

УДК 553.02:549.02

Ичетьюские алмазы: конституция, поверхностно-плёночные микроминерализации, генезис

А.Е. Сухарев^а, В.И. Силаев^а, В.А. Петровский^а, Е.А. Васильев^б,
В.Н. Филиппов^а, А.Ф. Хазов^а, И.В. Смолева^а

^аИнститут геологии Коми НЦ УрО РАН

167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54. E-mail: sukharev@geo.komisc.ru

^бСанкт-Петербургский горный университет

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2. E-mail: simphy12@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 5 мая 2023 г.)

Исследованы алмазы из Ичетьюского месторождения спорного генезиса с применением методов рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии, катодо-, фото- и рентгенолюминесценции; спектроскопии комбинационного рассеяния и ИК-поглощения, ЛА-ИСП-МС, изотопной масс-спектрометрии. Проанализирована кристалломорфология алмазов, определены параметры форм их мантийного растворения, степень и характер пластических и ударных деформаций. Выявлены особенности внутреннего строения, люминесцентно-спектроскопические свойства. Оценены валовая концентрация структурного азота, степень агрегации точечных азотных дефектов, температура мантийного отжига. Определен состав микроэлементов и изотопия углерода. Изучен минерально-фазовый состав плёнок на поверхности алмазов. Сделан вывод о туффизито-флюидизатном генетическом типе Ичетьюского месторождения.

Ключевые слова: *Ичетьюское месторождение, алмазы, морфология, анатомия, люминесцентно-спектроскопические свойства, микроминеральные пленки, туффизито-флюидизатный генетический тип.*

DOI: 10.17072/psu.geol.22.2.144

«На Тимане, по-видимому, скорее всего, может быть решена проблема происхождения алмазов, а также могут быть установлены районы, наиболее благоприятные для добычи алмазов».

А.А. Чернов, 1960 г.

Введение

Уральская алмазоносная провинция была первой из открытых в России, но остается до настоящего времени весьма спорной в отношении генетической природы алмазных месторождений. Значительная часть специалистов все еще считает алмазные месторождения в Тимано-Североуральском регионе россыпными, возникшими за счет кимберлитовых первоисточников или промежуточных экзогенных коллекторов – ордовикских речных или более древних прибрежно-морских россыпей (Деревянко, 2001; Дудар, 2006; Щербаков и др., 2001; Мальков, Холопова, 2002; Щербаков, Плякин, 2002; 2008; Пыстин и др., 2008; Гракова, 2021). Одно-

временно с этим уже в течение 20–25 лет существует и активно развивается концепция флюидизатно-эксплозивной природы тимано-уральских месторождений, образовавшихся как коренные в результате мезокайнозойской мантийно-эндогенной активизации (Рыбальченко и др., 1997; Лукьяннова и др., 1999; Лукьянова и др., 2001; Чайковский, 2001). С таких позиций алмазные месторождения уральского типа рассматриваются как результат инъецирования в приповерхностную часть осадочного платформенного чехла псевдосжиженных гравийно-песчаных масс преимущественно кимберлит-лампроитового состава и мантийного происхождения. По А.Я. Рыбальченко, это называется туффизито-

то-флюидизатным типом алмазных месторождений.

В настоящее время Ичетьюское алмазное месторождение, являясь одним из крупнейших на территории Тимано-Уральской алмазоносной провинции, вызывает большой научный и экономический интерес (рис. 1). Понятно, что окончательное решение вопроса его генезиса не может быть достигнуто без анализа информации, полученной непосредственно от самих алмазов.



Рис. 1. *Посещение Ичетьюского алмазного месторождения руководством Республики Коми в 2000 г.: 1 – академик РАН Николай Павлович Юшкин; 2 – руководитель администрации Программы развития экономики Республики Коми Игорь Борисович Гранович; 3 – Глава Республики Коми Юрий Алексеевич Стиридонов*

Геологическая характеристика Ичетьюского месторождения

Рассматриваемое месторождение приурочено к периклинальному погружению Вольско-Вымской антиклинали на Среднем Тимане. Геологическое строение периклинали определяется пижемской свитой терригенных отложений среднедевонского возраста, несогласно залегающей на титаноносных отложениях малоручейской свиты ордовикского возраста или непосредственно на размытой поверхности докембрийского комплекса пород кристаллического фундамента (Дудар, 1996, 2001). В основании пижемской свиты

выделяется золото-алмазосодержащий горизонт ритмичного переслаивания аргиллитов, песчаников и гравелитов мощностью 1.5–13 м. В конгломератах встречаются линзы белой каолиновой глины гидrolитического происхождения. Граница свиты с подстилающими более древними породами осложнена системой локальных эрозионных врезов, заполненных псаммо-псефитовым материалом. Размеры врезов имеют ширину до 5 м, глубину – 1–2 м. Мощность рудоносного пласта в рамках базального терригенного горизонта оценивается в 2 м.

