



МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УДК 549.211:552.323.6 (571.5)

О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы)

Diamond study features in forecasting and prospecting (Siberian platform)

Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.

Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.

Существование индикаторных признаков алмаза на всех уровнях его нахождения, от кимберлитовых провинций, субпровинций, поля, диатремы до рудных столбов утверждается по результатам исследований и обобщения материалов по свойствам алмазов из коренных и россыпных месторождений Сибирской платформы. Совокупность разновидностей алмаза в кимберлитовых породах образует не парагенетические, а парастерические ассоциации, связанные их сонахождением в кимберлитах. В статье сформулированы морфологические критерии алмазоносности кимберлитов в зависимости от количественного содержания в них округлых алмазов. Не отмечено значимых различий в алмазоносности кимберлитов на разведанную глубину диатрем. Охарактеризованы основные методы изучения алмаза с акцентом на их эффективность. Отсутствует зональность в изменении типоморфных особенностей алмазов.

Ключевые слова: алмазы, кимберлиты, алмазоносные районы, россыпи, Сибирская алмазоносная провинция.

Based on the completed research and data summary on diamonds specific features (an example from the Siberian platform), conclusions were made that indications exist at all levels of their location: from kimberlite-related provinces, subprovinces, fields, diatremes to ore shoots. Population of diamond varieties in kimberlite rocks forms parasteric, rather than paragenetic, associations related to their coexistence in kimberlites. Morphological criteria of kimberlite diamond potential were defined depending on rounded diamonds content in them. Significant differences in kimberlites diamond potential were not revealed to the explored depth of diatremes. A conclusion about the absence of horizontal concentric zonality in the change of diamond typomorphic features was made.

Key words: diamonds, kimberlite, diamondiferous regions, placers, Siberian diamond-province.

Для цитирования: © Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы). Руды и металлы. 2021. № 3. с. 59–75. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-100018.

For citation: © Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D. Diamond study features in forecasting and prospecting (Siberian platform). Ores and metals, 2021, № 3, pp. 59–75. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-100018.

За многолетнюю историю алмазопромысловых работ на древних платформах открыты многочисленные различные по содержанию алмазов коренные и россыпные месторождения или небольшие проявления. Собранные при этом коллекции охватывают почти всё разнообразие природных алмазов и содержат неоценимую научно-производственную информацию, так как характеризуют все территории, где обнаружены эти уникальные природные образования.

Алмаз – полигенный минерал, образующийся не только в условиях земных недр, но и при сверхскоростном соударении космических тел с землей. В настоящее время в мире известны [1–4, 12–16, 21–27] четыре геолого-генетических типа коренных месторождений алмазов: кимберлитовый, лампроитовый, импактный, метаморфогенный. Наиболее значимы в практическом отношении кимберлитовый и лампроитовый типы, приуроченные в основном к трубкам взрыва (диатремам). В некоторых довольно редких случаях экономически рентабельные концентрации алмазов наблюдаются в дайках, тесно связанных с трубками кимберлитов. Два других типа коренных месторождений алмазов локализуются в коровых породах. Алмазы в них обычно мелкие (преобладают индивиды размером сотые или десятые доли миллиметра). Они могут быть использованы только для технических целей. Форма месторождений импактных алмазов – изометрическая.

Очень важным является комплексное изучение алмаза – минерала с широким комплексом физико-химических, кристалломорфологических и других особенностей, отражающих своеобразие термодинамических и геохимических условий образования, которые могут быть использованы в качестве типоморфных [5–11, 17–21]. Алмазы из отдельных кимберлитовых тел (а нередко и из различных минерало-петрографических разновидностей кимберлитов в одном из месторождений) довольно существенно различаются по ряду типоморфных особенностей. Зная свойства алмазов из кимберлитовых тел, можно с большой долей уверенности определить коренной

источник изучаемой россыпи или группы россыпей.

Современные методы исследования алмазов дают возможность получить большой объём информации об условиях их образования, последующего существования и изменения, что важно при прогнозировании, поисках и оценке алмазных месторождений. Из широкого спектра этих особенностей наиболее информативными и относительно легко диагностируемыми являются [4, 15–17, 24]: морфология, фотолюминесценция, распределение оптически активных и водородных центров, электронный парамагнитный резонанс, химический состав твёрдых включений в алмазах и др. При этом главнейший признак – принадлежность алмазов к определённой минералогической разновидности по комплексу взаимосвязанных признаков и свойств. В результате многолетних исследований алмазов из россыпей и кимберлитовых тел Сибирской алмазодобывающей провинции – САП (Якутия, Красноярский край и Иркутская область) – с применением минералогической классификации алмазов, предложенной Ю. Л. Орловым [20], по которой выделяются 11 генетических разновидностей алмазов (с дополнительным разделением кристаллов отдельных разновидностей по габитусу и морфологическим типам), нами накоплен значительный фактический материал по типоморфным особенностям алмазов из кимберлитовых тел, современных отложений и разновозрастных вторичных коллекторов Сибирской платформы (СП), что позволяет провести районирование территории.

Алмазы разновидности I наиболее распространены в природных объектах (рис. 1). В кимберлитовых месторождениях их выход составляет 80–90 % и падает до 50 % с ростом размеров кристаллов. В россыпях северо-востока САП их содержание уменьшается. Основная форма кристаллов – октаэдр. По внешнему виду к этой разновидности относят плоскогранные октаэдры, часто со слоистостью на рёбрах. Обычно эти алмазы прозрачные и бесцветные. В разных месторождениях содержание алмазов разновидности I различных габитусных форм и окрашенных индивидов изменяется.

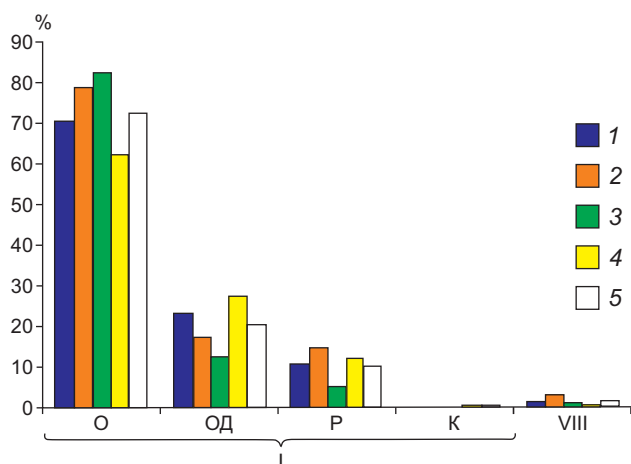
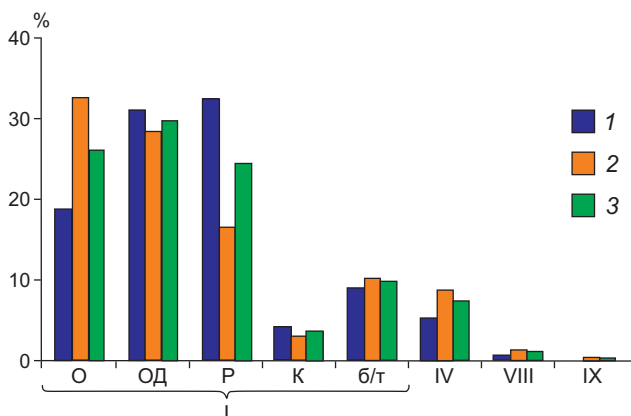


