень важным является разработка новых и совершенствование уже принятых методов извлечения из кимберлитовых пород и последующего комплексного изучения *алмаза* — минерала с широким комплексом физико-химических, кристалломорфологических и других особенностей, отражающих своеобразие термодинамических и геохимических условий его образования, которые могут быть использованы в качестве типоморфных [2, 4, 6, 9]. Алмазы из отдельных кимберлитовых тел (а нередко и из различных минералогическо-петрографических разновидностей кимберлитов в одном из месторождений) довольно существенно отличаются по ряду типоморфных особенностей. Зная свойства алмазов из кимберлитовых тел, можно с большой долей уверенности решить вопрос о коренных источниках изучаемой россыпи или группы россыпей. Современные методы исследования алмазов дают возможность получить большой объем информации об условиях их образования, последующего существования и изменения, что имеет важное значение при прогнозировании, поисках и оценке алмазных месторождений. Из большого спектра этих особенностей наиболее информативными и относительно легко диагностируемыми являются [1, 6]: морфология, фотолюминесценция, распределение оптически активных и водородных центров, электронный парамагнитный резонанс, химический состав твердых включений в алмазах и др. При этом главнейшим из них является определение принадлежности алмазов к определенной минералогической разновидности, что происходит по комплексу взаимосвязанных признаков и свойств. В результате многолетних исследований алмазов из россыпей и кимберлитовых тел СП (Якутия, Красноярский край и Иркутская область) нами накоплен громадный фактический материал по типоморфным особенностям алмазов из кимберлитовых тел, современных отложений и разновозрастных вторичных коллекторов САП [1]. *Алмазы I разновидности* наиболее распространены в природных объектах. В кимберлитовых месторождениях их выход составляет 80–90 % и падает до 50 % с ростом размеров кристаллов. В россыпях северо-востока СП их содержание уменьшается. Основной формой кристаллов является октаэдр. По внешней морфологии к этой разновидности относятся плоскогранные октаэдры, часто имеющие слоистость



Рис. 1. Алмазы II разновидности из кимберлитов трубки Комсомольская (АМКП)

на ребрах. Обычно эти алмазы прозрачные и бесцветные. В разных месторождениях содержание алмазов I разновидности разных габитусных форм и окрашенных индивидов изменяется. Среди них чаще, чем среди алмазов других монокристаллических разновидностей встречаются обломки и кристаллы со сколами. Среди алмазов I разновидности по своим свойствам выделяются беззотные и полупроводниковые алмазы типов Па и Пв. Для *алмазов разновидности II* характерна кубическая форма роста и их окраска: обычно янтарно-желтая и желто-оранжевая, иногда с зеленоватым оттенком. В отдельных случаях кристаллы в результате эпигенетических процессов имеют кофейно-коричневый или бурый цвет. По физическим свойствам к этой разновидности отнесены также непрозрачные, черные с металлическим блеском алмазы. В процессе растворения кубические кристаллы меняют облик, приобретая кривогранные формы. Алмазы II разновидности в небольших (менее 3 %) количествах устанавливаются (рис. 1) в некоторых кимберлитовых телах Далдыно-Алакитского алмазоносного района — ДААР (трубки Юбилейная, Удачная, Комсомольская, Иреляхская и др.) и составляют значительную часть (5–50 %) в россыпях северо-востока СП, коренные источники которых не установлены. К *алмазам III разновидности* относятся полупрозрачные и непрозрачные кристаллы кубической формы, которая усложняется развитием других основных граней. Габитус часто искажается вследствие срастания нескольких кристаллов по {100} или образования двойников прорастания. Алмазы этой разновидности окрашены в серый цвет, который может меняться до темно-серого и даже черного. Все градации окраски объясняются тем, что внешние зоны кристалла насыщены микроскопическими включениями и мелкими трещинами. Алмазы III разновидности встречаются только в некоторых месторождениях и россыпях главным образом среди крупных разновидностей кристаллов. *Алмазы IV разновидности* известны давно и описаны в литературе

