DOI:10.47765/0869-7175-2020-10030

УДК 549.211:550.812.1:552.12:552.323.6:553.81
© Коллектив авторов, 2020

Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовой трубки Заря (Западная Якутия)

Р.Ф.САЛИХОВ, К.В.ГАРАНИН, А.В.ТОЛСТОВ, О.Е.КОВАЛЬЧУК, В.К.ГАРАНИН, В.В.ПОЛЯНИЧКО, А.Ю.НИКИФОРОВА (АК «АЛРОСА» (ПАО); 678175, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ленина, 6)

Приводятся сведения о геологической и тектонической позициях нового коренного месторождения алмазов с беднотоварными рудами – трубки Заря в Алакит-Мархинском кимберлитовом поле Якутской алмазоносной провинции (Западная Якутия), данные о геологическом строении диатремы, вещественном составе и алмазоносности слагающих её кимберлитов. Рассмотрены факторы, определяющие вертикальную и латеральную неоднородность вещественно-индикационных характеристик кимберлитов, индикаторных минералов, алмазов. Сделан вывод об улучшении качества алмазов и их содержаний с глубиной.
Ключевые слова: кимберлит, вещественный состав, индикаторные минералы кимберлита, алмаз.

Салихов Равиль Фанисович — salikhovrf@alrosa.ru

Гаранин Константин Викторович
кандидат геолого-минералогических наук — garaninkv@alrosa.ru

Толстов Александр Васильевич
доктор геолого-минералогических наук — tolstovav@alrosa.ru

Ковальчук Олег Евгеньевич
кандидат геолого-минералогических наук — kovalchukoe@alrosa.ru

Гаранин Виктор Константинович
доктор геолого-минералогических наук — garaninvk@alrosa.ru

Поляничко Виталий Викторович — anjef@mail.ru

Никифорова Анна Юрьевна — nikiforovaay@alrosa.ru

Geology and mineral composition of Zarya kimberlite pipe, western Yakutia

R.F.SALIKHOV, K.V.GARANIN, A.V.TOLSTOV, O.E.KOVALCHUK, V.K.GARANIN, V.V.POLYANICHKO, A.Yu.NIKIFOROVA (PJSC ALROSA)

The geological and tectonic settings of new primary low-grade diamond deposit, the Zarya pipe (Alakit-Markhinsky kimberlite field, Yakutian diamond province, Western Yakutia, Russia), are discussed. Data on the geological structure of the diatreme, mineral composition and kimberlite diamond content is presented. The factors determining the vertical and lateral heterogeneity of the mineral-indicative characteristics of kimberlites, diamond assemblage minerals, and diamonds are considered. It is concluded that diamond quality and grades increase with depth.
Key words: kimberlite, mineral composition, kimberlitic indicator minerals, diamond.

Кимберлитовая трубка Заря расположена в Западной Якутии, в 2 км от пос. Айхал. Кимберлитовое тело имеет сложное строение и различную степень алмазоносности слагающих его интрузивных фаз. При выявлении в 1974 г. оно имело статус алмазопроявления, однако в ходе доразведки и подготовки ТЭО временных кондиций был переоценён его потенциал, доказана рентабельность отработки в современных условиях, и с 2019 г. начато его промышленное освоение. По геолого-экономическим показателям, особенностям состава, строения и уровню алмазоносности рудное тело относится к беднотоварным, существенно отличаясь от известных промышленных месторождений – трубок Айхал,

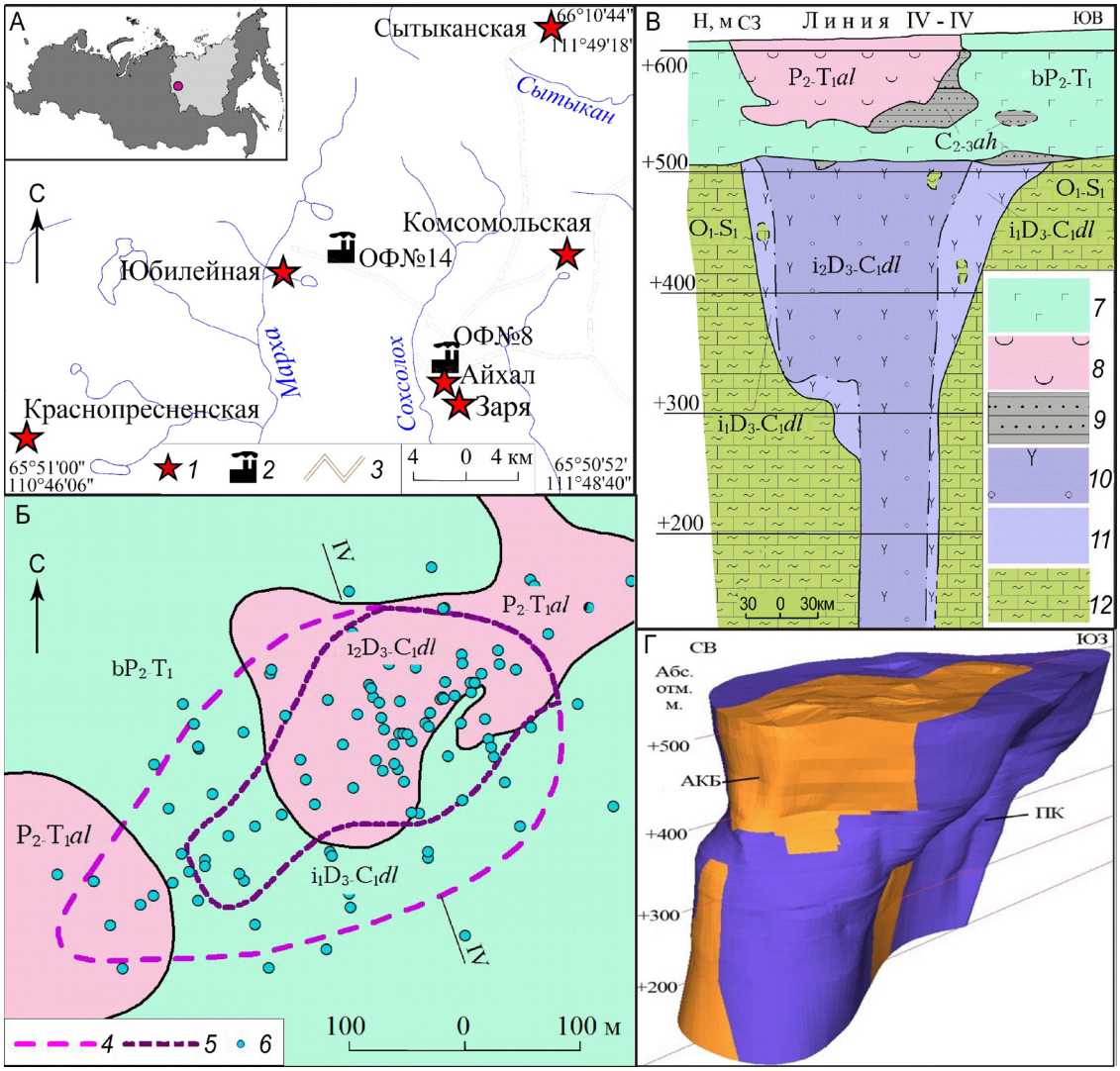


Рис. 1. Обзорная схема (А), геологический план (Б), поперечный разрез через центральную часть (В) и 3D-модель (Г) кимберлитовой трубки Заря:

А – *1* – коренные месторождения алмазов, *2* – обогатительные фабрики, *3* – дороги; Б – *4* – проекция выхода трубки под перекрывающими образованиями, *5* – проекция выхода центрального рудного столба под перекрывающими образованиями, *6* – скважины; В – *7* – поздняя пермь–ранний триас, bP_2–T_1, катангский комплекс долеритов; *8* – верхняя пермь–нижний триас, алакитская свита, P_2–T_1al, туфы основного состава; *9* – средний–верхний карбон, айхальская свита, $C_{2-3}ah$, песчаники, алевролиты; *10, 11* – поздний девон–ранний карбон, далдыно-алакитский кимберлитовый комплекс, автолитовые (туффизитовые) кимберлиты II фазы (АК, 4), i_2D_3–C_1dl и порфировые кимберлиты I фазы (ПК, 5), i_1D_3–C_1dl; *12* – нижний ордовик–нижний силур, O_1–S_1, известняки, доломиты, мергели

Юбилейная, Сытыканская, а по качеству сырья сравнимо с трубкой Комсомольская. Актуальные задачи – обобщение материалов по геологии и особенностям вещественного состава месторождения, определение связи минералого-геохимических характеристик кимберлитов с количественными и качественными показателями алмазоносности: содержанием и стоимостью полезного компонента. Решение этих вопросов позволяет сформулировать вещественно-индикационные критерии алмазоносности кимберлитового тела, которые следует использовать при проведении геологоразведочных работ (ГРР) на алмазы на других объектах. Рассмотрены материалы ГРР и научно-аналитических работ, условия локализации и геологического строения трубки Заря, петрология и минералогия месторождения. Изучение

объекта проводилось АК «АЛРОСА» (ПАО), аналитические работы выполнены в Научно-исследовательском предприятии (НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО). На основании анализа результатов работ сформулированы вещественно-индикационные критерии алмазоносности месторождения.

Условия локализации. Месторождение алмазов трубка Заря расположено на юго-восточном фланге Алакит-Мархинского кимберлитового поля (АМКП), являющегося частью Далдыно-Алакитского алмазоносного района (ДААР) Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). Находится в зоне деятельности Айхальского горно-обогатительного комбината (АГОК) АК «АЛРОСА» (ПАО), в 3 км от обогатительной фабрики (ОФ) № 8 (рис. 1), на которой до 2020 г. обрабатывалась руда кимберлитовых трубок Айхал и Комсомольская. Согласно ТЭО, расположение месторождения вблизи АГОКа опредяет рентабельность отработки месторождения открытым способом до глубины 300 м. В дальнейшем возможна переработка руды и на ОФ № 14, в 14 км к северо-западу (вблизи от месторождения трубка Юбилейная).

В региональном плане территория района расположена в зоне сочленения северо-восточного борта Тунгусской синеклизы с юго-западным склоном Анабарской антиклизы. В её строении выделяются два структурных этажа: кристаллический фундамент и перекрывающий платформенный чехол, резко различающиеся по строению и времени формирования. В геологическом строении района участвуют нижне- и верхнепалеозойские отложения, туфогенные образования пермо-триаса и полигенные четвертичные образования.

В пределах ДААР установлены две эпохи магматизма: среднепалеозойская и позднепалеозойская–раннемезозойская. Формирование кимберлитовых тел района связано со среднепалеозойской позднедевонской–раннекаменноугольной (D_3–C_1) эпохой. Основной формой кимберлитовых тел являются трубки взрыва (диатремы), жилы, дайки и отторженцы – блоки кимберлитов, перемещённые от основных тел по латерали (до 1 км) и вертикали (до 100 м). В АМКП установлено 98 кимберлитовых тел общей площадью около 258 га, представленных следующими формами: 63 тела трубочной формы, 20 сопряжённых с ними жил, 7 обособ- ленных жил, 2 дайки и 6 отторженцев от основных тел. Размеры кимберлитовых трубок по площади варьируют от 0,1 до 55,9 га, средний размер составляет 3,6 га.

Кимберлиты представлены кимберлитовыми брекчиями с массивной текстурой (КБ), автолитовыми (туффизитовыми) кимберлитами (АК) и порфировыми кимберлитами (ПК). КБ, ПК и АК встречаются чаще всего в трубках, туфы и туфобрекчии – в минимально эродированных трубах, ПК – в телах жильной формы. Большинство кимберлитовых тел, как правило, имеет сложную структуру и состоит, по меньшей мере, из двух–трёх разновидностей.