Рис. 1. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых тел Мирнинского поля:

римские цифры – разновидности алмазов, по Ю. Л. Орлову (О – октаэдры, ОД – переходные формы, Р – ламинарные ромбододекаэдры, К – кубы); трубки: 1 – Интернациональная (число изученных алмазов $n = 184$), 2 – Дачная ($n = 129$), 3 – им. XXIII съезда КПСС ($n = 150$), 4 – Мир; 5 – среднее по полю

Fig. 1. Typomorphic features of diamonds from kimberlite bodies of the Mirny field:

roman numerals – diamond varieties after Yu. L. Orlov (O – octahedra, ОД – transitional forms, Р – laminar rhombic dodecahedra, К – cubes); pipes: 1 – Internationalnaya (the number of studied diamonds $n = 184$), 2 – Dachnaya ($n = 129$), 3 – XXIII CPSU Congress ($n = 150$), 4 – Mir; 5 – field average



Среди них чаще, чем среди алмазов других монокристаллических разновидностей, встречаются обломки и кристаллы со сколами. Среди алмазов разновидности I по своим свойствам выделяются безазотные и полупроводниковые алмазы типов Ia и Ib.

Для алмазов разновидности II характерна кубическая форма роста, их окраска обычно янтарно-жёлтая и жёлто-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 чёрные с металлическим блеском алмазы. В процессе растворения кубические кристаллы изменяют облик, приобретая кривогранные формы. Алмазы разновидности II в небольших (менее 3 %) количествах устанавливаются 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 САП, коренные источники которых не выявлены.

К алмазам разновидности III 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

Рис. 2. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых тел Накынского поля:

б/т – осколки; трубки: 1 – Ботуобинская ($n = 5404$), 2 – Нюрбинская ($n = 5814$); 3 – среднее по полю, остальные усл. обозн. см. рис. 1

Fig. 2. Typomorphic features of diamonds from kimberlite bodies of the Nakyn field:

б/т – fragments; pipes: 1 – Botuobinskaya ($n = 5404$), 2 – Nyurbinskaya ($n = 5814$); 3 – field average, see Fig. 1 for other legend

изменяться до тёмно-серого и даже чёрного. Все градации окраски объясняются тем, что внешние зоны кристалла насыщены микроскопическими включениями и мелкими трещинами. Алмазы разновидности III встречаются только в некоторых месторождениях и россыпях, главным образом среди крупных разностей кристаллов.

Алмазы разновидности IV известны давно и описаны в литературе как «алмазы в оболочке». Этим названием подчёркивается, что такие алмазы имеют структурно различимые части с чёткой границей разделения на ядро и оболочку, которые на сколах кристаллов хорошо видны невооружённым глазом и уверенно определяются в природных выборках минерала (рис. 2). Необходимо отметить повышенное (до 10 % и более) содержание алмазов в оболочке в уникальных по продуктивности кимберлитовых телах Накынского кимберлитового поля – НКП (трубки Ботуобинская и Нюрбинская), диатремах Айхал, Комсомольская и Юбилейная ДААР, где у них есть признаки природного растворения [2, 7, 16–18]. Обычно ядром алмазов этой разновидности выступают бесцветные прозрачные кристаллы с октаэдрическими гранями и со всеми особенностями реальной структуры, присущими разновидности I. Окраска алмазов данной разновидности обусловлена оптическими свойствами оболочки. В зависимости от насыщенности микровключениями оболочки могут быть полупрозрачными и непрозрачными.

Алмазы разновидности V на САП обычно встречаются в россыпях (рис. 3), в отдельных случаях их содержание достигает 40–50 %, в то время как среди кимберлитовых алмазов оно обычно не превышает долей процента. К ним относятся тёмные, серые, иногда почти чёрные 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. Присутствуют также сростки из двух–трёх кристаллов с общей оболочкой. Центральная часть кристаллов этой разновидности бесцветная и про-



Рис. 3. Алмазы разновидности V россыпи Усунку-Юрэх (Приленский алмазоносный район СП)

Fig. 3. Diamonds of V variety, the Usunku-Yurekh placer (Pri-lensky diamondiferous region of the Siberian Platform)

зрачная. В целом отмечается резкое отличие алмазов разновидности V из кимберлитовых тел от алмазов той же разновидности из россыпей САП.

Алмазы разновидности VI (баллас) в России встречаются в незначительном количестве только в россыпях, но в виде поликристаллических шаровидных образований характерны для россыпей Бразилии и Южной Африки. Есть сведения о находке балласов в кимберлитовой трубке Премьер (Африка).

К алмазам разновидности VII относятся сростки из нескольких достаточно крупных (до 4–5 мм) кристаллов, которые обычно полупрозрачны из-за множества включений, внутренних трещин и каналов травления, развитых по трещинам и 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 разновидностей VII и V, причём часто в сростках отдельные индивиды представлены серыми кристаллами разновидности V. К разновидности VII также относят-



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

Fig. 4. Diamonds of XI variety from the Ebelyakh placer (Ebelyakh field of the Siberian Platform)

ся сложно деформированные двойники и сростки додекаэдров из россыпей северо-востока САП, часто полициклические, близкие по своим особенностям к разновидности V, но почти без включений графита. Комплекс типоморфных особенностей алмазов разновидностей V и VII 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 огранённых 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 тёмное ядро неправильной формы. Алмазы разновидностей VIII и IX в месторождениях обычно встречаются вместе, иногда достигая в отдельных трубках до 20 %.

К алмазам разновидности IX относятся поликристаллические сростки в виде кусков неправильной формы, образованных из зёрен размером 0,02–0,1 мм, иногда неоднородных по размеру и не имеющих кристаллографической огранки. Агрегаты непрозрачны, окраше-

ны в цвета от тёмно-серого до совершенно чёрного.

Алмазы разновидности X (карбонадо) известны давно. Они были найдены в россыпях Бразилии, Венесуэлы и Центральной Африки. На САП карбонадо практически отсутствуют. Единичные образцы отнесены к этой разновидности только по рентгеноструктурным исследованиям.

К алмазам разновидности XI относятся поликристаллические и синтетические алмазы, содержащие в структуре три известные модификации углерода – алмаз, лонсдейлит и графит, поскольку 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 САП обнаружены бесформенные, нередко пластинчатые зёрна от тёмно-бурого до стально-серого цвета, внешне видом напоминающие шлак (рис. 4). Рентгенографическими исследованиями они определены как карбонадо, и с учётом их специфики для них было предложено название «якутит». Коренными источниками таких зёрен служат метеориты и ударно-метаморфизированные породы.

В природе мы видим смесь отдельных разновидностей алмазов (рис. 5). Так, в кимберлитовой трубке Интернациональная в Малоботуобинском алмазоносном районе (МБАР) преобладают бесцветные кристаллы октаэдрического габитуса разновидности I (71 %), реже переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому (23 %) при пониженном (менее 1 %) содержании ламинарных ромбододекаэдров. В рядом находящейся кимберлитовой трубке им. XXIII съезда КПСС (МБАР), характеризующейся в верхней части чётко выраженной корой выветривания, также представлены бесцветными, реже эпигенетически окрашенными в лилово-коричневые цвета алмазами разновидности I [5, 12, 16, 19, 23]. Среди них резко преобладают (до 82 %) кристаллы октаэдрического габитуса при невысоком (до 13 %) содержании кристаллов переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусу.