как алмазы в оболочках [1, 4]. Этим названием подчеркивается, что такие алмазы имеют структурно-различимые части с четкой границей раздела — ядро и оболочку, которые на сколах кристаллов хорошо видны невооруженным глазом. Необходимо отметить повышенное (до 10 % и более) содержание алмазов с оболочкой в уникальных по продуктивности кимберлитовых телах НКП (трубки Ботуобинская и Нюрбинская), трубках Айхал и Юбилейная ДААР, где они несут на себе признаки природного растворения (рис. 2). Обычно ядром алмазов этой разновидности являются бесцветные прозрачные кристаллы с октаэдрическими гранями и со всеми особенностями реальной структуры, присущими I разновидности. Окраска алмазов этой разновидности обусловлена оптическими свойствами оболочек. В зависимости от насыщенности микровключениями оболочки могут быть полупрозрачными и непрозрачными. *Алмазы V разновидности* обычно на СП встречаются в россыпях, где в отдельных случаях их содержание достигает 40–50 %, в то время как среди кимберлитовых алмазов они обычно не превышают долей процента. К ним относятся темные, серые, иногда почти черные алмазы, имеющие переходные между октаэдром и ромбододекаэдром формы. Их окраска определяется большим количеством включений, прежде всего графита, находящихся во внешней зоне кристалла в виде хлопьев или точечных образований. Встречаются также сростки из двух-трех кристаллов с общей оболочкой. Центральная часть кристаллов этой разновидности является бесцветной и прозрачной. В целом отмечается резкое отличие алмазов V разновидности из кимберлитовых тел от алмазов той же разновидности из россыпей СП. *Алмазы VI разновидности* (баллас) в нашей стране попадались в незначительном количестве только в россыпях, но в виде поликристаллических шаровидных образований характерны для россыпей Бразилии и Южной Африки. Есть сведения о находке балласов и в кимберлитовой трубке Премьер (Африка). К алмазам



Рис. 2. Алмазы IV разновидности кимберлитов трубки Мир (МБАР)

VII разновидности относятся (рис. 3) сростки из нескольких достаточно крупных (до 4–5 мм) кристаллов, которые обычно полупрозрачны вследствие множества включений, внутренних трещин и каналов травления, развитых по трещинам и по границам срастания отдельных кристаллов. Форма их роста — октаэдр, который в результате растворения может принимать додекаэдрический облик. Их значительную часть составляют циклические сложные двойники. Все кристаллы имеют каналы травления («шрамы»). Существуют переходы между алмазами VII и V разновидностей, причем часто в сростках отдельные индивиды представлены серыми кристаллами V разновидности. К VII разновидности относятся также сложно деформированные двойники и сростки додекаэдроидов из россыпей северо-востока СП, часто полициклические, близкие по своим особенностям к V разновидности, но почти без включений графита. Комплекс типоморфных особенностей алмазов V+VII разновидностей из указанных россыпей свидетельствует об их принадлежности к одному генетическому типу, происходящему из коренных источников неизвестного типа. *Алмазы разновидности VIII* представляют собой друзоподобные сростки многочисленных хорошо ограненных мелких алмазов одинакового размера (до 1 мм). Кристаллы наружной части сростка представлены октаэдрами, часто со ступенчато-пластинчатым характером развития граней, бесцветными и прозрачными. В центральной части агрегата просматривается темное ядро неправильной формы. Алмазы VIII и IX разновидностей в месторождениях обычно встречаются вместе, иногда достигая в отдельных трубках до 20 %. К алмазам IX разновидности относятся поликристаллические сростки в виде кусков неправильной формы, образованных из зерен размером 0,02–0,1 мм, иногда неоднородных по величине и не имеющих кристаллографической огранки. Агрегаты непрозрачны, окрашены в цвета от темно-серого до совершенно черного. *Алмазы разновидности X (карбонадо)* известны давно. Они были



Рис. 3. Алмазы VII разновидности из отложений нижнего течения р. Эбелях (Эбеляхское поле)