В позднепалеозойскую–раннемезозойскую эпоху (P_2–T_1) внедрялись субвулканические интрузивные образования долеритов – пластовые интрузии (силлы), реже субвертикальные дайки, являющиеся подводящими каналами силлов. Взаимоотношение долеритовых силлов с кимберлитами разнообразное – от налегания до секущего. В районе месторождения картируется Айхальский силл долеритов мощностью 14–112 м [14], налегающий на кимберлиты почти на всей площади трубки (см. рис. 1). Уникальной особенностью силла является наличие самородного железа в виде желвакообразных сегрегаций весом до 400 кг. По петрохимическим показателям долериты силла относятся к катангскому комплексу долеритов [12].

Кимберлитовые тела прорывают терригенно-карбонатные нижнепалеозойские (венд-силурийские) отложения, а перекрываются, в зависимости от эрозионного среза, терригенными пермско-каменноугольными отложениями, четвертичными образованиями различного генезиса и силлами долеритов. Расположение кимберлитов в пределах АМКП контролируется разломами различного порядка и ориентировки, активизировавшимися в эпоху кимберлитового магматизма. На территории поля установлено около 10 достоверных и прогнозируемых рудовмещающих разрывных нарушений северо-восточной ориентировки. Тектонические зоны рудовмещающих нарушений подтверждаются в разрезе нижнепалеозойских осадочных пород зонами интенсивной трещиноватости, дробления и широко развитыми проявлениями карста. Эрозионный срез кимберлитовых тел АМКП, по разным оценкам, варьирует от 200 до 650 м, а, по уточнённым данным, он составляет ~475 м [9]. Тем не менее, величину эрозионного среза следует считать относительной, учитывая, что в трубках Краснопресненская, Юбилейная и Айхал в разной степени сохранились вулканические (кратерные) фации, представленные слоистыми осадочными образованиями раннекаменноугольного возраста, кимберлитовыми туфами, туфобрекчиями и такситовыми кимберлитами [16].

История геологического изучения. Поиски алмазов в ДААР начались в 1952 г. В ходе поисков территория была покрыта кондиционными геологическими съёмками масштабов 1:200 000, 1:50 000 и 1:25 000. В 1955 г. в исследуемом районе были открыты кимберлитовые трубки Сытыканская и Маршрутная, а в 1960 г. – трубка Айхал. Вся территория покрыта аэромагнитными съёмками (АМС) различного

масштаба, в том числе современной высокоточной АМС масштаба 1:10 000, выполнены гравиразведочные работы и электроразведочные работы с применением метода переходных процессов (МПП) масштаба 1:20 000. Большая часть территории отнесена к «закрытой», поэтому с начала 1960-х годов и по настоящее время выполняются площадные поиски масштаба 1:10 000 с применением колонкового бурения. За 60 лет, кроме трубок Айхал и Сытыканская, были открыты ещё два коренных месторождения алмазов: трубки Комсомольская (1974) и Юбилейная (1975). Важным открытием стало выявление трубки Краснопресненская (1984), характеризующейся повышенными концентрациями алмазов низкого качества, вследствие чего трубка отнесена к беднотоварным месторождениям.

Трубка Заря выявлена в 1973 г. при проведении поисковых работ по сети 500×500 м и изучена на глубину до 100 м. По данным кернового опробования (общий вес проб 4,5 т) установлена низкая алмазоносность трубки (0,09 кар/т) с вариациями по пробам от 0 до 0,9 кар/т. В ряде проб отмечены повышенные содержания и кристаллы алмаза высокого качества, что позволило предположить наличие в трубке богатого рудного столба с высоким качеством алмазов и промышленной алмазоносностью.

В 2009–2015 гг. на трубке был выполнен комплекс разведочных работ с бурением вертикальных и наклонно-направленных скважин по сети 80×40 и 40×40 м с углубкой в кимберлиты на 400 м. Выполненные работы подтвердили наличие двух фаз кимберлитов, слагающих центральный рудный столб (ЦРС, II фаза внедрения) со средним содержанием алмазов 0,28 кар/т и фланги месторождения (кимберлиты I фазы) с содержанием 0,10 кар/т. По результатам проведённых работ выполнен подсчёт алмазов с использованием временных разведочных кондиций для блоков кимберлитов ЦРС по категории C_1 до горизонта +300 м, по категории C_2 – для блоков ЦРС горизонта +300–+100 м и для блоков кимберлитов I фазы на флангах месторождения от поверхности трубки до горизонта +100 м.

Особенности строения месторождения. Трубка Заря имеет в плане форму эллипса северо-восточного простирания (азимут 56°), полностью перекрыта толщей отложений трапповой формации (долеритами и туфами) с крупными блоками терригенных пород (см. рис. 1). Мощность перекрывающих отложений колеблется от 97 до 113 м (в среднем 105 м). Поверхность трубки неровная, пологоволнистая, северо-западный фланг трубки приподнят относительно юго-востока на 7–16 м. Абсолютные отметки дневной поверхности над трубкой от +597 м до +615 м, в среднем +607 м.

Под перекрывающими породами размеры трубки составляют 480×260 м, с глубиной они уменьшаются, а форма трубки становится гантелевидной с расширением в северо-восточной части. В трубке выделяется центральный рудный столб (ЦРС) с параметрами 350×(180–60) м. На глубине 400 м (горизонт +100 м) площадь ЦРС сокращается наполовину по сравнению с погребённой поверхностью, коэффициент изометричности (соотношение длинной и короткой оси) возрастает от 2,2 до 3,3. Промышленный интерес представляет только ЦРС.

Контакты трубки с вмещающими породами чёткие, углы падения их направлены к центру и составляют: 55°–76° в северо-западной части, 40°–55° в юго-восточной, 80°–90° в юго-западном борту и в целом ниже +300 м. Исключение – северо-восточный борт, где контакт рудного тела до горизонта +360 м падает к центру трубки под углом 86°, ниже этой отметки падение от центра с углами от 67° до горизонта +300 м до 75° глубже.

В приконтактовых зонах кимберлитов отмечаются ксенолиты вмещающих карбонатных пород размером от первых метров до блоков 10×30 м, что наиболее характерно для юго-западного фланга. В центральном рудном столбе, кроме редких ксенолитов вмещающих пород, наблюдаются блоки порфировых кимберлитов размером от первых метров до 35 м.

В зоне контакта трубки с вмещающими породами отмечаются зоны дробления карбонатных пород мощностью до первых десятков метров, вмещающие инъекции кимберлитов, вскрытая мощность которых достигает 8,8 м. Вмещающие породы в зоне контакта с кимберлитовым телом характеризуются повышенной трещиноватостью, наличием зеркал скольжения, ожелезнением, кальцитизацией и сульфидизацией карбонатных пород.

Петрология кимберлитов. Трубка Заря сложена двумя типами кимберлитов, сформировавшихся в разные фазы внедрения и отличающихся вещественным составом, уровнем алмазоносности, содержанием и составом минералов тяжёлой фракции. В первую фазу сформировались слабоалмазоносные ПК, слагающие северо-западный, юго-восточный и юго-западный фланги, а во вторую фазу образовались промышленно-алмазоносные АК ЦРС. Кимберлиты трубки характеризуются размытостью текстурно-структурных признаков, отсутствием чётких контактов между фазами, что особенно проявлено в приповерхностной зоне. С глубиной рисунок породы становится чётче (рис. 2).

С глубиной отмечается смена окраски кимберлитов от красноватой, рыжевато-коричневой в приповерхностных частях трубки до серого и зеленовато-серого – на глубоких горизонтах. Смена цвета

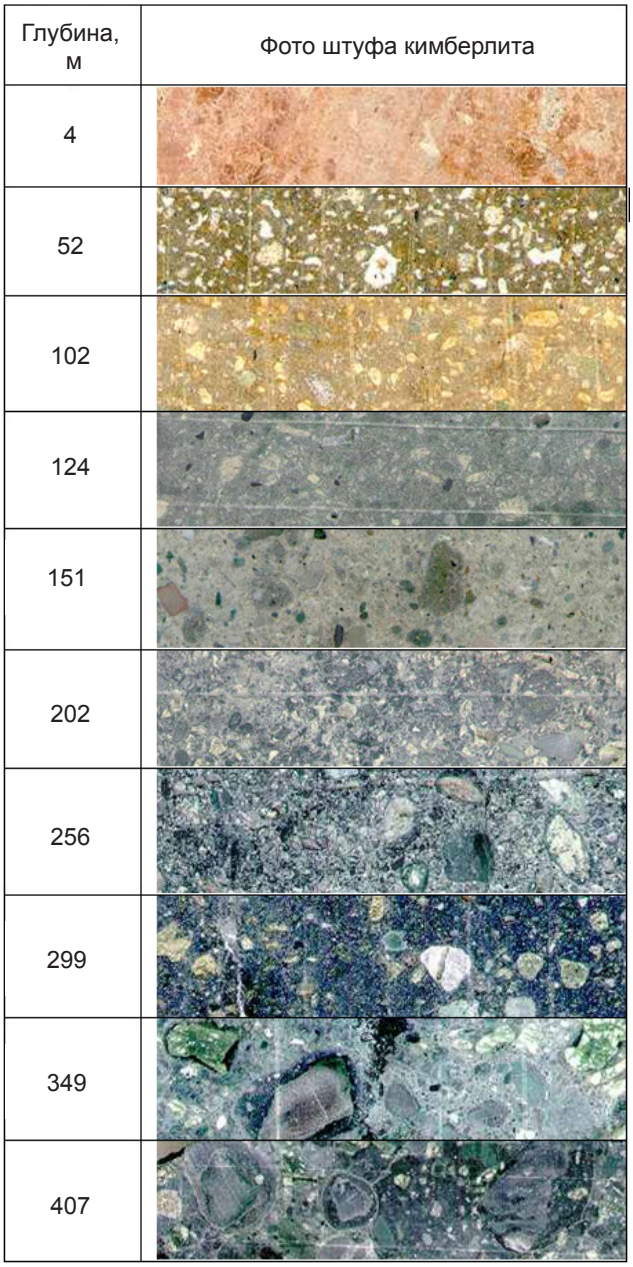


Рис. 2. Петрографическая колонка

корреспондируется с долей нормативного пирита (CIPV): от поверности трубки до глубины 100–120 м содержания нормативного пирита весьма низкие (в среднем 0,05% при максимальном содержании 0,11%), а с глубины 120 м его доля возрастает до 0,45 масс.% (достигая максимума 1,61 масс.%). Это свидетельствует об окислении пирита в верхних горизонтах, что нашло отражение в окраске кимберлита (см рис. 2). Псевдоморфозы по оливину II генерации (размер до 1 мм) по составу аналогичны псевдоморфозам по оливину первой генерации овальной формы, выполнены тем же серпентином, что характерно для кимберлитов [22, 23]. Для ПК характерно низкое содержание ксеногенного материала – обломков осадочных (в среднем 4%) и мантийных (0,6%) пород. Содержание ксенолитов метаморфических пород в ПК составляет менее 1%. Такие ксенолиты обнаруживаются в виде мелких единичных обломков, диаметр которых не превышает 1 см.

Порфировые кимберлиты (ПК) – породы светло-серого цвета с бледно-голубоватым или рыжеватым оттенком. Структура мелко- и среднепорфировая, текстура массивная, реже флюидальная. Крупнопорфировые кимберлиты с преобладающим количеством псевдоморфоз по оливину I генерации (размер обычно более 1, реже более 4 мм) представлены единичными образцами. Выделения оливина присутствуют в количестве 13–38% (в среднем 22,9%), имеют овальную, угловато-сглаженную, изредка угловатую форму, полностью серпентинизированы. Распределение вкрапленников в породе относительно равномерное. Псевдоморфозы резко выделяются на фоне основной массы, выполнены светло-, тёмно-зелёным и буроватым серпентином. Вместо вкрапленников иногда отмечаются каверны выщелачивания серпентина, который сохранился в виде корочек по стенкам пустот.