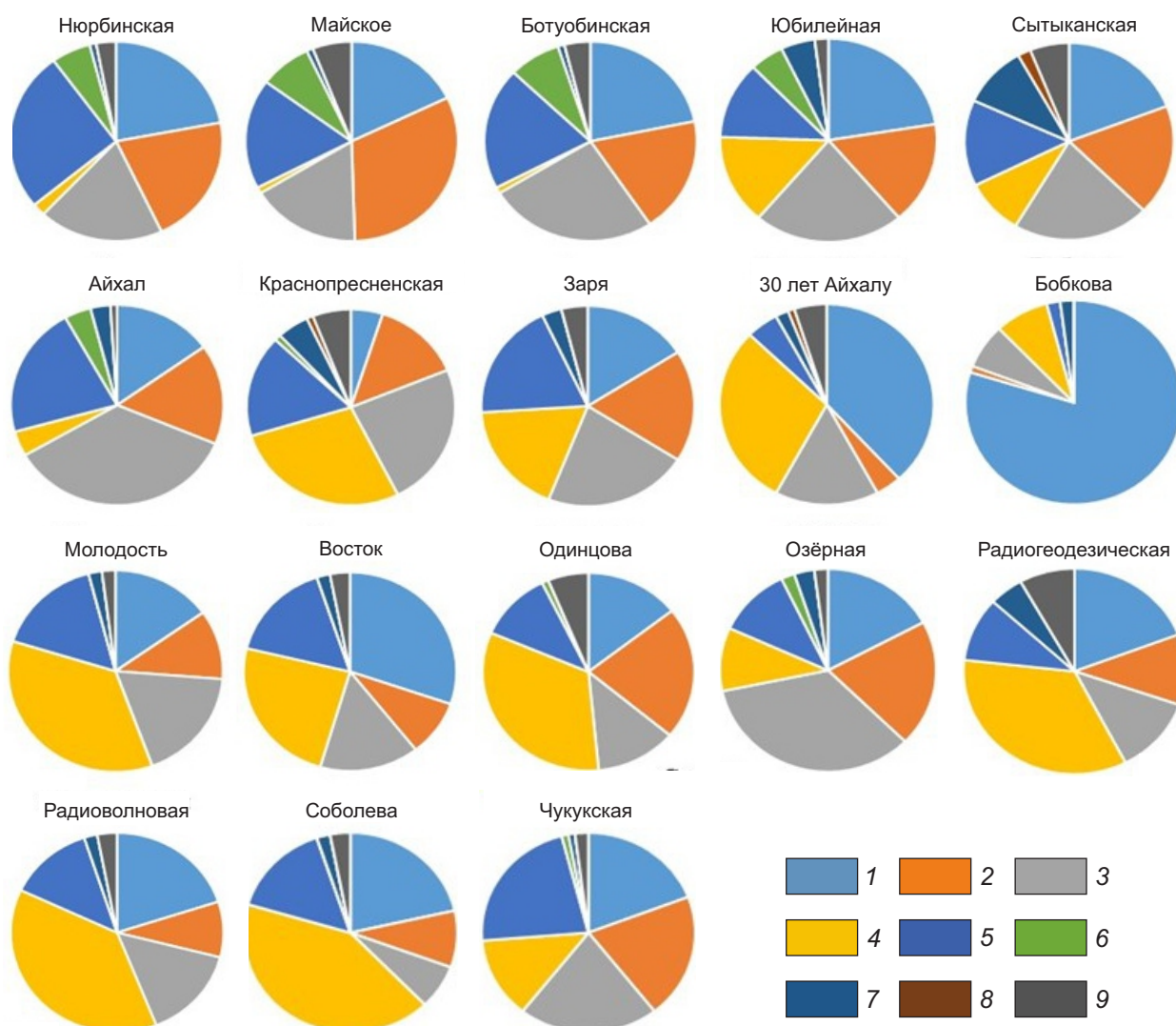


Рис. 5. Разновидности и габитус алмазов (%) в кимберлитовых телах Накынского и Алаakit-Мархинского полей:

1 – октаэдр; 2 – переходные формы ряда октаэдр – ромбододекаэдр; 3 – ламинарные ромбододекаэдр; 4 – округлые ромбододекаэдр; 5 – без типа; 6 – разновидность IV; 7 – разновидность VIII; 8 – разновидность IX; 9 – прочие

Fig. 5. Varieties and habit of diamonds (%) in kimberlite bodies of the Nakyn and Alakit-Markhinsky fields:

1 – octahedron; 2 – transitional forms of the octahedron – rhombododecahedron series; 3 – laminar rhombododecahedrons; 4 – rounded rhombododecahedrons; 5 – no type; 6 – variety IV; 7 – variety VIII; 8 – variety IX; 9 – others

тусу. В свою очередь, в трубках Нюрбинская и Ботуобинская (НКП) отмечаются бесцветные, реже эпигенетически бледно окрашенные в лилово- и дымчато-коричневые цвета кристаллы разновидности I при повышенной доле (по сравнению с другими месторождениями САП)

алмазов разновидности IV с окрашенной в желтовато-зелёные 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 разности, окрашенные в различные цвета. Среди них более 30 % – бледно-дымчато-коричневые, меньше – розово-лиловые и лилово-коричневые, окрашенные вследствие пластинчатой деформации. Характерно значительное количество индивидов с признаками природного травления – шрамами, матировкой, коррозией, кавернами и др. (25 % всех алмазов по месторождению). Таким же разнообразием характеризуется спектр алмазов из россыпей САП.

При всем разнообразии алмазов даже в пределах одной САП, по которой сделана применяемая классификация Ю. Л. Орлова [20], возможно выделить [9, 21, 24, 27] четыре типа источников алмазов.

I тип первоисточника – кимберлитовый, характерный для богатых кимберлитовых тел фанерозойского возраста, отличается резким преобладанием алмазов разновидности I, представленных ламинарными кристаллами октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов и образующих непрерывный ряд, а также присутствием алмазов в оболочке разновидности IV, серых кубов разновидности III, поликристаллических агрегатов разновидностей VIII, IX, а в отдельных месторождениях (трубка Юбилейная) – равномерно окрашенных в жёлтый цвет кубоидов разновидности II.

II тип первоисточника – алмазы кимберлитового генезиса, характерные для кимберлитовых тел с убогой алмазоносностью и кимберлитовых жил; выделяется по преобладанию додекаэдроидов с шагреневой поверхностью и полосами пластической деформации жильного типа, типичных округлых алмазов уральского (бразильского) типа и наличием бесцветных кубоидов разновидности I.