найжены в россыпях Бразилии, Венесуэлы и Центральной Африки. На СП карбонадо Х разновидности практически отсутствуют. Единичные образцы отнесены к этой разновидности только по рентгеноструктурным исследованиям. К алмазам XI разновидности относятся (рис. 4) поликристаллические и синтетические алмазы, содержащие в структуре три известные модификации углерода: алмаз, лонсдейлит и графит. Условия их образования являются следствием динамических нагрузок, сопровождающихся соответствующим разогревом. В природе алмазы разновидности XI встречаются в метеоритных кратерах и метеоритах. В россыпях северо-востока СП обнаружены бесформенные, нередко пластинчатые зерна темно-бурого до стально-серого цвета, своим внешним видом напоминающие шлак. Рентгенографическими исследованиями они определены как карбонадо и с учетом их специфики для них было предложено название «якутит». Коренными источниками таких зерен являются метеориты и ударно-метаморфизированные породы. В природе в действительности мы видим смесь отдельных разновидностей алмазов [2]. Так, в кимберлитовой трубке Интернациональная в МБАР преобладают бесцветные кристаллы октаэдрического габитуса I разновидности (71 %), реже переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому (23 %) при пониженном (меньше 1 %) содержании ламинарных ромбододекаэдров. В находящейся рядом кимберлитовой трубке имени XXIII съезда КПСС, характеризующейся в верхней части четко выраженной КВ, также представлены бесцветными, реже эпигенетически окрашенными в лилово-коричневые цвета алмазами I разновидности. Среди них резко преобладают (до 82 %) кристаллы октаэдрического габитуса при невысоком (до 13 %) содержании кристаллов переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов. В свою очередь, из трубок НКП (трубки Нюрбинская и Ботубинская) отмечаются бесцветные, реже эпигенетически бледно окрашенные в лилово- и дымчато-коричневые цвета кристаллы I разновидности при повышенной доле, по сравнению с дру-

гими месторождениями СП, алмазов IV разновидности с окрашенной в желтовато-зеленые и серые цвета оболочкой. В слабоэродированных диатремах, с развитой в верхней части толщей вулканогенно-осадочных пород, ярким примером которых является самая большая на СП (59 га) кимберлитовая трубка Юбилейная, среди бесцветных прозрачных и полупрозрачных кристаллов почти половину составляют разновидности, окрашенные в различные цвета. Среди них свыше 30 % бледно-дымчато-коричневых, меньше розово-лиловых и лилово-коричневых, окрашенных вследствие пластинчатой деформации. Характерно значительное количество индивидов с признаками природного травления (шрамы, матировка, коррозия, каверны и др.), количество которых по месторождению достигает 25 % от всех алмазов. Таким же разнообразием характеризуется спектр алмазов из россыпей СП [1].

При всем разнообразии алмазов даже в пределах одной СП, по которой сделана применяемая классификация Ю.Л. Орлова [4], представилась возможность выделить [2] четыре типа источников алмазов: *I тип первоисточника* — кимберлитовый, характерный для богатых кимберлитовых тел фанерозойского возраста, характеризуется резким преобладанием алмазов I разновидности, представленных ламинарными кристаллами октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов и образующих непрерывный ряд, а также присутствием алмазов с оболочкой IV разновидности, серых кубов III разновидности, поликристаллических агрегатов VIII-IX разновидностей, а в отдельных месторождениях (трубка Юбилейная) равномерно окрашенных в желтый цвет кубоидов II разновидности. *II тип первоисточника* — алмазы кимберлитового генезиса, характерные для кимберлитовых тел с убогой алмазоносностью и кимберлитовых жил; он выделяется по преобладанию додекаэдроидов с шагренью и полосами пластической деформации «жильного» типа, типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствию бесцветных кубоидов I разновидности. *III тип первоисточника* — алмазы невыясненного генезиса, характерные в основном для россыпей северо-востока СП, коренные источники которых до настоящего времени не обнаружены. Кристаллы этих источников представлены графитизированными ромбододекаэдрами V разновидности, сложенными двойниками и сростками додекаэдроидов VII разновидности с легким ($\delta^{13}\text{C} = -23\text{‰}$) изотопным составом углерода и равномерно окрашенными кубоидами II разновидности с изотопным составом углерода промежуточного ($\delta^{13}\text{C} = -13,60\text{‰}$) состава, образующими ассоциацию «эбеляхского» («нижнеленского») типа. *IV тип первоисточника* — алмазы взрывных кольцевых структур импактного генезиса, представленные поликристаллами алмаза типа карбонадо с примесью гексагональной модификации углерода — лонсдейлита (якутит). Полученные данные позволили разделить [1] САП на четыре субпровинции: Центрально-Сибирскую (центральная часть платформы) с преобладанием I типа