Автолитовые кимберлиты (АК) имеют серый цвет, содержат около 11% ксенолитов осадочных пород. Размер обломков от 0,5 до 3 см, формы их овальные либо угловато-сглаженные, окраска тёмно- и светло-серого цвета (реже тёмно-зелёного). Представлены обломки глинисто-карбонатными породами, распределёнными в породе равномерно. Текстура АК брекчиевидная, основной массы – мелко-среднепорфировая, участками отмечена шаровая текстура. Сферотакситовая оболочка располагается по периферии псевдоморфоз и ксенолитов осадочных пород в виде мелких шарообразных обособлений микрозернистого строения и переменной мощности более тёмного, чем основная масса, цвета и включает в себя псевдоморфозы по оливину II генерации. Псевдоморфозы по оливину-I выполнены зеленовато-серым и буроватым серпентином при подчинённой доле кальцита. Их содержание заметно ниже по сравнению с порфировыми кимберлитами и составляет около 20%.

Различие выделенных типов пород проявляется в содержании псевдоморфоз по оливину и ксенолитов осадочных пород, а также оливина разных генераций. В АК зёрен оливина II генерации класса (<1 мм) больше, чем в ПК (в среднем около 56%) от общего содержания макрокристов оливина I генерации (размером >1 мм), а содержание мегакристов оливина (класс +4–8 мм) в АК, напротив, ниже, чем в ПК. Постоянство соотношений оливина разной размерности

1. Параметры распределения основных компонентов (вес.%) в кимберлитах трубки Заря

Компоненты	Автолитовые кимберлиты					Порфировые кимберлиты
	Горизонт, м					
	Поверхность–+490	+490–+400	+400–+300	+300–+200	+200–+100 м	+490–+100 м
SiO_2	26,02	25,23	25,09	27,63	27,52	26,96
TiO_2	1,29	1,41	1,54	1,58	1,46	1,83
Al_2O_3	1,77	1,97	2,04	1,9	1,76	2,22
$FeO_{общ}$	6,54	6,16	7,33	8,16	10,87	8,21
CaO	21,55	19,7	17,85	13,37	10,69	13,74
MgO	18,61	21,45	22,84	26,62	28,25	25,88
MnO	0,09	0,08	0,12	0,12	0,12	0,11
K_2O	0,17	0,31	0,41	0,28	0,26	0,38
Na_2O	0,07	0,08	0,1	0,14	0,18	0,19
P_2O_5	0,37	0,35	0,43	0,37	0,34	0,57
S	0,02	0,11	0,24	0,15	0,16	0,24
ППП	20,16	21,31	20,29	18,59	18,08	21,59
Сумма	96,66	98,16	98,28	98,91	99,69	101,9
N	12	24	25	23	16	21
D	0,20	0,29	0,29	0,24	0,18	0,13

Примечание. N – число изученных образцов, D – содержания алмазов, кар/т; метод анализа: ICP-MS, IRIS Intrepid Duo и iCAP 6300Duo, выполнено в НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО).

в пределах одного типа, по-видимому, обусловлено его генетической индивидуальностью, отражающей термодинамические условия кристаллизации. Разница, вероятно, свидетельствует о разных режимах этапов кимберлитообразования и дефиците оливиновой составляющей на завершающих фазах становления интрузий. Явных признаков изменения кимберлитов под воздействием термального прогрева силла долеритов (минимальная температура расплава оценивается по наличию самородного железа в 1538° С), как и замещения пикроильменита жёлто-коричневым анатазом, отмечавшегося в кимберлитах скарновой зоны трубки Краснопресненская, на трубке Заря не установлено, но воздействие силла на её верхнюю часть, очевидно, имело масштабные проявления. При этом отсутствует типичный скарновый минерал – гранат гроссуляр-андрадитового состава, характерным является наличие перовскитовых оболочек вокруг пикроильменита.

Ксенолиты мантийных пород присутствуют весьма ограниченно; как правило, это мелкие включения в основной массе, и вследствие их редкой встречаемости по ним не было выполнено специализированных исследований.

Особенности химического состава кимберлитов трубки Заря изучены в тех же 121 образцах, по которым осуществлялся макропетрографический анализ. Для кимберлитов характерны широкие вариации состава (табл. 1). При схожести содержаний основных по родообразующих оксидов Ca, Mg и Fe по всем этим элементам фиксируется разброс содержаний в различных образцах на 2–3 и более весовых процентов. Содержание CaO варьирует от 5,28 до 26,78 масс.%, что связано с различной степенью карбонатизации. Во всех образцах зафиксировано высокое содержание TiO_2 (от 0,73 до 2,41 масс.%), коррелирующееся с высоким содержанием ильменита и титаномагнетита в составе основного матрикса. Повышенное содержание P_2O_5, превышающее 0,3 масс.%, достигает в отдельных образцах 0,78 масс.%.

Кимберлиты относятся к Fe-Ti (среднетитанистому) низкокалиевому петрохимическому типу ($FeO_{общ}$ 6–9, K_2O <1 и TiO_2 1–2,5%), к которому относятся коренные месторождения алмазов Якутии – высоко-, средне- и умеренноалмазоносные трубки Мир, Удачная, Зарница, Юбилейная, Сытыканская, Комсомольская, трубки Верхне-Мунского поля. Прямая положительная корреляция изменения с глубиной

2. Сравнение средних содержаний (в ‰) и индикаторных отношений характерных элементов кимберлитов трубки Заря и различных геохимических типов кимберлитов

Компоненты	Кимберлиты N типа			Кимберлиты D типа	
	Заря, АКБ +490–+100 м (88)	Заря, ПК (21)	Традиционные алмазоносные районы Якутии (91)[2]	Средне-Мархинский район Якутии (42)[2]	Золотицкое поле, Архангельская область (17)[2]
Nb	113	150	123	25	39
Zr	110	149	129	75	100
Ce	119	154	145	33	55
Y	10	11	11	10	14
U[1]	1,8	5,0	2,3	0,6	0,6
Th[1]	9,0	922	10,5	1,5	4,1
Sr	538	10971	915	627	415
Ba	541	1,0	703	427	708
Ti	8992	13,7	5627	3036	5555
Zr/Nb	1,0	1,0	1,0	3,0	2,5
Ce/Y	12,4	13,7	13,6	3,4	3,9
Th/U	5,1	3,0	4,5	2,3	7,1

Примечание. [1]Содержания по данным применения геофизического исследования скважин; [2]данные по [10]; в скобках – число проб.

устанавливается для содержаний алмазов и Al_2O_3, K_2O, (Na_2O+K_2O), П.П.П., в меньшей степени с Rb, когерентного с K, но с сохранением тенденции – S, P_2O_5; отрицательная корреляция устанавливается у TiO_2 и SiO_2.

Полученные данные корреспондируются с установленными корреляционными зависимостями между алмазоносностью кимберлитов в коренных месторождениях алмазов ЯАП и содержаниями TiO_2, Al_2O_3 и K_2O [3, 5]. Как индикатор может рассматриваться отрицательная связь алмазоносности с TiO_2 и положительная с K_2O. С глубиной выявлен устойчивый рост средних содержаний $FeO_{общ}$, MgO, Na_2O и Pb, независимый от содержания алмазов. Прямо противоположная тенденция характерна для CaO. По содержаниям редких и радиоактивных элементов (Nb, Ta, Zr, Ce, Th, U) и Ti кимберлиты трубки Заря относятся к кимберлитам N типа (табл. 2) [10].

Петрофизические характеристики кимберлитов. Физические свойства кимберлитов трубки Заря, перекрывающих и вмещающих пород в их естественном залегании изучены по результатам геофизических исследований скважин (ГИС) в десятках поисковых и разведочных выработок. Кроме того, исследования физических свойств были проведены на 723 образцах горных пород трубки в лабораториях Амакинской ГРЭ (аналитик А.А.Киргуев) и института «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА (ПАО). На фоне вмещающих и перекрывающих пород кимберлиты выделяются по физическим свойствам: с перекрывающими долеритами контакты определяются по радиоактивности, от вмещающих пород – по более высоким магнитным свойствам и Th/K отношению (табл. 3).

При широких вариациях значений физических свойств АК отличаются от ПК повышенной плотностью, магнитной восприимчивостью и более низкой радиоактивностью. Для АК отмечены максимальные значения естественной остаточной намагниченности (ЕОН) (среднее 573,4 мАм при диапазоне 14,8–9087,0 мАм) и отношения Кёнигсбергера (фактор Q) 0,85 при колебаниях от 0,1 до 19 ед., которые свидетельствуют о высокой концентрации магнитных минералов. Отмечена слабая положительная корреляционная связь между алмазоносностью и магнитной восприимчивостью. В этом плане уместно сравнение параметров в кимберлитах различных фаз трубок Заря и Комсомольская. Средние содержания алмазов в трубке Заря составляют (в кар/т): в ПК – 0,05, в АК – 0,26, в трубке Комсомольская – 0,05 и 0,31, соответственно, при средней магнитной восприимчивости ПК трубки Комсомольская

3. Физические свойства кимберлитов трубки Заря, перекрывающих и вмещающих пород в их естественном залегании (по результатам ГИС) и в образцах

Порода	δ, г/см³ (образцы)	æ, ×10⁻⁵ ед. СИ		γ, мкР/ч (ГИС)	Содержание элементов (ГИС)		
		образцы	ГИС		Th	U(Ra)	K, %
Кимберлиты							
АК	2,17–2,57 2,39	76–5534 1846	500–7500	4,5–8,0	4,5–12,0	1,0–6,0	0,01–0,5
ПК	2,16–2,48 2,36	15–5510 1315	900–8000	8,0–15,0	8,0–20,0	2,5–7,5	0,1–1,0
Вмещающие							
Известняк	2,29–2,31 2,30	15–56,5 36,0	3,0–12,0 6,8	1,4–4,0 2,6	0,1–5,0 1,0	0,1–4,0 0,8	0,1–3,3 0,8
Доломит	2,52–2,70 2,61	7,3–7,8 7,5	2,5–12,0 5,8	3,0–8,0 5,1	0,2–5,0 2,2	0,1–4,2 1,6	0,1–3,0 1,1
Глинистые разности	2,3–2,63 2,48	–	1,5–30 14,7	3–14 8,6	0,1–12 5,7	0,1–7,5 1,8	0,1–5,0 1,9
Перекрывающие							
Долерит	2,80–2,94 2,87	–	350–2600 1525	1,0–2,2 1,8	–	–	–
Туф	2,27–2,43 2,36	–	97–315 206	1,8–6,7 3,2	–	–	–

Примечание. δ – объёмная плотность, æ – магнитная восприимчивость, γ – общая радиоактивность, содержания Th и U(Ra) – в 10^{-4}%.

339×10⁻⁵ ед. СИ, АК – 2666×10⁻⁵ ед. СИ [2]. При близких значениях отношений алмазоносности АК:ПК – 4,8 и 6,2 в трубках Заря и Комсомольская, по магнитной восприимчивости кимберлиты трубки Комсомольская различаются более контрастно: отношение АК:ПК равно 7,9 против 1,4 для кимберлитов Зари.

Минеральный состав. ***Породообразующие минералы.*** Различия в химизме кимберлитов подтверждаются широкими вариациями минерального состава основной массы и главных минералов: серпентина, кальцита и хлорита. Значительная роль контаминации в изменении вещественного состава прикровлевой части кимберлитов подтверждается результатами рентгено- и термографического анализа (табл. 4). Снижение количества кальцита с глубиной сопровождается ростом содержаний «ювенильных» минералов – серпентина, флогопита, слюд; в поверхностной части трубки наблюдается повышение вторичных минералов (тальк, смектит, сапонит, кварц и др.), максимальные содержания которых в центральной части ЦРС достигают: смектита – 17–50 и талька 9–20%. Неравномерное распределение «ювенильных» и новообразованных вторичных минералов подтверждается высокими вариациями их значений и стандартных отклонений, что свидетельствует об изменчивости количества исходных кимберлитов трубки по вертикали и латерали.