III тип первоисточника – алмазы невыясненного генезиса, характерные в основном для россыпей северо-востока САП, коренные источники которых до настоящего времени не обнаружены. Кристаллы этих источников представлены [1, 24–26] графитизированными ромбододекаэдрами разновидности V, сложенными

ми двойниками и сростками додекаэдроидов разновидности VII с лёгким ($\delta^{13}\text{C} = -23 \text{ ‰}$) изотопным составом углерода и равномерно окрашенными кубоидами разновидности II 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 [14, 16] САП на четыре субпровинции: Центрально-Сибирскую (центральная часть платформы) с преобладанием I типа 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 её 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 ещё и среднемасштабное районирование. Так, в россыпях Центрально-Сибирской субпровинции отмечается высокое содержание кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов. В пределах Лено-Анабарской субпровинции (ЛААСП) выделяются две алмазоносные области: Кютюнгдинская (Приленская) и Анабаро-Оленёкская. В россыпях первой области устлавливаются кристаллы октаэдрического габитуса (ассоциация кютюнгдинского типа), характерные для богатого типа первоисточника кимберлитового генезиса. В россыпях ЛААСП наблюдается резкое преобладание алмазов из первоисточника невыясненного генезиса (ассоциации эбеляхского типа) с преобладанием кристаллов разновидностей II, V и VII, типичных округлых алмазов во всех возрастных и ге-

нетических типах алмазоносных отложений. Тунгусская субпровинция (ТАСП) разделяется на две области: Байкитскую и Саяно-Тунгусскую. Для россыпей последней типичны 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), свойственной периферийным частям древних платформ.

Алмазоносность кимберлитов определяется многими факторами, главные из которых – геолого-тектонические особенности районов распространения кимберлитового магматизма; состав вещества верхней мантии, генерирующего кимберлитовые расплавы; глубина заложения корней магматических очагов; скорость миграции (подъёма) 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 индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) выявляются на статистическом уровне. Исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволили выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести районирование территорий, выделяя перспективные площади для проведения прогнозно-поисковых работ. Результаты такого районирования по алмазам и ИМК с учётом ряда критериев (морфологических, структурно-тектонических, палеогеографических и др.) служат основой для прогнозирования как новых богатых кимберлитовых тел, так и россыпей с невыявленными типами первоисточников, а также месторождений с повышенным качеством алмаз-

ного сырья. Анализ результатов изучения алмазов и ИМК различными исследователями подчёркивает актуальность и необходимость минералогических исследований комплексом современных методов с геологической привязкой находок минерала, позволяет решить ряд задач. Фундаментальные исследования, с одной стороны, уточняют условия генезиса алмазосодержащих пород, с другой – дают сведения чисто прикладной направленности для геолого-поисковых работ и технологического извлечения алмазов из кимберлитов. Установление связей вещественно-индикационных параметров кимберлитового магматизма различной продуктивности и геолого-структурного положения диатрем позволяет выявлять как региональные, так и локальные типоморфные особенности первичных минералов продуктивных пород, а также выяснять вопрос о коренных источниках полезного компонента в россыпях.

Алмаз является [4, 16–18, 24–27] носителем богатейшей информации об условиях своего формирования, изменениях в магматическом расплаве породы-транспортёра, преобразованиях разнообразных экзогенных обстановок в условиях седиментогенеза и дальнейших стадий литификации пород. Уникальность ряда свойств (исключительная твёрдость, высокий показатель преломления наряду с повышенной дисперсией, высочайшая теплопроводность и др.) делает алмаз незаменимым во многих отраслях экономики.

Исследования состоят из трёх блоков: 1-й – наблюдение (измерение), документация наблюдений; 2-й – обработка результатов наблюдений (формы хранения, классификации, способы сворачивания данных, статистическая обработка результатов, моделирование – математическое, натурное, графическое, экспериментальные и т. д.); 3-й – интерпретация результатов наблюдений и их обработка (формулирование выводов по проведённым работам, постановка новых исследовательских задач и т. д.). Каждый из этих блоков относительно независим, имеет свои задачи, методы и способы их решения, а часто и разных исполнителей. В то же время они взаимосвязаны; развитие наиболее мобильного из них, 1-го, требует со-

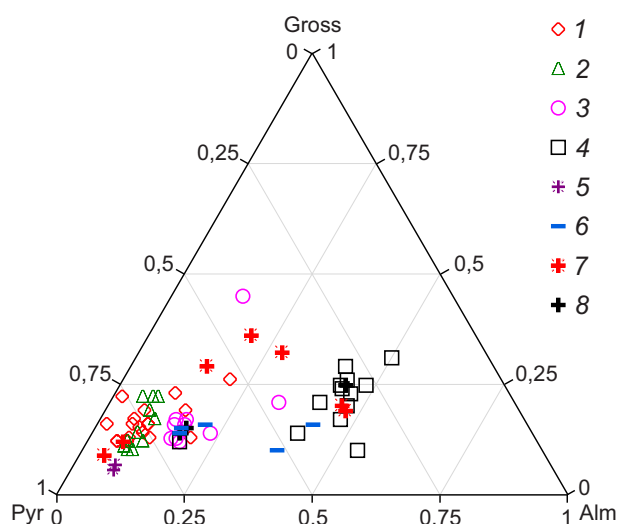


Рис. 6. Соотношение минералов во включениях гранатов в алмазах из кимберлитовых трубок Якутии (по данным КР-спектроскопии):

трубки: 1 – Юбилейная ($n = 19$), 2 – Удачная ($n = 12$), 3 – Комсомольская ($n = 10$), 4 – Комсомольская-Магнитная ($n = 13$), 5 – Мир ($n = 2$), 6 – Спутник ($n = 5$), 7 – Заполярная ($n = 7$), 8 – Майская ($n = 3$)

Fig. 6. Mineral ratio in garnet inclusions in diamonds from Yakutian kimberlite pipes (based on spectroscopy data):

pipes: 1 – Yubileynaya ($n = 19$), 2 – Udachnaya ($n = 12$), 3 – Komsomolskaya ($n = 10$), 4 – Komsomolskaya-Magnitnaya ($n = 13$), 5 – Mir ($n = 2$), 6 – Sputnik ($n = 5$), 7 – Zapolyarnaya ($n = 7$), 8 – Mayskaya ($n = 3$)

ответствующих корректировок во 2-м и 3-м. Это касается исследований всех минералов, включая и алмаз. Существуют известные методы исследований (физиографические, физические и др.), которые постоянно развиваются, и одновременно появляются другие приёмы, дающие новые комплексы данных. Но диалектика исследований такова, что 2-й и 3-й блоки требуют некоторой стабильности, получения однородных данных для интерпретации сложных объектов, решения задач. Для этого необходимо использование стандартного комплекса исследовательских средств, способов обработки результатов наблюдений. В этом нет про-

тиворечий, поскольку это – единство противоположностей, неразрывное сочетание высокодинамичного научно-исследовательского комплекса и более консервативного производственного.

Для алмаза (как и для других минералов) существует значительное количество методов изучения и регулярно появляются новые, но для массовых измерений и районирования по алмазам требуются однородные массивы данных, полученные на стандартном комплексе исследовательских средств. Такие комплексные исследования [3–5] позволяют определить парагенетическую принадлежность алмаза, параметры его образования; дополняют эти исследования [7, 8, 24] КР-спектроскопия включений и, в первую очередь, гранатов (рис. 6) и оливина. Перспективен метод аналитической электронной микроскопии, позволяющий извлекать и изучать наномикронные включения в алмазах, невидимые при оптических увеличениях. Многообещающими являются исследования магнитных свойств алмазов на уникальном оборудовании на постоянных магнитах. Для установления природы ферритизма определяется микропримесный состав алмазов с помощью рентгенофлуоресцентного анализа при синхротронном излучении и с использованием методики LAM ICP-MS (масс-спектрометрический анализ с лазерной абляцией). Эти методы широко использовались до сих пор только в геохимических исследованиях минералов и горных пород, но их применение для алмазов вскрыло целый пласт новых возможностей. Фактически мы выходим на ранее не исследованный мезоуровень организации алмаза между микроуровнем, характеризующимся структурными примесями, собственными дефектами, изучаемыми с помощью оптико-спектроскопических, люминесцентных методов, ЭПР, изучения форм содержания азота, и макроуровнем, характеризующимся внешней морфологией кристаллов и макровключениями.