Рис. 4. Алмазы XI разновидности из россыпи р. Эбелях (Эбеляхское поле)

первоисточника; Лено-Анабарскую (северо-восток платформы) с преобладанием кристаллов III типа первоисточника невыясненного генезиса; Тунгусскую (юго-запад платформы) с преобладанием типичных округлых алмазов уральского (бразильского) типа, источником которых возможно были докембрийские терригенные формации платформы и ее складчатого обрамления; Алданскую (юго-восток платформы) с находкой единичных округлых алмазов.

Всестороннее исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволили выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести, кроме регионального, среднемасштабное районирование. Так, в россыпях первой субпровинции отмечается высокое содержание кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов. В пределах Лено-Анабарской алмазоносной субпровинции (ЛААСП) выделяются две алмазоносные области: Кютюнгинская (Приленская) и Анабаро-Оленекская. В россыпях первой области устанавливаются кристаллы октаэдрического габитуса (ассоциация «кютюнгинского» типа), характерные для богатого типа первоисточника кимберлитового генезиса. В россыпях Лено-Анабарской области (ЛАО) наблюдается резкое преобладание алмазов из первоисточника невыясненного генезиса (ассоциации «эбеляхского» типа) с преобладанием кристаллов II, V и VII разновидностей, типичных округлых алмазов во всех возрастных и генетических типов алмазоносных отложений. Тунгусская субпровинция (ТАС) разделяется на две области: Байкитскую и Саяно-Тунгусскую. Для россыпей последней типично доминирование округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствие значительного количества (до 10 %) балласов. В россыпях Байкитской области преобладают кристаллы октаэдрического габитуса ассоциации «мирнинского типа», характерной для богатых кимберлитовых трубок, но при значительных содержаниях типичных округлых алмазов (особенно в крупных классах), свойственных периферийным частям древних платформ.

Таким образом, основной формой кимберлитовых проявлений являются воронкообразные брекчиевые вулканические трубки взрыва маар-диатремового типа, верхние части которых венчаются кратерными постройками, а на глубине (от 1000 до 2500 м) диатремы переходят в дайки. Сохранность кратерных частей зависит от величины «посткимберлитового» эрозионного среза территории, а корневые части вскрыты только в отдельных трубках (Мир и др.) в силу большой глубины залегания и небольшой мощности даек (жил). Петрографический спектр кимберлитовых образований характеризует трехфациальный разрез (кратер, диатрему и корневую гипабиссальную зону) и обнаруживает соответствующие текстурно-структурные отличительные черты. Для кимберлитовых диатрем примечательны: отсутствие больших объемов вытесненных пород и плутонических комплексов; выраженная в минеральном и химическом составе насы-

щенность летучими при высокой доле CO_2 ; относительно низкотемпературный характер доминирующей части кимберлитовых минералов; присутствие слабо раскристаллизованных участков и другие признаки быстрого внедрения; наличие ксенолитов мантийных, коровых и вмещающих пород; присутствие алмазов; примеры перехода диатрем в дайки; признаки взрывного генезиса; наличие дотрубочных, синтрубочных и посттрубочных даек; отсутствие термометаморфизма; широкие качественно-количественные вариации минерального состава между сообществами тел и отдельно взятыми проявлениями. Облик и состав разнофациальных кимберлитовых пород (порфиновые кимберлиты, кимберлитовые и автолитовые кимберлитовые брекчии, туфобрекчии и туфы) во многом определяются качественно-количественным спектром вторичных минералов, главными из которых являются серпентин и карбонаты, а к второстепенным отнесены все остальные минералы, образовавшиеся на разных стадиях становления кимберлитовых трубок и представляющие различные минералогические классы — силикаты, карбонаты, оксиды и гидроксиды, сульфиды, сульфаты, галогениды, фосфаты, бораты и битумы. Установленные монтичеллитовые и диопсид-флогопит-оливиновые разновидности кимберлитов позволяют проследить различные этапы эволюции родоначальных кимберлитовых расплавов.