Максимальная изменчивость характерна для поверхностного горизонта, перекрытого силлом долеритов, где вторичные преобразования носят очаговый характер. Неравномерность распределения по латерали и вертикали вторичных минералов, влияющих на технологические свойства и извлекаемость алмазов, может существенно исказить параметры средних содержаний и гранулометрию извлекаемых алмазов, что необходимо учитывать при отработке месторождения. Корреляция алмазоносности в кимберлитах с явными признаками вторичных изменений отмечается в кимберлитовых телах, в частности в трубках Накынского кимберлитового поля [4, 5].

Акцессорные и ультраакцессорные минералы. Средний вес тяжёлой фракции, по данным проведённых исследований, составляет (в кг/т): для ПК – 52,17 (от 16,58 до 101,80), для АК – 59,02 (от 3,80 до 307,40). Столь значительные вариации содержаний тяжёлой фракции обусловлены неравномерным содержанием вторичного магнетита, содержание которого по пробам достигает 83%. В АК содержание минералов тяжёлой фракции выше на 13%, ПК характеризуются

4. Результаты рентгено- и термографического анализа образцов кимберлитовых пород трубки Заря

Параметры	Горизонт, м	N	Условные содержания, %												
			Серпентин	Флогопит, слюда	Хлорит	Тальк	Смектит (сапонит), монтмориллонит	Кальцит	Доломит	Кварц	Полевые шпаты	Пироксен, амфибол	Магнетит	Гематит, пирит, перовскит	Апатит, хантит, галит
Автолитовый кимберлит															
С	Поверхность–+490	15	17	1	2	2	5	65	0	3	1	1	1	0	1
	+490–+400	22	17	0	3	0	0	77	0	1	0	0	0	0	0
	+400–+300	25	20	4	3	0	0	67	2	0	0	1	1	0	1
	+300–+100	15	27	4	8	0	0	55	0	1	0	0	4	0	0
S	Поверхность–+490	15	15	2	2	5	13	23	1	9	2	3	2	1	1
	+490–+400	22	10	1	3	0	0	11	0	2	0	0	1	0	1
	+400–+300	25	9	9	3	0	1	14	9	1	0	4	1	1	1
	+300–+100	15	11	2	8	0	0	16	0	2	0	0	9	1	1
Max	Поверхность–+490	15	56	6	5	20	50	88	3	36	6	10	6	2	3
	+490–+400	22	37	2	11	0	0	95	1	7	0	1	4	2	2
	+400–+300	25	40	43	10	0	5	88	47	2	1	21	5	2	2
	+300–+100	15	46	8	25	0	0	92	0	9	0	1	34	3	2
Порфировый кимберлит															
С	Поверхность–+490	6	21	1	1	0	8	64	0	0	1	0	1	1	1
	+490–+300	17	16	2	3	0	1	71	6	0	0	0	0	0	0
	+300–+100	16	21	2	3	0	0	66	6	0	0	0	0	0	0
S	Поверхность–+490	6	8	2	1	0	18	17	0	0	1	0	1	1	1
	+490–+300	17	10	3	3	0	2	20	23	0	0	0	1	0	1
	+300–+100	16	8	3	4	0	0	19	19	0	0	0	1	1	0
Max	Поверхность–+490	6	31	4	3	0	45	89	0	1	3	0	3	2	2
	+490–+300	17	41	12	9	0	9	91	93	1	0	0	2	1	3
	+300–+100	16	38	10	15	0	0	85	75	0	0	1	3	2	1

Примечание. Аналитики Л.В.Лисковая, Е.Ю.Артёмова, дифрактометр ARLX`TRA CuKa-излучение, V=40 кв, J=40 ма, термоанализатор DTA-60AH *T*=1200°C; статистические параметры: N – число анализов, C – среднее и S – стандартное отклонение, Max – максимальное значение.

пониженным содержанием пиропа и пироксенов при более высоком содержании альмандина по сравнению с АК. Особенность пород в резком преобладании пикроильменита над пиропом отсутствие неизменённого оливина и редкие находки хромшпинелидов (табл. 5).

Состав индикаторных минералов кимберлитов (ИМК). Основные ИМК – гранат, пикроильменит и хромшпинелиды – изучались на электроннозондовом микроанализаторе JEOL-8600 Super Probe (аналитик А.С.Иванов, ЦАЛ НИГП ПАО «АЛРОСА»). Их составы расклассифицированы на соответствующие парагенезисы и химико-генетические группы по известным классификациям Н.В.Соболева [13, 22] и В.К.Гаранина и др. [7] с построением диаграмм для каждого минерала и выделением групп алмазного парагенезиса.

Гранаты. Изучены химические составы 65 зёрен граната из АКБ верхних горизонтов трубки (выше отм. 490 м абс.), 178 зёрен из АК нижних горизонтов (ниже отм. 490 м абс.) и 80 зёрен из ПК ниже отм. 490 м. Среди гранатов из АК верхнего горизонта

5. Среднее содержание минералов тяжёлой фракции в кимберлитах, по данным изучения протолочных проб (в кг/т)

Минералы	Порфировые кимберлиты (18)	Автолитовые кимберлиты (57)
Пироп	2,61	4,26
Пикроильменит	27,25	30,24
Оливин	ед.зн.	ед.зн.
Хромшпинелид	0,05	0,05
Хромдиопсид	0,02	ед.зн.
Пироксены	ед.зн.	0,77
Альмандин	1,18	0,76
Магнетит	19,18	16,67
Гидроксиды железа	0,40	5,30
Апатит	р.зн.	р.зн.
Группа сульфидов	1,45	0,71
Сфалерит	ед.зн.	ед.зн.
Ставролит	р.зн.	р.зн.
Миллерит	ед.зн.	ед.зн.
Перовскит	ед.зн.	р.зн.
Сфен	ед.зн.	ед.зн.
Циркон	зн.	зн.
Рутил	0,01	ед.зн.
Барит	0,02	0,26

Примечание. В скобках – число проб; ед.зн. – единичные (1–4) зёрна, р.зн. – редкие (5–14) зёрна, зн.– 15–50 зёрен (в случае, если суммарный вес зёрен составляет менее 0,01 кг/т).

(+490 м), по классификации Н.В.Соболева [13, 22], преобладают разновидности из лерцолитового парагенезиса (68%), дунит-гарцбургитовому соответствуют 28%, а эклогитовому 5%. Гранаты алмазной ассоциации составляют 19% и относятся к дунит-гарцбургитовому (14%) и эклогитовому (5%) парагенезисам. Среди гранатов из АК трубки ниже отметки 490 м, по классификации Н.В.Соболева, превалируют лерцолитовые гранаты (65%), дунит-гарцбургитового парагенезиса насчитывают 21, верлитового – 10, а эклогитового – 5%. Гранаты алмазной ассоциации составляют 17% от количества изученных и соответствуют дунит-гарцбургитовому, эклогитовому и лерцолитовому парагенезисам. В ПК доля гранатов лерцолитового парагенезиса составляет 60, дунит-гарцбургитового – 28, верлитового – 11, а эклогитового – 1%, в том числе гранатов алмазной ассоциации – 24%.

Статистически значимые различия в содержании пиропов алмазной ассоциации устанавливаются между ПК и АК глубже 490 м: в ПК – 24%, в АК их на треть меньше – 17%. Распределение гранатов из АК верхних горизонтов характеризуется меньшим разнообразием химического состава гранатов и незначительно повышенной частотой встречаемости гранатов алмазной ассоциации (рис. 3, на 2%). В ПК установлена максимальная частота встречаемости гранатов алмазной ассоциации, что позволяет говорить об отрицательной корреляции между алмазоносностью и содержанием в них гранатов алмазной ассоциации. Менее алмазоносные АК приповерхностной части трубки содержат больше гранатов алмазной ассоциации по сравнению с более глубокими горизонтами. Для АК верхних горизонтов трубки также характерен наиболее бедный видовой состав гранатов (см. рис. 3). Причиной обратной корреляции алмазоносности и пиропов алмазной ассоциации, как и обеднения видового состава гранатов, является повышение хромистости пиропов из-за снижения содержаний слабоустойчивых к гипергенным и метасоматическим процессам низкохромистых гранатов [1, 15]. Это подтверждается разным количеством разноокрашенных гранатов в трубке до 50 м и ниже: для ПК <50 м (число образцов образцов, *n*=77), ПК >50 м (*n*=223), АК <50 м (*n*=148), АК >50 м (*n*=223) они составляют, соответсвенно (в %): малиновые – 27, 34, 37 и 28, лиловые – 13, 7, 12 и 11, оранжевые – 52, 57, 50 и 59, розовые – 8, 2, 1 и 2.

Пикроильмениты. Химические составы пикроильменитов изучены по 41 зерну из АК верхних горизонтов трубки (выше отм. +490 м), 117 зёрнам из АК и 64 зёрнам из ПК из нижних горизонтов (ниже отм. +490 м). Пикроильмениты из АК и ПК трубки характеризуются высокими содержаниями Mg и Cr.

По классификации В.К.Гаранина [8], в данной выборке преобладает пикроильменит 5 группы (ПК – 94%; АК выше отм. +490 м – 90%, ниже отм. +490 м – 95,7%), ильменит 4 группы составляет, соответственно, 6%, 10% и 3%. В АК ниже отм. +490 м установлены единичные зёрна групп 1 и 2 по 1% (рис. 4). По соотношению TiO_2/MgO пикроильмениты уверенно относятся к кимберлитам, а в координатах MgO–Cr_2O_3 фигуративные точки составов ложатся в область «сохранности алмазов» (см. рис. 4). Отличия выявляются по концентрациям Cr_2O_3 и распределению в областях минимальной, средней и максимальной сохранности алмазов на диаграмме Р.Рамзи [21] (см. рис. 4, Б).

Средние содержания Cr_2O_3 в пикроильменитах из АК верхней части трубки самые низкие (1,12 мас.%), они на 24,2% меньше содержаний в АК ниже отм. +490 м и на 37,7%, чем в ПК. Фигуративные точки составов пикроильменита из ПК, АК ниже отм.