Для исследований на мезоуровне в настоящее время представляются перспективными упомянутый метод аналитической микроскопии, магнитность алмазов, исследования мик-

ропримесного состава, которые характеризуют отчасти структурные примеси (главным образом Ni), но в основном – наномикронные включения, невидимые в оптическом диапазоне увеличений, дифракционные методы, особенно с использованием синхротронного излучения, рентгеновская томография на синхротронном излучении, методы рассеяния света для обнаружения присутствия и оценки плотности распределения наномикронных включений. В ближайшее время эти методы будут бурно развиваться и дадут много новой информации. Можно полагать, что прежде всего будет получена информация генетического плана, дополняющая данные по типоморфизму алмазов, которые необходимо будет адаптировать для решения геолого-поисковых и разведочных задач.

Таким образом, анализ полученных данных и опубликованных материалов показывает, насколько велико разнообразие свойств алмаза как твёрдого тела. Эти общие сведения об алмазе необходимы для понимания методов исследований минерала. В действительности разнообразие свойств и особенностей алмаза неизмеримо шире, и это – основание для поиска новых методов исследований, подходящих для решения прогнозно-поисковых задач.

Для изучения морфологии алмазов и ИМК широко используется *сканирующая (растровая) электронная микроскопия (СЭМ)*, позволяющая получать объёмное изображение объекта. Микрофотографирование образцов минералов (в том числе алмазов) на электронном микроскопе преследует две цели: а) исследование поверхности, выявление и интерпретация элементов рельефа, обнаруживаемых или неинтерпретируемых с помощью оптической микроскопии; б) документация образца. Фиксация изображения поверхности на СЭМ осуществляется как на плёнку, так и с использованием цифровой системы записи изображения с выводом его на компьютер.

Поскольку *структура алмаза* – чувствительный индикатор и условий роста, и пост-ростовых изменений, её изучению уделяется большое внимание. Генетическую нагрузку несут различные отклонения от идеальной струк-

туры, которые выражаются в зональности и секториальности в связи с неравномерным распределением структурных примесей, напряжений и примесей вокруг минеральных и флюидных включений, пластических деформаций кристаллической решётки, а также в комплексе структурных изменений, связанных с релаксацией внутренних напряжений (полигонизация, рекристаллизация, хрупкое разрушение и т. д.).

Существует множество методов структурных исследований минералов, основные для алмаза – рентгеноструктурные (дифракционные). Из них наиболее значимыми являются полихроматический метод Лауэ или Лауэ-СИ с использованием «белого» синхротронного излучения; проекционный монохроматический метод Ланга и его специфические разновидности; асимметричный метод на отражение от поверхности (метод Вейсмана); метод двухкристального спектрометра и др. При этом необходимо отметить, что алмаз является богатным объектом для рентгеноструктурных исследований благодаря высокой прозрачности в рентгеновских лучах и относительной простоте дифракционной картины.

Высокую информативность показывает *метод аномального двупреломления*, характеризующийся технологической простотой и возможностью массовых наблюдений. Однако при этом надо помнить о разнообразии причин и форм аномального двупреломления в алмазах. Реальная картина двупреломления представляет собой суперпозицию, дифференциация которой для генетической интерпретации требует глубоких знаний и привлечения других методов структурных исследований (структурного травления, рентгеновских и др.).

Исследование изотопного состава углерода алмазов – важнейший метод изучения внутреннего строения минералов. Изотопный состав углерода характеризует отклонения от отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ измеренного образца от стандарта. Большинство природных углеродсодержащих соединений имеет изотопный состав углерода от +10 до -90 ‰ относительно стандарта PDB. Знак (-) указывает на то, что образец содержит меньше тяжёлого изотопа, чем

стандарт (легче стандарта), знак (+) – больше (тяжелее стандарта). Углерод, поступивший из мантии в течение геологической истории, сформировал в конечном счёте углеродный резервуар коры и её осадочной оболочки. Усреднение изотопного состава форм углерода – с учётом их масс в осадочной оболочке даёт значение $\delta^{13}\text{C} = -5 \text{ ‰}$. Оно согласуется с наблюдаемыми значениями $\delta^{13}\text{C}$ эндогенных форм углерода, прежде всего с основным количеством алмазов, изотопный состав которых $\delta^{13}\text{C} = -4,5 \text{ ‰}$. На протяжении геологической истории изотопный состав как мантийного, так и возрождённого в процессах метаморфизма осадочного углерода был близок к значению $\delta^{13}\text{C} = -5 \text{ ‰}$.

К настоящему времени опубликовано огромное количество результатов анализов изотопного состава углерода алмазов из большинства алмазоносных районов мира. Они позволили установить основной диапазон, в который укладывается большинство определений $\delta^{13}\text{C}$, разработать классификацию алмазов по изотопному составу, определить связь изотопного состава с парагенетической принадлежностью алмазов и др. Однако главный вопрос – причины различий изотопного состава алмазов – остаётся открытым. Тем не менее изотопный состав углерода, наряду с другими типоморфными особенностями алмазов, – один из признаков идентификации возраста коренных источников, что принципиально важно для оценки поисковой ситуации и выделения перспективных для поисков площадей, особенно если идентифицируются докембрийские источники [5–8, 16–18]. Алмазы эклогитовых парагенезисов демонстрируют максимальное разнообразие изотопного состава углерода. Поэтому следует подчеркнуть, что доля эклогитовых алмазов в северных россыпях значительно выше, чем в кимберлитах и связанных с ними россыпях центральных районов СП. Это коррелирует с повышенной долей в северных россыпях изотопически лёгких алмазов, для которых обосновывается докембрийский возраст.

Материалы проведённых исследований показали высокую информативность изотопных

исследований углерода алмазов как в генетическом, так и в геологоразведочном плане. Результаты исследований изотопии углерода (особенно для алмазов новых площадей) во многих случаях могут указать на парагенезис алмазов, даже когда характеристические минеральные включения не обнаружены, и способствуют выделению и генетической интерпретации разновидностей алмазов. Изотопия может указать на различия алмазов даже в случае конвергентности других их признаков, поэтому этот метод должен быть обязательным элементом в комплексе исследований алмазов для решения геологоразведочных задач, в первую очередь для идентификации россыпей.

Из множества *методов оптической спектроскопии* наиболее широкое применение в практике исследования алмазов получило изучение спектров оптического поглощения и люминесценции, причём возбуждение последней может быть реализовано различными методами: с использованием оптического (лазерного) излучения, рентгеновских лучей или пуска электронов. По аппаратному оформлению (типы спектрометров, источников света и приёмников) и физическим принципам спектры оптического поглощения разделяются на два основных диапазона: 2–50 мкм (микрон), или 5000–200 см^{-1} (преимущественно колебательные процессы); 0,2–2 мкм, или 50 000–5000 см^{-1} (электронные переходы, иногда с участием фононов). Достоинства адсорбционной спектроскопии в средней ИК-области при исследовании природных алмазов следующие:

- возможность количественно оценить концентрации одновременно нескольких азотных (C, A, B1, B2) центров, а также центров с участием бора и водорода, благодаря чему можно определить тип кристаллов в рамках физической классификации (Ia, Ib, IIa, IIb, III);
- достаточно высокая чувствительность;
- экспрессность;
- наличие коммерческих моделей спектрометров в комплексе с ИК-микроскопом.