Мантийные парагенезисы минералов из кимберлитов представляют различные уровни мантии, включая ее алмазоносные горизонты, что позволяет конкретизировать алмазоносные ассоциации. Определены спектры редкоземельных элементов в породах различных горизонтов мантийных разрезов и их показательных минералах. Исследованы петролого-минералогические характеристики промышленно алмазоносных кимберлитов и ксенолитов мантийных пород из них. Породы изученных кимберлитовых трубок СП с учетом дискриминантных отношений ($\text{K}_2\text{O}-\text{TiO}_2$; $\text{SiO}_2/\text{MgO}-\text{Ti/Zr}$; Nb/Zr) объединены в три петрогеохимические группы. Рассчитанные термодинамические параметры эволюции исходного субстрата и выполненные реконструкции мантийных разрезов позволили выявить зональность литосферной мантии кимберлитовой провинции, вероятной причиной чего была смена глубинных геодинамических обстановок. Присутствие в кимберлитах определенных групп глубинных ксенолитов, ксенозерен их минералов, химический и геохимический состав кимберлитов позволяет высказать предположение о составе пород верхней мантии, являющихся источником магмы каждой из выделенных типов моделей кимберлитов. Эти данные убедительно показывают, что причиной различной продуктивности кимберлитов является глубина заложения корней кимберлитовых очагов. Состав мантийного материала свидетельствует, что корни промышленно продуктивных кимберлитов залегают на большей глубине, чем слабо алмазоносных. Продуктивность кимберлитов определяется многими факторами, главными из которых являются: геолого-тектонические осо-

бенности районов распространения кимберлитового магматизма; состав вещества верхней мантии, генерирующего кимберлитовые расплавы; глубина заложения корней магматических очагов; скорость миграции (подъема) кимберлитового расплава в земную кору; сохранность алмазов в условиях земной коры (в диатремах); содержание «пустого» материала в кимберлитовых телах. Состав глубинных (мантийных) минералов (пироп, пикроильменит, хромшпинелид и др.), кристалломорфология и физические свойства алмазов дифференцированы на уровне провинции, поля и каждой трубки. Индивидуальные особенности состава и физических свойств ИМК трубок выявляются на статистическом уровне. Всестороннее исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволили выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести, кроме регионального, среднemasштабное. Так, в россыпях первой субпровинции отмечается высокое содержание кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов и выделяются две алмазоносные области: Кютюнгинская (Приленская) и Анабаро-Оленекская. В россыпях первой области устанавливаются кристаллы октаэдрического габитуса (ассоциация «кютюнгинского» типа), характерные для богатого типа первоисточника кимберлитового генезиса. В россыпях ЛАО наблюдается резкое преобладание алмазов из первоисточника невыясненного генезиса (ассоциация «эбеляхского» типа) с преобладанием кристаллов II, V и VII разновидностей, типичных округлых алмазов во всех возрастных и генетических типов алмазоносных отложений. ТСП разделяется на две области: Байкитскую и Саяно-Тунгусскую. Для россыпей последней типично доминирование округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствие значительного количества (до 10 %) балласов. В россыпях Байкитской области преобладают кристаллы октаэдрического габитуса ассоциации «мирнинского типа», характерной для богатых кимберлитовых трубок, но при значительных содержаниях типичных округлых алмазов (особенно в крупных классах), свойственных периферийным частям древних платформ.

Детальные комплексные исследования алмазов и ИМК комплексом современных методов с геологической привязкой необходимы и актуальны. Во-первых, это фундаментальные комплексные исследования минералогии, кристаллографии и физических свойств алмазов и твердых включений в них для выяснения условий генезиса. Во-вторых — это использование информации, полученной разными методами при комплексном исследовании алмазов, для решения прикладных вопросов, непосредственно связанных с практикой геологоразведочных работ и извлечения минерала из пород. К ним относятся установление связи вещественно-индикационных параметров кимберлитового магматизма различной алмазоносности и геолого-структурного положения кимберлитовых тел, что позволяет установить как региональные, так и локальные типоморфные особенности, а также выяснить

вопрос о коренных источниках алмазов россыпей. Третьим направлением комплекса минералогических исследований алмазов, развивающихся на стыке минералогии и технологии минерального сырья, является разработка рекомендаций, направленных на создание наиболее рациональных схем переработки руды и обеспечивающих кристаллосберегающие технологии, а также уточнение областей применения алмазов с учетом их реальной структуры и физических особенностей и выявление объектов с повышенным качеством алмазного сырья. Выполнение комплекса минералогических исследований алмазов и минералогическое районирование территорий необходимо как для рационального определения направления геологоразведочных работ, так и для повышения их качества и эффективности, что будет способствовать открытию новых месторождений алмазов и интенсификации всех работ, направленных на прирост запасов алмазного сырья.