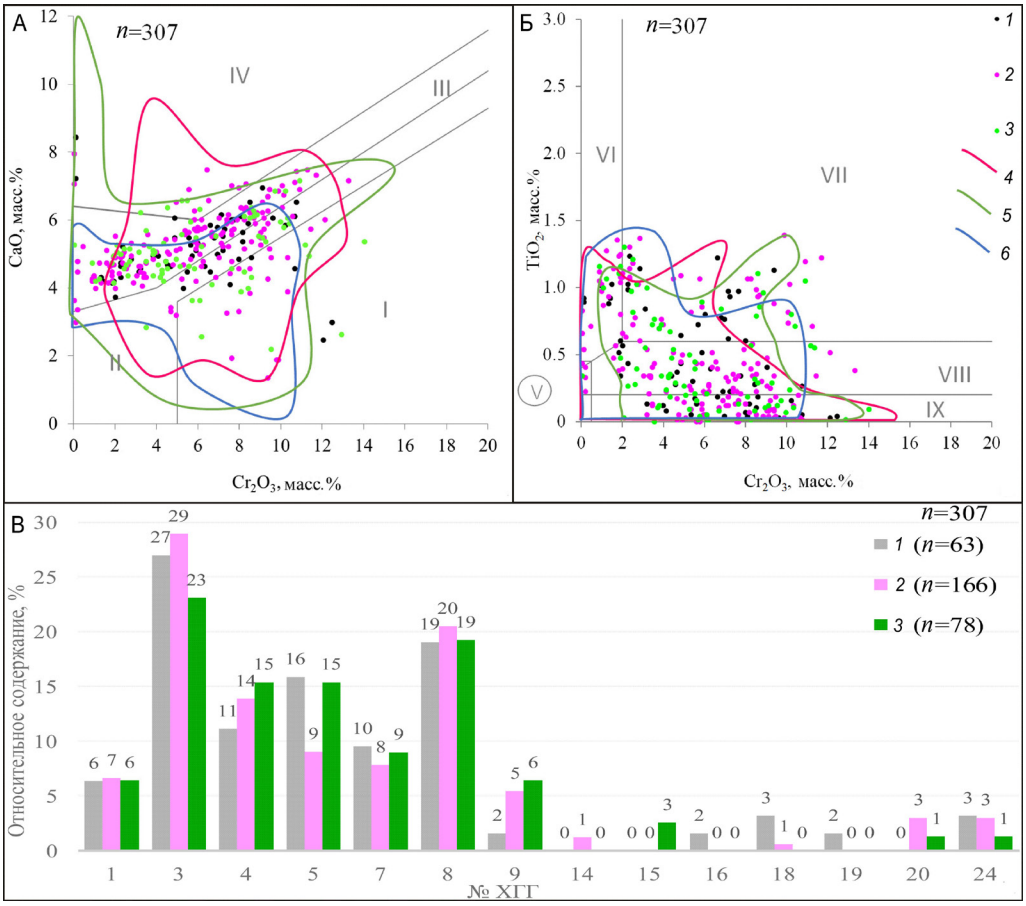
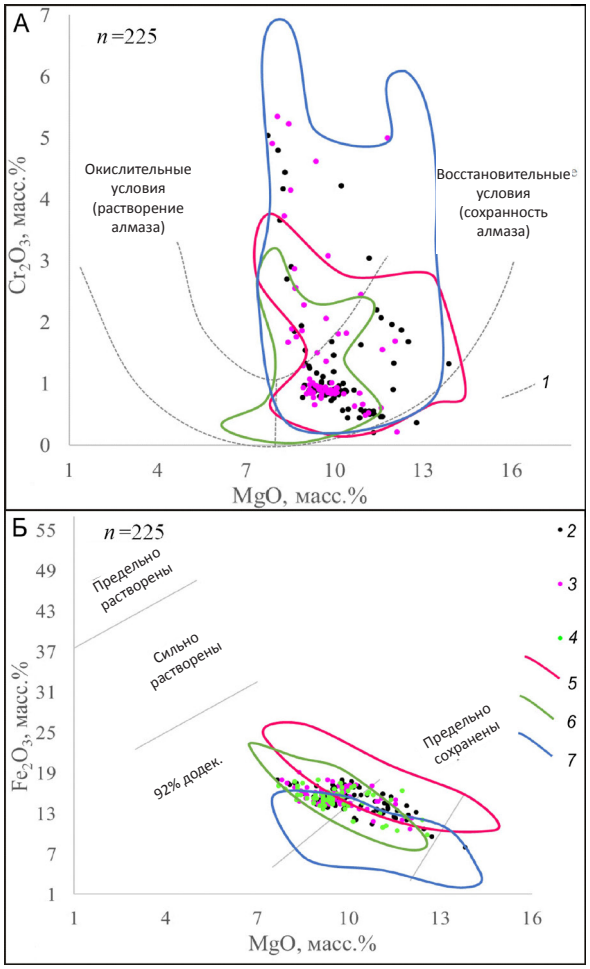


Рис. 3. Особенности химического состава гранатов из кимберлитов трубки Заря в координатах Cr_2O_3–CaO (А), Cr_2O_3–TiO_2 (Б) и распределение состава гранатов по химико-генетической классификации (В):

автолитовый кимберлит: *1* – выше 490 м абс. (*n*=63) и *2* – ниже 490 м абс. (*n*=166), *3* – порфировый кимберлит (*n*=78); оконтуренные области составов гранатов из кимберлитов трубок Комсомольская (*4*), Айхал (*5*), Юбилейная (*6*); поля составов парагенетических ассоциаций граната (А) – по [13, 22], (Б) – по [21]: I – включения в алмазе, алмазоносные дуниты и гарцбургиты, II – дуниты и гарцбургиты, III – лерцолиты, IV – верлиты, V – эклогиты, VI – мегакристы, VII–VIII – лерцолиты: катаклазированный (VII), метасоматизированный зернистый (VIII), деплетированный (IX); химико-генетические группы (В), по [7]: 1 – высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты (включения в алмазе), 3 – алмазоносные равномернозернистые лерцолиты с высокохромистым гранатом, 4 – алмазоносные равномернозернистые лерцолиты со среднехромистым гранатом, 5 – алмазоносные равномернозернистые лерцолиты с низко-среднехромистым гранатом, 7 – слабоалмазоносные равномернозернистые (иногда катаклазированные) лерцолиты с высокохромистым высокотитанистым высококальциевым гранатом, 8 – слабоалмазоносные равномернозернистые (часто катаклазированные) ильменитовые лерцолиты с низкохромистым титанистым гранатом, 9 – лерцолиты и вебстериты с низкохромистым гранатом, 14 – зональные гранаты с включениями хромшпинелидов, 15 – зональные гранаты с включениями ильменита, 16 – гранат-ильменитовые (±клинопироксен) сростки, 17 – глубинный парагенезис гранатов из включений в алмазе, 18 – высокотитанистые алмазоносные магнезиально-железистые эклогиты, 19 – алмазоносные ильменит-рутиловые магнезиально-железистые эклогиты, 20 – алмазоносные магнезиально-железистые эклогиты, 24 – алмазоносные магнезиальные ильменит-рутиловые эклогиты; *n* – число анализов

+490 м и АК верхней части трубки распределяются следующим образом (в%): в области минимальной сохранности 77, 73, 56, в области средней сохранности 23, 26 и 44, максимальной сохранности 0, 2 и 0, соответственно. Таким образом, различия между верхними и нижними горизонтами заключаются в повышенном содержании Cr_2O_3 и большем разнообразии химических составов пикроильменита в АК глубже отм. +490 м.

Хромшпинелиды. Химический состав хромшпинелидов изучен по 26 зёрнам из АК верхних горизонтов и 105 зёрнам из глубоких горизонтов, а также 53 зёрнам из ПК трубки Заря. В целом все три выборки сходны между собой, во всех преобладают



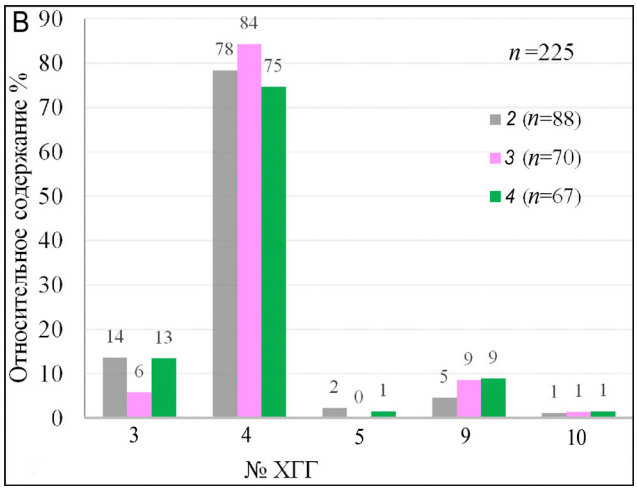


Рис. 4. Особенности химического состава пикроильменитов из кимберлитов трубки Заря в координатах MgO–Cr_2O_3 (А), MgO–Fe_2O_3 (Б) и распределение состава пикроильменитов по химико-генетической классификации (В):

1 – парабола, по данным С.Хагерти [19], *2* – автолитовый кимберлит выше 490 м абс. (*n*=88), *3* – автолитовый кимберлит ниже 490 м абс. (*n*=70), *4* – порфировый кимберлит (*n*=67); оконтуренные области составов пикроильменитов из кимберлитов трубок Комсомольская (*5*), Айхал (*6*), Юбилейная (*7*); области сохранности алмазов нанесены по [18] (Б); химико-генетические группы (В), по [7]: 3 – высокохромистый высокомагнезиальный гемоильменит из неалмазоносных перидотитов и ильменит-ортопироксеновых пород (энстатититов), 4 – хромсодержащий высокомагнезиальный ильменит из включений в алмазе, неалмазоносных перидотитов, в том числе метасоматизированных, а также катаклазированных лерцолитов, 5 – низкохромистый высокомагнезиальный гемоильменит из неалмазоносных лерцолитов, в том числе катаклазированных, ильменит-клинопироксеновых пород (клинопироксенитов), в том числе диопсидов с графической структурой (ильменит-клинопироксеновые сростки), 9 – гемоильменит из эклогитоподобных пород, 10 – высокохромистый магнезиальный гемоильменит (ферримагнитный) преимущественно из сростков с гранатом и включений в нём, а также из неалмазоносных перидотитов; *n* – число анализов

хромпикотиты (69, 65 и 66%, соответственно), близка частота встречаемости хромшпинелидов алмазной ассоциации 4, 2 и 2%. На диаграмме Р.Митчелла (1986) фигуративные точки составов хромшпинелидов располагаются в областях, соответствующих хромшпинелидам из гарцбургитов, дунитов, коматиитов и вебстеритов (рис. 5).

Микрооксиды из связующей массы кимберлитов. Помимо изучения индикаторных минералов кимберлитов – граната, хромшпинелидов и пикроильменита, исследовалась также рудная минерализация из связующей массы автолитовых и порфировых кимберлитов трубки Заря.

Автолитовые кимберлиты. В АК наличие рудной минерализации в породе невысоко (1–2%). Из них изучены хромиты, хромтитаношпинелиды, титаномагнетиты, магнетиты, пикроильмениты, ильмениты и рутилы. Характерно отсутствие перовскита, объясняющее высокую титанистость кимберлитов, являющееся типичным для разных по алмазоносности кимберлитовых тел Якутской алмазоносной провинции [6]. Это объясняется тем, что избыточный кальций формирует кальцит, распространённый в породе, а избыточный титан после кристаллизации хромсодержащих минералов входит в состав минералов Ti – ильменита и рутила. Эта ситуация типична для большинства слабоалмазоносных кимберлитовых тел Кепинского поля Архангельской алмазоносной субпровинции [6].