В достаточной степени в настоящей статье охарактеризованы: адсорбционная спектроскопия в области электронных переходов (УФ-

ближняя ИК-область спектра); центры С, А, В1 с участием бора, простейшие собственные точечные дефекты, протяжённые собственные дефекты (дислокации), дополнительные дефекты и окраска природных алмазов.

Применение электронного (ЭПР), или спинового (ЭСР), парамагнитного резонанса наиболее эффективно, если в минерале имеются неспаренные электроны. Взаимодействие магнитных моментов этих электронов с приложенным магнитным полем создаёт условия для наблюдения ЭПР, который может наблюдаться и анализироваться во всех веществах и в любых агрегатных состояниях, если в них содержатся элементы с неспаренными спинами. К ним относятся [4, 7, 16–18]:

- атомы с нечётным числом электронов (N и H);
- ионы с частично заполненными электронными оболочками (ионы переходных групп):
 - 3d (группа железа) – Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu;
 - 4d (группа палладия) – Nb, Mo, Tc, Rr, Ru, Pd, Ag, Zr;
 - 5d (группа платины) – Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au;
 - 4f (группа редких земель) – Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb;
 - 5f (группа актиноидов) – Th, Po, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk;
- молекулы с нечётным числом электронов (NO);
- свободные радикалы (CH₃);
- электронно-дырочные центры – электроны или дырки, локализованные в дефектных позициях кристаллической структуры.

Нижний предел концентраций парамагнитных центров в веществе определяет чувствительность приборов. Для современных спектрометров он составляет ~ 10¹³ спинов на 1 см³ вещества. Присутствие какого-либо иона в повышенных количествах препятствует наблюдению других ионов. При обзоре исследований дефектов в структуре алмаза методом ЭПР детально охарактеризованы примесные азотные парамагнитные центры в природных алмазах типа Ib, Ia, ионах никеля в структуре кристаллов, электронное состояние никелевых дефек-

тов и собственные дефекты структуры минерала. Из анализа природы собственных радиационных дефектов можно сделать заключение об особенностях процессов образования сложных собственных дефектов в алмазе с участием вакансий и межузлий, а также о температуре постростового пребывания кристаллов при радиационном воздействии и пластической деформации в природных условиях. Электронный парамагнитный резонанс алмазов – эффективное средство изучения примесных центров и собственных дефектов алмазов, дополняющее возможности оптической спектроскопии. Кроме того, этот метод даёт наиболее точную информацию о содержании структурной примеси донорного азота (форма С).

Методика спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) основывается на использовании лазеров и заключается в том, что фотон лазерного излучения неупруго рассеивается в веществе с изменением частоты (энергии) и волнового вектора. Эта разность энергии и импульса (волнового вектора) фотона передаётся веществу с поглощением энергии в случае стоксовского рассеяния и с выделением энергии – в случае антистоксовского. При стоксовском рассеянии в веществе возбуждаются колебания атомов или электронов (электронное КР). При исследовании минералов методом КР обычно применяют стоксовское рассеяние первого порядка, при котором рассеянный фотон света возбуждает в кристалле один фотон, т. е. квант колебаний атомов определённой частоты. КР-спектроскопия широко используется для анализа как самого алмаза, так и различных включений в нём. Размеры доступных для изучения включений – 5–200 мкм. КР является удобным неразрушающим инструментом для анализа состава газовой-жидкостных включений в алмазе. Обычно определяется состав смеси CO₂-N₂-CO-CH₄-C₃H₈-C₆H₆-C₂H₄-H₂ и ряда других газов во включениях. Методом КР можно диагностировать твёрдые включения (графит, кварц, омфацит, оливин, коэсит, шпинель, гранат и другие минералы), а также состав газовой смеси во включениях в алмазе. Включения в алмазе могут быть использованы и для расчёта условий роста алмаза.



Визуальная идентификация включений в алмазе с использованием бинокулярного микроскопа не всегда даёт правильный результат в силу оптических особенностей минеральных включений в алмазе, а также субъективного подхода исследователя. Следовательно, спектроскопическое исследование минералов-включений позволяет исключить все недостатки, связанные с идентификацией включений визуально.

Один из современных и инновационных подходов в изучении включений в алмазе – метод рамановской спектроскопии. На основе использования конфокального рамановского микроскопа Invia (Renishaw) возможна диагностика минеральных включений в алмазе [7, 8]. Спектр комбинационного рассеяния алмаза имеет одну из самых интенсивных полос – около 1332 см^{-1} , что, в свою очередь, усложняет процесс регистрации КР-спектра минерального включения. В то же время большое количество рамановских спектров известных минералов, находящихся в библиотеке WIRE, записаны в области от 0 до 1200 см^{-1} , что даёт возможность регистрировать спектр включения алмаза до 1200 см^{-1} , обходя высокоинтенсивную линию рамановского отражения алмаза. Стоит отметить, что характеристическая 41-я полоса комбинационного рассеяния включения графита расположена после алмазной линии около 1600 см^{-1} .

Большое значение в опубликованных работах уделяется составу ИМК. Так, главными особенностями состава гранатов ультраосновных парагенезисов в кимберлитах являются широкий диапазон содержаний кальциевого компонента 1–85 мол. % для гранатов из кимберлитов и 2–65 мол. % – для гранатов из ксенолитов пород ультраосновных парагенезисов ($f = \text{Fe} / (\text{Fe} + \text{Mg})$) меняется от 9 до 37 %, закономерно возрастающая в такой последовательности ассоциаций и типов пород: гарцбургит-дуниты – зернистые лерцолиты – катаклазированные лерцолиты – ильменитовые лерцолиты + ильменитовые верлиты). В этом же ряду отмечена тенденция роста содержания андрадитового и титан-андрадитового минала – от первых до 17 мол. %. В комплексе магнезиаль-

ных гранатов в кимберлитовых концентратах резко преобладают пиропы лерцолитового парагенезиса. Малокальциевые хромсодержащие пиропы гарцбургит-дунитового парагенезиса в переменных количествах (0,1–21 отн. %) присутствуют обычно в алмазоносных кимберлитах, хотя имеются редкие исключения. Богатые кальциевым компонентом гранаты верлитового парагенезиса в количестве от долей до 6 отн. % встречаются как в алмазоносных (чаще), так и в неалмазоносных (реже) трубках. Результаты изучения комплекса гранатов ультраосновных парагенезисов из концентратов лампроитовых трубок Западной Австралии показывают присутствие в них всех типов парагенетических гранатов, характерных для кимберлитов, в том числе малокальциевых хромсодержащих пиропов гарцбургит-дунитового парагенезиса в алмазоносных лампроитах.