Полученные результаты изучения кимберлитов позволили определить комплекс задач, требующих своего решения в ближайшие годы. До настоящего времени нет единой общепринятой формулировки понятия кимберлитов как горной породы. Требуется принятие единой схемы классификации и номенклатуры кимберлитовых пород на петрографических принципах. По-прежнему актуальны и дискуссионны проблемы их генезиса, природы алмазоносности, механизмы формирования диатрем и структурного контроля проявления. Среди исходных позиций кимберлитобразования, как и прежде, актуальны следующие аспекты: 1) вероятный мантийный источник материала, способного к формированию ультраосновной магмы, продуцирующей производные с минералогией и геохимией кимберлита; 2) условия плавления мантийного субстрата для образования кимберлитового расплава; 3) возможный «спусковой» механизм, ответственный за плавление в мантии и образование кимберлитового расплава. Весьма важным направлением является комплексирование результатов глубинных сейсмических исследований (до 700 км), магнитотеллурических зондирований и изучения ксенолитов мантийных пород для познания строения мантии, процессов алмазо- и кимберлитобразования и природы кимберлитовых проявлений. Рассмотрение всех этих вопросов, в свою очередь, требует обобщения и анализа накопленных данных по вещественному составу дискретных групп различных мантийных пород — дунитов, гранатовых и шпинелевых перидотитов, пироксенитов, эклогитов, ильменит- и флогопитсодержащих парагенезисов и пр., являющихся потенциальными поставщиками алмазов и другого глубинного материала в кимберлиты. Необходимо сопоставление таких данных по различным группам мантийных пород, анализ условий их P-T равновесия на глубине, пространственного положения в верхней мантии под различными кимберлитовыми полями, соотношений с палеогеотермами. Большой интерес представляет оценка количественной роли различных

мантйных парагенезисов в материнских кимберлитах с учетом избирательного захвата глубинного материала протокимберлитовыми расплавами, особенностей транспортировки захваченного материала к поверхности, устойчивости алмазов в глубинных выплавках и т.д. Иными словами, следует рассмотреть те параметры и процессы, анализ которых может помочь углубить понимание механизмов возникновения продуктивности кимберлитов. Предполагается, что на этой основе удастся усовершенствовать, особенно в количественном отношении по элементному составу, существующие критерии алмазности и соответственно методы прогнозирования и поисков новых месторождений. Геологоразведочные и прогнозно-поисковые работы на СП в условиях, усложняющихся алмазопроисхождением обстановок, настоятельно требуют повышения степени информативности вещественных характеристик магматических источников алмазов для прогнозно-поисковых и оценочных целей. Изучение отдельных месторождений алмазов АМКП и ДАП в связи с их разведкой и вовлечением в ближайшее время в эксплуатацию (трубки Комсомольская, Юбилейная, Удачная, Зарница, трубки НКП и ВМКП), а также пород трубчатых и жильных тел и аномальных объектов северной части провинции вызывает необходимость совершенствования принципов и критериев минералого-петрохимической диагностики промышленно-алмазоносных кимберлитов, выделения основных типов (и фаз) кимберлитовых пород, установления сходства и различия между высокопродуктивными кимберлитами и породами средне- и убогоалмазоносных диатрем, а также совершенствования технологии обогащения этих уникальных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зинчук, Н.Н. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы / Н.Н. Зинчук, В.И. Коптиль. — М.: Недра, 2003. — 603 с.
2. Зинчук, Н.Н. Кимберлиты в истории Земли / Н.Н. Зинчук, А.Д. Савко, А.В. Крайнов: Учеб. Пособие. — Воронеж: Тр. НИИ геологии ВГУ. — Вып. 68. — 2013. — 100 с.
3. Милашев, В.А. Кимберлитовые провинции / В.А. Милашев. — Л.: Недра, 1974. — 238 с.
4. Орлов, Ю.Л. Минералогия алмаза / Ю.Л. Орлов. — М.: Наука, 1984. — 264 с.
5. Ротман, А.Я. Кимберлиты и перспективы их исследований / А.Я. Ротман, Н.Н. Зинчук, И.В. Ащепков, К.Н. Егоров // Геология алмазов — настоящее и будущее (к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). — Воронеж: ВГУ, 2005. — С. 856–892.
6. Соболев, Н.В. Ксенолиты алмазоносных перидотитов в кимберлитах и проблема алмазов / Н.В. Соболев, Н.П. Похиленко, Э.С. Ефимова // Геология и геофизика. — 1984. — № 12. — С. 63–80.
7. Соловьева, Л.В. Мантийный метасоматизм и плавление в глубинных ксенолитах из трубки Удачная, их возможная связь с алмазо- и кимберлитобразованием / Л.В. Соловьева, К.Н. Егоров, М.Е. Маркова и др. // Геология и геофизика. — 1997. — Т. 38. — № 1. — С. 172–193.
8. Специус, З.В. Состав континентальной верхней мантии и низов коры под Сибирской платформой / З.В. Специус, В.П. Серенко. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
9. Харьков, А.Д. Коренные месторождения алмазов Мира / А.Д. Харьков, Н.Н. Зинчук, А.И. Крючков. — М.: Недра, 1998. — 555 с.