Среди рудных минералов наиболее распространены пикроильменит и ильменит. По электронно-зондовым анализам, пикроильменит находится в оторочке ильменита. При этом пикроильменит существенно магнезиальный (MgO 10–12 масс.%) с небольшой примесью MnO (0,2–0,5 масс.%) и Cr_2O_3 (<0,2 масс.%). Наиболее вероятно, это пикроильменит

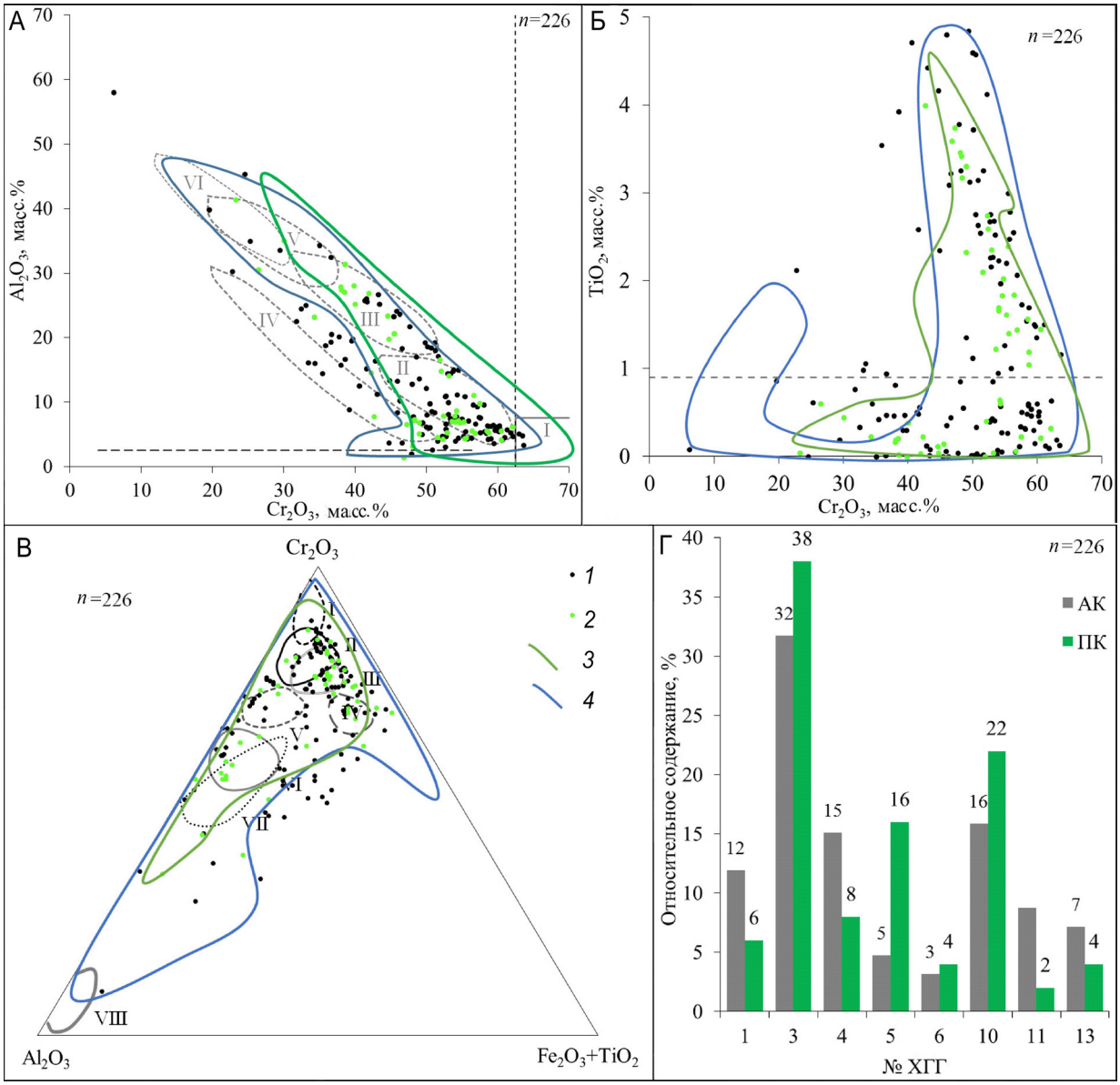


Рис. 5. Особенности химического состава хромшпинелидов из кимберлитов трубки Заря в координатах Cr_2O_3–Al_2O_3 (А), Cr_2O_3–TiO_2 (Б), Al_2O_3–(Fe_2O_3+TiO_2)–Cr_2O_3 (В) и распределение состава хромшпинелидов по химико-генетической классификации (Г):

1 – автолитовый кимберлит (*n*=126), *2* – порфировый кимберлит (*n*=100); оконтуренные области составов хромшпинелидов (А, Б) из кимберлитов трубки Айхал (*3*), Юбилейная (*4*); фации и субфации выделены (А) по [16]: I – алмаз-хромпироповая, II – коэситовая, III – гроспидитовая, IV – катаклазированных дунитов, V – шпинель-пироповая, VI – шпинель-пироксеновая; В – поля составов, по [17]: I – из включений в алмазе и алмазоносных перидотитов, II – из потенциально алмазоносных дунитов, III – из верлитов, IV – из катаклазированных лерцолитов, V – из гарцбургитов, VI – из потенциально алмазоносных гарцбургитов, VII – из равномерно-зернистых лерцолитов, VIII – из алькремитов; химико-генетические группы (В), по [7]: 1 – высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты (включения в алмазе), 3 – лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, 4 – лерцолиты со среднехромистым шпинелидом, 5 – лерцолиты с низкохромистым шпинелидом, 6 – гранатовые вебстериты и гарцбургиты с низкохромистым шпинелидом, 10 – гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, катаклазированные лерцолиты, 11 – катаклазированные лерцолиты, 13 – зональные гранаты; *n* – общее число анализов



Рис. 6. Алмаз весом 15,91 ct, SPEC SH 2c. стоимостью 259 486 долл. США:

на поверхности отмечены треугольные фигуры травления, фото ЕСО АК «АЛРОСА» (ПАО)

основной массы, для которого характерна примесь MgO (<0,5 масс.%) и MnO (до 3 масс.%) при полном отсутствии примеси Cr_2O_3. Это типичный ильменит, кристаллизация которого происходит из кимберлитового расплава, слабо обогащённого MnO. Шпинелиды явно разделяются на хромиты, сложные хромтитаномагнетиты и титаномагнетиты. Наиболее распространены хромтитаномагнетиты, далее по распространённости идут титаномагнетиты, наименее распространены хромиты.

Хромиты (в масс.%): TiO_2 – 5–7, Al_2O_3 – 4–5, MgO – 10–14, Cr_2O_3 – 42–50) отмечены в отдельных зёрнах серпентинизированного оливина или в оторочке ильменита. По соотношению главных элементов они соответствуют хромитам наименее богатых промышленно алмазоносных кимберлитовых трубок ЯАП, таких как Сытыканская, Зарница и др. [6]. Более распространены сложные по составу хромтитаномагнетиты с переменным содержанием Cr_2O_3 30–20 и TiO_2 10–20%, титаномагнетиты и магнетиты с содержанием TiO_2 менее 10 масс.%. Следует отметить, что протяжённые тренды кристаллизации хромшпинелидов свидетельствуют о пониженной алмазоносности кимберлитов трубки.

Порфировые кимберлиты. В ПК распространены (до 4%) сложные стяжения рудных минералов: пикроильменит, титаномагнетит и рутил, составляющий существенную часть этих стяжений. Результаты изучения микрооксидов кимберлитов подтверждают низкую алмазоносность порфировых кимберлитов трубки Заря [6].

Алмазоносность. ***Содержание и качество алмазов.*** Запасы алмазов месторождения «Заря», утверждённые ГКЗ по временным разведочным кондициям (2016) для открытой отработки, составляют 7097,4 тыс. карат по категориям C_1+C_2, в соответствии с кодексом JORC – 3469 тыс. карат при среднем содержании 0,28 кар/т. Различия в содержаниях, встречаемости алмазов и среднем весе 1 кристалла в ПК и АК определяют зональность их распределения в трубке, обусловленную различной продуктивностью кимберлитов. Более алмазоносными являются АК ЦРС. Содержание алмазов по пробам варьирует: в ПК от 0,00 до 1,10 кар/т, в АК от 0,00 до 20,43 кар/т. Встречаемость алмазов также различна: в АК они отмечаются в 90% проб, в ПК – в 1,5 раза реже. Среднее содержание алмазов в ПК – 0,05 кар/т при среднем весе кристалла 1,8 мг, тогда как в АК эти показатели составляют 0,24 кар/т и 4,3 мг, соответственно.

6. Параметры алмазоносности АКБ трубки Заря, по данным кернового опробования

Горизонт опробования, м	Вес проб, тонн	Доля от общего среднего содержания в пробе по классам крупности (мм), %						Средний вес 1 кристалла, мг	Содержания, кар/т
		–16+2	–16+8	–8+4	–4+2	–2+1	–1+0,5		
+517–+490	25,1	33,0	0,0	0,0	33,0	48,4	18,6	3,3	0,19
+490–+460	39,8	49,2	0,0	17,3	31,9	37,9	12,9	4,5	0,31
+460–+430	37,3	38,0	0,0	0,0	38,0	41,0	21,0	3,3	0,19
+430–+400	32,1	56,1	0,0	31,4	24,7	30,3	13,6	4,5	0,31
+400–+370	26,2	66,9	63,3	0,0	3,6	22,0	11,1	6,0	0,29
+370–+340	26,7	48,7	0,0	18,8	29,9	39,4	11,9	4,9	0,27
+340–+300	26,3	42,5	0,0	0,0	42,5	46,0	11,5	4,7	0,26
+300–+200	27,6	46,5	0,0	0,0	46,5	40,0	13,5	4,4	0,19

7. Основные морфологические характеристики алмазов трубки Заря

Класс крупности, мм	Количество кристаллов, шт.	I разновидность (%)					IV разновидность (%)	VIII разновидность (%)
		Всего 1 разновидности	Октаэдры	Переходные формы	Ромбододекаэдры	Осколки		
–1+0,5	1343	97,5	16,7	17,5	35,9	23,4	0,2	2,2
–2+1	971	95,8	14,6	18,9	43,6	13,7	0,1	4,0
–4+2	95	95	17	21	46	8	–	5
–8+4	4	100	75	–	25	–	–	–
–16+8	1	100	–	–	100	–	–	–
Всего	2497	96,7	15,9	18,2	39,4	18,8	0,2	3,1

Примечание. IV и VIII разновидности, по [11].

Обнаружен один кристалл в классе –16+8 мм весом 975,1 мг (4,88 карата) и четыре кристалла из класса –8+4 мм весом от 188,1 мг (0,94 карата) до 429,7 мг (2,15 карата), что свидетельствует о наличии в месторождении крупных камней (рис. 6).

Стоимостная оценка сырья по партии алмазов из керновых проб массой 74,42 карат по прейскуранту цен 2015 г. для класса +0,2 у.с.к. составила 215,8 дол. США за карат. Минимальные содержания и средний вес 1 кристалла алмаза установлены в верхней 25-метровой части ЦРС трубки, залегающей под силлом долеритов. С глубиной основные параметры алмазоности улучшаются: при этом растут содержания и средний вес 1 кристалла, гранулометрия смещается в сторону более крупных классов (табл. 6).

Морфология. Алмазы трубки Заря изучены по коллекции из 2497 штук, среди которых преобладают кристаллы класса –1+0,5 мм (56%), класса –2+1 мм (40%) и 4% выпадает на класс –4+2 мм. Единичные алмазы встречены в классе крупности –16+8 мм, при этом по весу они составляют до 20% от всего объёма продукции. Преобладают кристаллы I разновидности, по Ю.Л.Орлову [11]. Встречаются поликристаллические агрегаты VIII разновидности (2–5%) и кристаллы с оболочкой IV разновидности (<0,2%). Около 74% из них – монокристаллы. Двойники, незакономерные сростки и поликристаллические VIII разновидности составляют 25%. Среди габитусных форм доминируют ромбододекаэдры (41%), октаэдры (16%) и переходные формы (19%), округлые алмазы составляют 18% (табл. 7). Половина изученных октаэдров и ромбододекаэдров (55%) представлена ламинарными кристаллами.

Большинство кристаллов (71%) бесцветно, среди окрашенных наибольшее количество (17%) приходится на дымчато-коричневые кристаллы, при заметном (7%) содержании серых алмазов. Встречены единичные алмазы с окраской «морской волны». Отмечено повышенное количество (12–15%) алмазов категории «чистой воды» и «весьма прозрачные». Доля кристаллов без включений составляет 45%. Преобладают серые и чёрные графит-сульфидные и единичные графитовые включения. Доля ожелезнённых алмазов 4,5%. Установлено близкое содержание алмазов с сине-голубой и розово-сиреневой (31,8 и 38,2%, соответственно) фотолюминесценцией; кристаллов с жёлто-зелёным, жёлтым, оранжевым свечением меньше (суммарно 21,5%). На 1 кристалле отмечено зелёное пятно пигментации.