Значительное место в изучении алмаза занимают данные по *типоморфизму алмазов и ИМК* при решении геологоразведочных задач. Общеизвестно, что алмаз и его минералы-спутники – главные индикаторы при шлихо-минералогическом методе поисков коренных алмазных месторождений. Под типоморфизмом понимается способность минерала отражать в своих структурных, морфологических, физических, химических и других свойствах и особенностях условия среды, в которой он зарождался, рос, существовал на протяжении всей своей истории. Типоморфизм как отражение на минерале условий геологической среды и их изменений позволяет решать обратную задачу по реконструкции характера этих условий (типоморфный анализ), а онтогенетический анализ типоморфных особенностей – задачу последовательности смены геологических условий на протяжении существования минерала. Известно, в каких морфологических особенностях ИМК отражаются условия гипергенеза, диагенеза, метасоматоза и метагенеза; имеются также сведения о связи степени механического износа минералов с характером литодинамической обстановки формирования ореолов. Решение обратной задачи – реконструкции геологических условий на основе типоморфизма минералов – требует предваритель-

ного решения прямой задачи, т. е. выявления взаимного соответствия той или иной особенности минералов конкретной геологической обстановке. Прямая задача решается либо фенологическим путём (через наблюдение эталонных объектов, в которых связь между типоморфной особенностью минералов и характером среды представляется очевидной), либо экспериментально, либо теоретически. Практика показывает, что она не всегда может быть решена с достаточной полнотой.

Одной из важнейших черт минералов является способность сохранять в своих типоморфных особенностях сведения о тех периодах геологической истории, документы о которых в форме геологических тел не сохранились. По типоморфизму ИМК удаётся воссоздать даже фациальный характер древних коллекторов, что иногда невозможно сделать чисто геологическими методами в связи с отсутствием объекта исследований – размытой осадочной толщи.

Список литературы

1. Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горайнов С. В., Юрьева О. П., Сонин В. М., Чепуров А. И. Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидности (по классификации Ю. Л. Орлова) // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. – 2000. – № 5 (10). – С. 79–96.
2. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н. Минералогия древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1987. – № 1. – С. 90–96.
3. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н. Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 281–288.
4. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 361, № 3. – С. 366–369.
5. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логинова А. Н. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
6. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Тычков С. А. Проблема алмазоносности Сибирской платформы // Вестник Воронежского госуниверситета. Серия: Геология. – 2002. – № 1. – С. 19–36.
7. Бардухинов Л. Д. Особенности алмазов и состав включений в них как поисковые признаки на примере Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук / Бардухинов Леонид Даниилович. – Улан-Удэ : ГИН СО РАН, 2020. – 21 с.
8. Бардухинов Л. Д., Спеццус З. В., Липашова А. Н. Структурные дефекты и минеральные включения в алмазах из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского полей по данным КР- и ИК-спектроскопии // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 76–86.
9. Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2000. – № 3 (9). – С. 37–55.
10. Василенко В. Б., Толстов А. В., Кузнецова Л. Г., Минин В. А. Петрохимические критерии алмазоносности кимберлитовых месторождений Якутии // Геохимия. – 2010. – № 4. – С. 366–376.
11. Зинчук Н. Н. Сравнительная характеристика вещественного состава коры выветривания кимберлитовых пород Сибирской и Восточно-Европейской платформ // Геология и геофизика. – 1992. – № 7. – С. 99–109.
12. Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Яныгин Ю. Б. Особенности минерагении алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы). – М. : МГТ, 2004. – 172 с.
13. Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д. Стратегия ведения и результаты алмазопоско-



- вых работ // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
14. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Борис Е. И., Липашова А. Н. Типоморфизм алмазов из россыпей Сибирской платформы как основа поисков алмазных месторождений // Руды и металлы. – 1999. – № 3. – С. 18–30.
15. Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П. Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
16. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Крайнов А. В. Труды НИИ геологии Воронежского государственного университета. Выпуск 68. Кимберлиты в истории Земли. – Воронеж : ВГУ, 2013. – 99 с.
17. Кедрова Т. В., Богуш И. В., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Алмазы укугутской свиты россыпи Нюрбинская, Накынское кимберлитовое поле Сибирской платформы // Руды и металлы. – 2020. – № 2. – С. 69–77.
18. Кедрова Т. В., Богуш И. В., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Типоморфные свойства алмазов из дяхтарской толщи россыпи Нюрбинская (Сибирская платформа) // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. – 2020. – № 3. – С. 45–54.
19. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Кристаллохимические и структурные особенности глинистых минералов в корах выветривания в зависимости от типа исходных пород // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2001. – Т. 76, № 3. – С. 69–79.
20. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. – 2-е изд. – М. : Наука, 1984. – 264 с.
21. Соболев Н. В., Соболев А. В., Томиленко А. А., Кузьмин Д. В., Граханов С. А., Батанов В. Г., Логвинова А. М., Бульбак Т. А., Костровицкий С. И., Яковлев Д. А., Фёдорова Е. Н., Анастасенко Г. Ф., Ниженко Е. И., Толстов А. В., Реутский В. Н. Перспективы поисков алмазоносных кимберлитов в Северо-Восточной части Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 10. – С. 1701–1719.
22. Харьков А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов А. В., Богатых М. М. Петрохимия кимберлитов. – М. : Недра, 1991. – 304 с.
23. Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // Доклады Академии наук СССР. – 1987. – Т. 296, № 5. – С. 1228–1233.
24. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L. Diamond prospects in the Southwestern flank of the Tungusk Sineklise // Geology of ore Deposits. – 2005. – V. 47, № 1. – P. 45–62.
25. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform // Doklady Earth Sciences. – 2015. – V. 465, № 2. – P. 1297–1301.
26. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Comparative analysis of clay Mineral evolution under the Conditions of humid and arid Lithogenesis // Russian Geology and Geophysics. – 2008. – № 10. – P. 121–144.
27. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform // Petrology. – 2001. – V. 9, № 6. – P. 576–588.

References

1. Afanasiev V. P., Yeliseev A. P., Nadolinny V. A., Zinchuk N. N., Koptil V. I., Pilov G. M., Tomilenko A. A., Goryanov S. V., Yurieva O. P., Sonin V. M., Chepurov A. I. Mineralogiya i nekotorye voprosy genezisaalmazov V i VII raznovidnosti (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some issues of variety V and VII diamonds genesis (by classification of Y. L. Orlov)], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], No 5 (10), pp. 79–96. (In Russ.).
2. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N. Mineralogiya drevnikh rossypeialmazov vostochnogo borta Tunguskoi sineklizy [Minerageny of ancient placers of diamonds on the eastern side the Tunguska syncline], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1987, No 1, pp. 90–96. (In Russ.).
3. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N. Osnovnye litodinamicheskie tipy oreolov indikatornykh mineralov kимберлитов i obstanovki ikh formirovaniya [Main types of litodynamic tipe of kimberlite indication minerals and the conditions of their formation], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 1999, V. 41, No 3, pp. 281–288. (In Russ.).
4. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N., Koptil V. I. Poligenezalmazov v svyazi s problemoi korennykh rossypei