© Зинчук М.Н., Зинчук Н.Н., 2018

Зинчук Мария Николаевна // nnzinchuk@rambler.ru
Зинчук Николай Николаевич // nnzinchuk@rambler.ru

Котова О.Б., Размыслов И.Н. (ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар)

ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ И ОБОГАЩЕНИЯ БОКСИТОВ, УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ

*Проблема обогащения алюминиевых руд связана с тем, что бокситообразующие минералы имеют близкие значения плотности, дисперсный характер и тонкое взаимное прорастание. Поэтому разработка и усовершенствование способов обогащения и переработки бокситов продолжается. В работе показано влияние физических и химических факторов на минералы железа с целью трансформации их в магнетит, для увеличения магнитной фазы. Установлено влияние различного рода энергетических воздействий на бокситовое сырье и красные шламы, при котором происходит изменение магнитных свойств и фазового состава, концентраций определенных минералов. **Ключевые слова:** бокситы, красные шламы, обработка и обогащение бокситов, утилизация красных шламов.*

Kotova O.B., Razmyslov I.N. (IG Komi SC UB RAS, Syktyvkar)
PROBLEMS OF BOXITE PROCESSING AND ENRICHMENT, WASTE MANAGEMENT

*The problem of enrichment of aluminum ores is due to the fact that bauxite-forming minerals have similar density, dispersed character and subtle intergrowth. Therefore, the development and improvement of methods for the enrichment and processing of bauxite continue. The work shows the effect of physical and chemical factors on iron minerals with the goal of transforming them into magnetite, to increase the magnetic phase. Influence of various kinds of energetic influences on bauxite raw materials and red mud is established, under which the magnetic properties and phase composition change, the concentrations of certain minerals change. **Keywords:** bauxite, red mud, treatment and enrichment of bauxite, utilization of red mud.*

Введение

Большие запасы бокситов, близость к индустриальному Уралу делают Республику Коми (Россия) привлекательной для добывающих отраслей. Бокситы Тимана традиционно рассматриваются как источник алюминиевого сырья. Главная задача предприятия «Боксит Тимана» (входит в состав ОК РУСАЛ) — освоение бокситовых месторождений Ворыквинской группы в Республике Коми. Для успешной коммерциализации бокситов необходимо их глубокое изучение с привлечением современных методов минералогических исследований, вовлечение в переработку всего минерального вещества, расширение перечня извлекаемых полезных компонентов и продуктов с новыми свойствами, утилизация отходов.

Основная идея проводимых изысканий: возрождение интереса к фундаментальным понятиям — минерал как носитель химических элементов и полезных свойств, но на новом прогностическом (познаватель-