Сохранность кристаллов невысокая: целых и незначительно повреждённых алмазов 32%, осколков 38%. В крупном классе доля алмазов хорошей

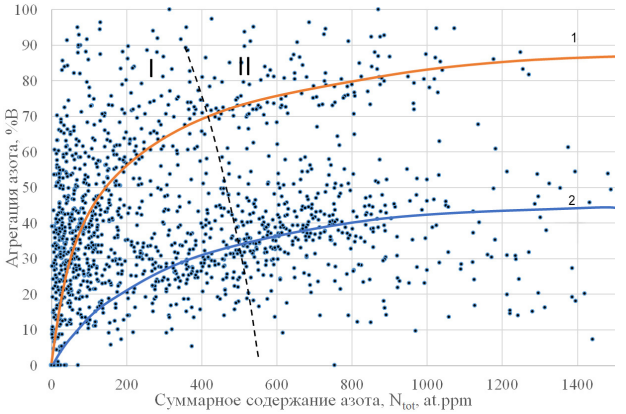


Рис. 7. Содержание азота и его агрегация в алмазах трубки Заря, показаны 2 ветви:

алмазы: 1 – более древние, 2 – более молодые, I – из перидотитовых и II – из эклогитовых пород

8. Усреднённые содержания дефектов в алмазах трубки Заря

Разновидность, по [11]	Габитус, по [11]	Количество изученных кристаллов	N_{tot}, at. ppm	A, at. ppm	B, at. ppm	%B, %	B2, см$^{-1}$	U_{B2}, см$^{-1}$	H, см$^{-1}$
I+IV+VIII, *в сумме, в т.ч.*	*Все кристаллы, в сумме, в т.ч.*	696	386	202	184	43	6,9	1364,6	1,4
I	*в сумме*	682	388	203	185	43	7,1	1364,7	1,4
	в т.ч. октаэдр	122	288	159	129	41	5,1	1364,1	1,4
	в т.ч. ПФ	101	364	180	184	42	7,3	1364,8	1,5
	в т.ч. Рд	291	423	232	192	41	7,1	1365,1	1,4
	в т.ч. осколки	129	401	177	224	48	8,8	1364,1	1,3
IV		1	1228	1064	164	14	0,8	1363,1	6,4
VIII		13	213	112	102	48	2,9	1365	2,3

Примечание. ПФ – переходные формы, Рд – ромбододекаэдр, по [11].

сохранности выше. На повреждённых камнях наблюдаются поверхности с механическим (28%), протомагматическим (13%) и комбинационными механическим+протомагматическим (17%) сколами. Кристаллы со «свежими» сколами составляют до 10,0%.

Максимальные отличия алмазов из АК и ПК отмечаются по фотолюминесцентным свойствам и форме кристаллов: для ПК характерно повышенное (на 9%) содержание ламинарных ромбододекаэдров и кристаллов с розово-сиреневой люминесценцией (на 12%). Кроме того, алмазы из ПК отличаются по характеру сколов: в них повышено количество протомагматических и комбинационных (механических/техногенных+протомагматических; в сумме 12%) сколов. Среди алмазов в АК чаще встречаются поликристаллические сростки VIII разновидности. При этом содержание и характер кристаллов со скульптурами травления, двойниками и сростками, включениями, окраской по разновидностям кимберлитов практически не меняются. Совокупность минералогических признаков позволяет прогнозировать весьма выское качество крупных кристаллов трубки Заря, что подтверждено наличием алмазов высокого качества в коллекции 2019 года (см. рис. 6).

Оптико-спектроскопическая характеристика алмазов. Методом ИК-Фурье спектроскопии изучено 1500 алмазов трубки Заря. 94% проанализированных спектров алмазов обнаруживают поглощение в однофотонной области, что указывает на принадлежность их к типу I. В выборке преобладают (58%) малооазотные алмазы с содержанием примеси азота менее 400 ат.‰, около 34% выборки имеют концентрацию примеси азота в интервале 400–1000 ат.‰. Содержание «безазотных» (с концентрацией менее 25 ат.‰.) алмазов – около 6%. Распределение алмазов по суммарному структурному азоту имеет два максимума на 100 ат.‰ и на 600 ат.‰ (рис. 7). В спектрах фиксируется повышенное содержание водорода, что является негативным фактором для параметров алмазоносности. Содержание азота в кристаллах N_{tot} варьирует от 0 до 1500 ат.‰, максимальные концентрации фиксируются в округлых и переходных кристаллах – до 2500 ат.‰. Около 42% примесного азота находятся в форме B-центра со средней концентрацией 171 ат.‰.

Повышенная агрегация азота характерна для мало- и среднеазотистых кристаллов. Коэффициенты поглощения B2-центров в диапазоне 1358–1380 см$^{-1}$ в основном до 20 см$^{-1}$, а в среднем 6,9 см$^{-1}$. Зафиксированы и более высокие значения этого параметра – до 51 см$^{-1}$. Коэффициенты поглощения узких линий на 3107 см$^{-1}$ в спектрах большинства кристаллов до 30,5 см$^{-1}$, усреднённое значение для данной выборки – 1,6 см$^{-1}$ (табл. 8), что указывает на повышенные концентрации примеси водорода.

Октаэдры по сравнению с переходными формами к ромбододекаэдру имеют пониженное содержание азота, при этом агрегация азота сравнима для всех кристаллов I разновидности. Встречен кристалл IV разновидности с повышенным содержанием примесного азота при низкой агрегации, его малые концентрации отмечены в индивидах VIII разновидности (в среднем 213 ат.‰) при повышенной агрегации, что типично для этой разновидности кристаллов. Таким образом, для трубки Заря характерны малоазотистые кристаллы, индивиды с повышенной степенью агрегированности основной примеси и большими размерами пластинчатых B2-дефектов.

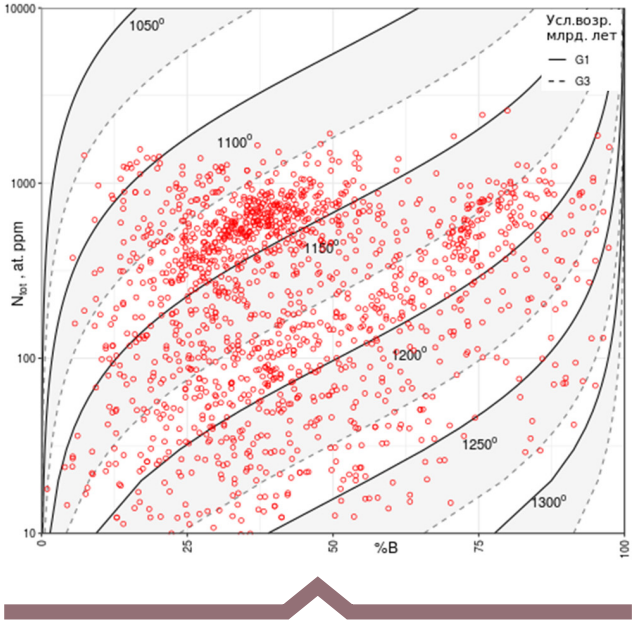


Рис. 8. Соотношение содержания суммарного азота (N_{tot}) и степени его агрегации (%B) в алмазах трубки Заря в зависимости от температуры и «условного возраста» алмаза 1 (G1) и 3 (G3) млрд. лет. *По [24]*

Детальный анализ распределений концентраций азота и его агрегации показывает наличие двух ветвей (см. рис. 7), что соответствует двум основным генетическим типам алмазов.

Первая ветвь (см. рис. 7, А) с высокой агрегацией (до 80%) азота в В-форме, характерна для перидотитовых пород. Кинетический параметр агрегации азота при содержании N_{tot} менее 100‰ и вытянутость этой ветви до 1000‰ показывают, что возраст этих алмазов может составлять свыше 1,2 млрд. лет. Около 40% этих алмазов кратковременно прогревались в условиях верхней мантии: это видно по выраженному локальному максимуму В-дефекта на ~40–60% и ~60‰ N_{tot} (у части низкоазотных алмазов агрегация остановилась на уровне температурной энергии активации перехода 2 А→В). Алмазы этой ветви будут с признаками растворения, среди них будут преобладать алмазы крупных классов. Вероятность наличия в этой группе особо крупных алмазов свыше 50 карат очень высокая.

Вторая ветвь алмазов на графике (см. рис. 7, Б) представлена алмазами с содержанием азота свыше 400–600‰, что указывает на их эклогитовый генезис. Относительная компактность группы на диаграмме Тейлора (рис. 8) свидетельствует об «одноактности» их формирования [24]. Средняя и низкая агрегация азота указывает, что возраст алмазов менее 800 млн. лет. Процесс алмазообразования характеризовался большим количеством зародышей, что при дефиците углерода приводит к замельчённости алмазов этой ветви. Алмазы эклогитовой группы составляют около 33% от всего количества.

Заключение. Кимберлитовая трубка Заря расположена на западе Якутской алмазоносной провинции. Положение её в кимберлитовом поле контролируется разломами среднепалеозойской (D_3–C_1) эпохи. Размеры её на погребённой поверхности составляют 480×260 м, а эрозионный срез не превышает 475 м. Сложена она АК и ПК: в первую стадию внедрились порфировые кимберлиты с алмазоносностью 0,10 кар/т, слагающие фланги месторождения, во вторую сформированы АК центрального рудного столба (0,28 кар/т).

Кимберлиты трубки относятся к Fe-Ti (среднетитанистому 1–2,5% TiO_2) низкокалиевому петрохимическому типу кимберлитов с серпентин-кальцитовым составом основной массы.

Петрофизические характеристики кимберлитов обнаруживают широкие вариации. АК отличаются от ПК большей средней объёмной плотностью и магнитной восприимчивостью и более низкой общей радиоактивностью и содержаниями радиоактивных элементов. Для АК отмечены максимальные значения естественной остаточной намагниченности (среднее 573,4 мАм) и отношения Кёнигсбергера (фактор Q=0,85). Отмечается слабая положительная корреляционная связь между алмазоносностью и магнитной восприимчивостью.

Средний вес тяжёлой фракции для ПК составляет 52,17 кг/т, для АК – 59,02 кг/т. Для кимберлитов характерна пикроильменит-пироп-хромитовая ассоциация минералов-индикаторов. Изучение микроксидов подтвердило низкую алмазоносность кимберлитов, что может быть использовано в качестве вещественно-индикационных критериев алмазоносности при поисках новых кимберлитовых объектов. Высокое содержание пиропов алмазной ассоциации в АК Заря позволяет предположить возможность повышения содержания алмазов с глубиной, но пониженное содержание подобных пиропов в ПК не позволяет надеяться, что это повышение алмазоносности будет значительным [25].

Алмазы трубки Заря представлены I разновидностью, по Ю.Л.Орлову, и невысокой долей поликристаллических сростков VIII разновидности. Частота встречаемости алмазов IV и VIII разновидностей в трубке Заря близка к таковой в месторождениях Айхал и Зарница и в два раза ниже, чем в трубках Удачная, Юбилейная, Комсомольская и Сытыканская. Сохранность алмазов невысокая: осколки и обломки составляют 38,4%, и 73% из них представлены монокристаллами. Треть алмазов окрашена, среди

них преобладают коричневые (17%) и серые (7%) окраски, единичные кристаллы цвета «морской волны». Кристаллы без включений составляют 44,8%. Из включений преобладают графит-сульфидные, единичные представлены графитом.

По совокупности морфологических характеристик наиболее близкое соотношение морфологических групп в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе встречено в месторождениях трубок Айхал (отличия до 5%), Зарница и Сытыканская (отличия от 5 до 10%). Месторождения трубок Юбилейная и Комсомольская отличаются по основным морфологическим параметрам до 10–15%, а алмазы месторождения трубки Удачная по отдельным параметрам отличаются от алмазов трубки Заря более, чем на 15%.

По данным ИК-спектроскопии, алмазы трубки Заря наиболее сходны с алмазами трубки Комсомольская, которые также образуют две ветви, при этом у трубки Комсомольская отсутствует локальный прогрев перидотитовых алмазов, а для эклогитовых алмазов выделяются две генерации без перерыва, что даёт возможность, исходя из графика, предположить для них равномерное распределение алмазов от мелких к крупным. Для перидотитовой ветви алмазов трубки Комсомольская характерно наличие крупных кристаллов. Исходя из этого, алмазоносность трубки Заря должна быть несколько ниже, чем трубки Комсомольская, но качество крупных кристаллов будет сопоставимым.