- severo-vostoka Sibirskoi platformy [Poligines of diamonds in connection with the problem of primary placers of the north-east of the Siberian platform], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1998, V. 361, No 3, pp. 366–369. (In Russ.).
5. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N., Loginova A. N. Osobennosti raspredeleniya rossypnykh almazov, svyazannykh s dokembriiskimi istochnikami [Distribution features of placer diamonds associated with the Precambrian source], *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the Russian Mineralogical Society]*, 2009, V. 138, No 2, pp. 1–13. (In Russ.).
 6. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N., Tichkov S. A. Problema almazonosnosti Sibirskoi platformy [The problem of dokembriy diamond content of the Siberian platform], *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya: Geologiya [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology]*, 2002, No 1, pp. 19–36. (In Russ.).
 7. Barduchinov L. D. Osobennosti almazov i sostav vklucheni v nikh kak poiskovye priznaki na primere Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo kimberlitovykh polei [Features of diamonds and the composition of inclusions in them as search signs on the example of the Nakyn and Alakit-Markhinsky kimberlite fields: abstract of candidate's thesis], Ulan-Ude, GIN SO RAN Publ., 2020, 21 p.
 8. Bardukhinov L. D., Spetsius Z. V. Strukturnye defekty i mineral'nye vklucheniya v almazakh iz kimberlitovykh trubok Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo polei po dannym KR- i IK-spektroskopii [Structural defects and mineral inclusion in diamonds from kimberlite pipes of the Nakyn and Alakit-Markhinsky fields a KR- and IR-spectroscopy], *Rudy i metall [Ores and Metals]*, 2018, No 4, pp. 76–86. (In Russ.).
 9. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Geodinamicheskii kontrol' razmeshcheniya kimberlitovykh polei tsentral'noi i severnoi chastei Yakutskoi kimberlitovoi provintsii (petrokhimicheskii aspekt) [Geodynamic control of kimberlite fields' allocation of central and northern part of Yakutian kimberlite province (petrochemical aspect)], *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya: Geologiya [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology]*, 2000, No 3 (9), pp. 37–55. (In Russ.).
 10. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Minin V. A., Tolstov A. V. Petrokhimicheskie kriterii almazonosnosti kimberlitovykh mestorozhdenii Yakutii [Petrochemical evaluation of the Diamond potentials of Yakutian kimberlite fields], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2010, V. 48, No 4, pp. 346–354. (In Russ.).
 11. Zinchuk N. N. Sravnitel'naya kharakteristika veshchestvennogo sostava kory vyvetrivaniya kimberlitovykh porod Sibirskoi i Vostochno-Evropeiskoi platformy [Comparative characteristics of material composition of kimberlite rocks' crusts of weathering of the Siberian and East-European platforms], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1992, No 7, pp. 99–109. (In Russ.).
 12. Zinchuk N. N., Boris E. I., Yanigin Yu. T. Osobennosti mineragenii almaza v drevnikh osadochnykh tolshchakh (na primere verkhnepaleozoiskikh otlozhenii Sibirskoi platformy) [Peculiarities of diamond mineralogene in ancient sedimentary talits by the example of the upper Paleozoic Sediments the Siberian platform], Moscow, MGT Publ., 2004, 172 p.
 13. Zinchuk N. N., Zuev V. M., Koptil V. I., Cherny S. D. Strategiya vedeniya i rezul'taty almazoposkovykh rabot [Diamond management strategy and results], *Gornyi vestnik [Mountain Bulletin]*, 1997, No 3, pp. 53–57. (In Russ.).
 14. Zinchuk N. N., Koptil V. I., Boris E. I., Lipashova A. N. Tipomorfizm almazov iz rossypei Sibirskoi platformy kak osnova poiskov almaznykh mestorozhdenii [Typomorphism of diamonds from placers of the Siberian platform as the basis for prospecting of diamond deposits], *Rudy i metall [Ores and Metals]*, 1999, No 3, pp. 18–30. (In Russ.).
 15. Zinchuk N. N., Melnik Yu. M., Serenko V. P. Apokimberlitovye porody [Apokimberlite rocks], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1987, No 10, pp. 66–72. (In Russ.).
 16. Zinchuk N. N., Savko A. D., Krainov A. V. Trudy NII geologii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Vypusk 68. Kimberlity v istorii Zemli [Kimberlites in the Earth history. Proceedings of VSU geological SRI. Tutorials. Is. 68], Voronezh, VGU Publ., 2013, 99 p.
 17. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D., Lipashova A. N. Almazny ukugutskoi svity rossypi Nyurbinskaya, Nakynskoe kimberlitovoe pole Sibirskoi platformy [Diamonds from the Ukugut suite of the Nyurbinskaya placer (Nakyn kimberlite field)], *Rudy i metall [Ores and Metals]*, 2020, pp. 69–77. (In Russ.).
 18. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D., Lipashova A. N. Tipomorfnye svoistva almazov iz dyakhtarskoi tolshchi rossypi Nyurbinskaya



- ya (Sibirskaya platforma) [Tipomorphic properties of Diamonds from the Nyurbinskaya placer (Sibiri-ans platform)], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 2020, No 3, pp. 45–54. (In Russ.).
19. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Kristallokhimicheskie i strukturnye osobennosti glinistyykh mineralov v korakh vyvetrivaniya v zavisimosti ot tipa iskhodnykh porod [Crystal-chemical and structural features of clay minerals in weathering crusts depending on the type of source rocks], *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologicheskii* [Bulletin of the Moscow Society of Nature Tests. Department Geological], 2001, V. 76, No 3, pp. 69–79. (In Russ.).
20. Orlov Y. L. Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond], Moscow, Nauka Publ., 1984, 264 p.
21. Sobolev N. V., Sobolev A. V., Tomilenko A. A., Kuzmin D. V., Grakhanov S. A., Batanov V. G., Logvinova A. M., Bulbak T. A., Kostrovitsky S. I., Yakovlev D. A., Fedorova E. N., Anastasenko G. F., Nikolenko E. I., Tolstov A. V., Reutsky V. N. Perspektivy poiskov almazonosnykh kimberlitov v Severo-Vostochnoi chasti Sibirskoi platformy [Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2018, V. 59, No 10, pp. 1701–1719. (In Russ.).
22. Charkiv A. D., Zuenko V. V., Zinchuk N. N., Krutchkov A. I., Uchanov A. V., Bogatich M. M. Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlite], Moscow, Nedra Publ., 1991, 304 p.
23. Chitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D. Primenenie klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonornostei vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster-analysis for clearing out regularities of various composition rocks' weathering], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1987, V. 296, No 5, pp. 1228–1233. (In Russ.).
24. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L. Diamond prospects in the Southwestern plunk of the Tungusk Sineklise, *Geology of ore Deposits*, 2005, V. 47, No 1, pp. 45–62.
25. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform, *Doklady Earth Sciences*, 2015, V. 465, No 2, pp. 1297–1301.
26. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Comparative analysis of clay Mineral evolution under the Conditions of humid and arid Lithogenesis, *Russian Geology and Geophysics*, 2008, No 10, pp. 121–144.
27. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform, *Petrology*, 2001, V. 9, No 6, pp. 576–588.

Авторы

Зинчук Николай Николаевич

доктор геолого-минералогических наук
профессор, академик АН РС (Я)
главный научный сотрудник
nnzinchuk@rambler.ru

Бардухинов Леонид Даниилович

кандидат геолого-минералогических наук
заведующий лабораторией
BardukhinovLD@alrosa.ru

Научно-исследовательское геологическое предприятие
(НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО)»,
г. Мирный

Authors

Zinchuk Nikolay Nikolaevich

PhD
Professor, Academician
Chief researcher
nnzinchuk@rambler.ru

Bardukhinov Leonid Danilovich

PhD
Head of laboratory
BardukhinovLD@alrosa.ru

JSC ALROSA (PJSC)
Mirny, Russia