Количество алмазов с сине-голубой и розово-сиреневой фотолюминесценцией близко (31,8 и 38,2%), кристаллов с жёлто-зелёным, жёлтым, оранжевым свечением меньше (суммарно 21,5%). ИК-спектры 94% алмазов указывают на принадлежность кристаллов к спектральному типу I, характеризующемуся значимым содержанием азотных дефектов, содержание «безазотных» (с концентрацией менее 25 ат.‰) алмазов – около 6%.

Сравнительная характеристика алмазов из верхней части трубки Заря с глубокими горизонтами свидетельствует о существенном улучшении качества алмазов с глубиной и, как следствие, о потенциально более высокой их стоимости, чем она была оценена по опытной партии (меньше 100 дол. США за карат), наработанной из карьера в 2019 г. Запасы алмазов составляют 3514,9 тыс. карат по категории C_1 и 3582,5 карат по категории C_2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П.* Поисковая минералогия алмаза. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 650 с.
2. *Бурмистров А.А., Богуславский М.А.* Петрофизические свойства кимберлитов трубки Комсомольской и их связь с особенностями её вещественного состава, условиями образования и алмазоносностью // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. – 2009. – № 6. – С. 26–33.
3. *Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Минин В.А., Толстов А.В.* Поведение породообразующих и редкоземельных элементов при постмагматическом изменении кимберлитов // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 1. – С. 82–100.
4. *Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Толстов А.В.* и др. Основные процессы, определяющие вторичные изменения кимберлитов // Геохимия. – 2016. – № 4. – С. 396–406.
5. *Василенко В.Б., Толстов А.В., Кузнецова Л.Г.* и др. Петрохимические критерии оценки алмазоносности кимберлитовых месторождений Якутии // Геохимия. – 2010. – № 4. – С. 366–376.
6. *Гаранин В.К., Бовкун А.В., Гаранин К.В.* и др. Микрокристаллические оксиды из кимберлитов России. – Москва: ГЕОС, 2009. – 498 с.
7. *Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Марфунин А.С., Михайличенко О.А.* Включения в алмазе и алмазоносные породы. – М.: МГУ, 1991. – 240 с.
8. *Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Сошкина Л.Г.* Ильменит из кимберлитов. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 240 с.
9. *Горев Н.И., Шахурдина Н.К., Салихов Р.Ф., Проценко Е.В.* К вопросу об эрозионном срезе кимберлитов Алакит-Мархинского рудного поля // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 20–31.
10. *Лапин А.В., Толстов А.В., Василенко В.Б.* Петрогеохимические особенности кимберлитов Средне-Мархинского района в связи с проблемой геохимической неоднородности кимберлитов // Геохимия. – 2007. – № 12. – С. 1292–1304.
11. *Орлов Ю.Л.* Минералогия алмаза. 2-е издание. – М.: Наука, 1984. – 264 с.
12. *Салихов Р.Ф., Иванюшина Е.Н.* Базитовый магматизм и прогнозирование кимберлитов на закрытых территориях // Петрология магматических и метаморфических комплексов: материалы IX всеросс. конф. с международным участием. – 2017. – С. 376–381.
13. *Соболев Н.В.* О минералогических критериях алмазоносности // Геология и геофизика. – 1971. – № 3. – С. 70–80.
14. *Томшин М.Д., Салихов Р.Ф., Матушкин А.И.* и др. Самородное железо в долеритах Айхальского силла (первая находка в Якутии) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. – Т. 24. – №3. – С. 50–63.
15. *Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.* Коренные месторождения алмазов мира. – М.: Изд-во «Недра», 1998. – 555 с.
16. *Харькив А.Д, Квасница В.Н., Сафронов А.Ф.* и др. Типоморфизм алмаза и его минералов спутников из кимберлитов. – Киев: «Наукова думка», 1989. – 184 с.
17. *Хмельков А.М.* Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции). – Новосибирск: Изд-во «АРТА», 2008. – 252 с.

18. *Gurney, J.J., Zweistra P.* The interpretation of the major element compositions of mantle minerals in diamond exploration // Journal of Geochemical Exploration. – 1995. – V. 53. – P. 293–309.
19. *Haggerty S.E.* The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlite // Physics and chemistry of the Earth. – New York, 1975. – V. 9. – P. 227–243.
20. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V.* Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated rocks of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. – 2007. – V. 414. – №1. – P. 557–560.
21. *Ramsay R.R.* (1992). Geochemistry of diamond indicator minerals // PhD Thesis, Univ Western Australia, Perth.
22. *Sobolev N.V., Laurentev Yu.G., Pokhilenko N.P.* et al. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1973. – V. 40. – P. 39–50.
23. *Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A.* et al. Unique compositional peculiarities of olivine phenocrysts from the post flood basalt diamondiferous Malokuonapskaya kimberlite pipe, Yakutia // Doklady Earth Sciences. – 2015. – V. 463. – № 2. – P. 828–832.
24. *Taylor W.R., Milledge H.J.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenoliths-derived diamonds from Roberts Victor and Finch // Sixth Internat. Kimberlite Conf. Extended Abstr. – Novosibirsk. – 1995. – P. 620–622.
25. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A.* et al. Evaluating the diamondiferous potential of unaltered kimberlites by the population models of their composition // Geochemistry International. – 2012. – V. 50. – № 12. – P. 988–1006.

REFERENCES

1. *Afanas'yev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P.* Poiskovaya mineralogiya almaza [Prospecting mineralogy of diamond]. Novosibirsk, Akademicheskoye izd-vo "Geo" publ. 2010. 650 p.
2. *Burmistrov A.A., Boguslavskiy M.A.* Petrofizicheskiye svoystva kimberlitov trubki Komsomol'skoy i ikh svyaz' s osobennostyami yeyo veshchestvennogo sostava, usloviyami obrazovaniya i almazonosnost'yu [Petrophysical kimberlite pipes of the Komsomolskaya and their connection with the peculiarities of its material composition, formation conditions and diamond content]. Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya. 2009. No. 6. P. 26–33.
3. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V.* Povedeniye porodoobrazuyushchikh i redkozemel'nykh elementov pri postmagmaticheskom izmenenii kimberlitov [Behavior of rock-forming and rare-earth elements during postmagmatic alteration of kimberlites]. Geologiya i geofizika. 2012. V. 53. No. 1. P. 82–100.
4. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Tolstov A.V.* et al. Osnovnyye protsessy, opredelyayushchiye vtorichnyye izmeneniya kimberlitov [Main processes determining secondary changes in kimberlites]. Geokhimiya. 2016. No. 4. P. 396–406.
5. *Vasilenko V.B., Tolstov A.V., Kuznetsova L.G.* et al. Petrokhimicheskiye kriterii otsenki almazonosnosti kimberlitovykh mestorozhdeniy Yakutii [Petrochemical criteria for assessing the diamond content of kimberlite deposits in Yakutia]. Geokhimiya. 2010. No. 4. P. 366–376.
6. *Garanin V.K., Bovkun A.V., Garanin K.V., Rotman A.Ya., Serov I.V.* Mikrokristallicheskiye oksidy iz kimberlitov Rossii [Microcrystalline oxides from kimberlites of Russia]. Moscow, GEOS publ. 2009. 498 p.
7. *Garanin V.K., Kudryavtseva G.P., Marfunin A.S., Mikhaylichenko O.A.* Vklyucheniya v almaze i almazonosnyye porody [Inclusions in diamond and diamondiferous rocks]. Moscow, MGU publ. 1991. 240 p.
8. *Garanin V.K., Kudryavtseva G.P., Soshkina L.G.* Il'menit iz kimberlitov [Ilmenite from kimberlites Moscow, MGU publ. 1984. 240 p.
9. *Gorev N.I., Shakhurdina N.K., Salikhov R.F., Protsenko Ye.V.* K voprosu ob erozionnom sreze kimberlitov Alakit-Markhinskogo rudnogo polya [On the question of the erosional cut of kimberlites of the Alakit-Markhinsky ore field]. Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki. 2020. V. 25. No. 1. P. 20–31.
10. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B.* Petrogeokhimicheskiye osobennosti kimberlitov Sredne-Markhinskogo rayona v svyazi s problemoy geokhimicheskoy neodnorodnosti kimberlitov [Petrogeochemical features of kimberlites in the Sredne-Markhinsky region in connection with the problem of geochemical heterogeneity of kimberlites]. Geokhimiya. 2007. No. 12. P. 1292–1304.
11. *Orlov Yu.L.* Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond]. 2-ye izdaniye. Moscow, Nauka publ. 1984. 264 p.
12. *Salikhov R.F., Ivanyushina Ye.N.* Bazitovyy magmatizm i prognozirovaniye kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [Basic magmatism and prediction of kimberlites in closed areas]. V sb.: Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov mat-ly IX Vseross. Konf. s mezhd. uchastiyem. 2017. P. 376–381.
13. *Sobolev N.V.* O mineralogicheskikh kriteriyakh almazonosnosti [On mineralogical criteria of diamond content]. Geologiya i geofizika. 1971. No. 3. P. 70–80.
14. *Tomshin M.D., Salikhov R.F., Matushkin A.I.* et al. Samorodnoye zhelezo v doleritakh Aykhal'skogo silla (pervaya nakhodka v Yakutii) [Native iron in dolerites of the Aikhal sill (first find in Yakutia)]. Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki. 2019. V. 24. No. 3. P. 50–63.
15. *Khar'kiv A.D, Kvasnitsa V.N., Safronov A.F.* et al. Tipomorfizm almaza i yego mineralov sputnikov iz kimberlitov [Typomorphism of diamond and its minerals satellites from kimberlites]. Kiyev, Naukova dumka publ. 1989. 184 p.
16. *Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I.* Korennyye mestorozhdeniya almazov mira [Primary diamond deposits of the world]. Moscow, Nedra publ. 1998. 555 p.
17. *Khmel'kov A.M.* Osnovnyye mineraly kimberlitov i ikh evolyutsiya v protsesse oreoloobrazovaniya (na primere

Yakutskoy almazonosnoy provintsii) [The main minerals of kimberlites and their evolution in the process of halo formation (on the example of the Yakutsk diamond province)]. Novosibirsk, ARTA publ. 2008. 252 p.
18. *Gurney, J.J., Zweistra P.* (1995). The interpretation of the major element compositions of antle minerals in diamond exploration. Journal of Geochemical Exploration. 53, P. 293–309.
19. *Haggerty S.E.* The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlite. Physics and chemistry of the Earth. New York. 1975. V. 9. P. 227–243.
20. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V.* Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated Rocks of the Siberian craton. Doklady Earth Sciences. 2007. V. 414. No. 1. P. 557–560.
21. *Ramsay R.R.* (1992). Geochemistry of diamond indicator minerals. PhD Thesis, Univ Western Australia, Perth.
22. *Sobolev N.V., Laurentev Yu.G., Pokhilenko N.P.* et al. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. Contrib. Min. Pet., 1973, V. 40, P. 39–50.
23. *Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A.* et al. Unique compositional peculiarities of olivine phenocrysts from the post flood basalt diamondiferous Malokuonapskaya kimberlite pipe, Yakutia. Doklady Earth Sciences. 2015. V. 463. No. 2. P. 828–832.
24. *Taylor W.R., Milledge H.J.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenoliths-derived diamonds from Roberts Victor and Finch. Sixth Internat. Kimberlite Conf. Extended Abstr. Novosibirsk. 1995. P. 620–622.on the source regions of pipe and alluvial diamonds. Am Mineral 75(11–12):1290–1310.
25. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A.* et al. Evaluating the diamondiferous potential of unaltered kimberlites by the population models of their composition. Geochemistry International. 2012. V. 50. No. 12. P. 988–1006

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.