На основании палинологических комплексов терригенный материал в базальном горизонте отнесен к континентальным осадкам (Мальков, Тельнова, 1991; Тельнова, 2001). По литологическим данным, этот материал чаще всего определяется как речные отложения – серия относительно мелких конусов выноса (Щербаков и др., 2002). По причине продуктивности базального горизонта пижемской свиты на золото и алмазы его обычно трактуют как Ичетьюскую палеороссыпь – речную (Щербаков и др., 2001, 2002; Гракова, 2021) или литоральную (Мальков, Холопова, 2002). При этом в качестве коренного источника алмазов рассматривают лампроиты на Четлассом Камне или промежуточные коллектора, образовавшиеся материалом эродированных протерозойских алмазоносных кимберлитов.

С позиций туффизито-флюидизатной теории, базальный алмазоносный горизонт пижемской свиты рассматривается как результат внедрения в осадочные терригенные отложения по стратиграфическому протерозойско-девонскому несогласию мантийного материала кимберлит-лампроитового состава, обусловленного триас-юрским и неоген-четвертичными этапами тектонической активизации восточной окраины русской платформы (Макеев и др., 1999; Макеев, Макеев, 2003; Рыбальченко и др., 2010; Рыбальченко и др., 2011).

Содержание алмазов в продуктивном горизонте Ичетьюского месторождения достигает 15 кар/т, их прогнозные ресурсы оцениваются в несколько млн карат (Макеев и др., 1998). В качестве спутников алмазов здесь выступают оксиды – Nb-содержащий анатаз, брукит, рутил, ильменорутит, ильменит

(включая пикроильменит), колумбит, касситерит, гематит, магнетит, хромшпинелиды; *силикаты* – альмандин, пирропсодержащий гранат (в т. ч. с примесью кноррингита), магнезиальный оливин, пироксены (в т. ч. хромдиопсид), амфиболы, эпидот, циркон (в т. ч. Y-содержащий), ставролит, турмалин, кианит, алюмоселадонит; *кислородные соли* – ксенотим, монацит, флоренсит, лазулит; *сульфиды* – пирит, халькозин, сфалерит; *самородные металлы* – $Pt_{0.8-0.85}Fe_{0.11-0.16}Ir_{0.01-0.02}Rh_{0.01-0.02}Cu_{0-0.01}(Pd,Ru,Os,Ni)_{0-0.01}$, $Os_{0.68}Ir_{0.2}Ru_{0.02}Rh_{0.01}Cu_{0.01}Pd_{0.01}$; $Ir_{0.3}Rh_{0.25}Pt_{0.22}Ni_{0.22}(Os,Ru)_{0.01}$, $Ru_{0.51}Ni_{0.33}Os_{0.09}Ir_{0.03}Rh_{0.02}Pt_{0.02}$ (Деревянко, 2001; Макеев и др., 1998; Макеев, Макеев, 2001, 2005; Мальков, Холопова, 2002; Макеев, 2008; Щербаков, 2008; Гракова, 2011, 2014, 2021; Макеев и др., 2014; 2018).

Объекты и методы исследований

Согласно результатам многолетних исследований (Дудар, 1996; Деревянко, 2001), алмазы на Ичетьюском месторождении – довольно крупные (рис. 2), варьирующие по размеру от 1 до 8 мм и распределяющиеся по гранулометрическим фракциям следующим образом (%): (+1–2) = 12.5; (+2–4) = 67.5; (+4–8) = 20. По габитусу они подразделяются на округлые формы мантийного растворения – додекаэдровиды (61.2%) и октаэдровиды (3%); октаэдры (4.4%); комбинационные (6%); угловатые формы, обломки и осколки (25.4%). Подавляющее большинство кристаллов – без следов или с незначительными признаками механического износа, характерного для россыпных алмазов. По окраске ичетьюские алмазы изменяются от бесцветных (38%) до бледно-зеленых (28.3%), дымчато-коричневых (19.4%) и желтых (7.5%). 75% ичетьюских алмазов относят к ювелирным.

Объектом наших исследований послужили 78 алмазов, переданных в Институт геологии Коми НЦ УрО РАН руководством ЗАО «МИРЕКО» (И.В. Деревянко, В.М. Маков, В.С. Озеров) для комплексного изучения. В ходе последнего были использованы рентгеноструктурный фотометод (камера типа РКД с диаметром 57.3 мм на базе прибора АРОС), аналитическая СЭМ



Рис. 2. Внешний вид ичетьюских алмазов. Фото А.Б. Макеева

(JSM-6390LV, JSM-6400, Tescan Vega с ЭД и волновым спектрометрами), масс-спектрометрия с лазерной абляцией и индуктивно связанной плазмой (Element II фирмы Finnigan Mat с приставкой UP-213 фирмы New Wave Research (лазер YAG:Nd ($\lambda = 213$ нм), масс-спектрометрический анализ изотопного состава углерода (Delta V. Advantage с аналитическим комплексом Thermo Fisher Scientific) и комплекс люминесцентно-спектроскопических методов. Фазовая диагностика алмазов и включений в них уточнялась методом комбинационного рассеяния (спектрометр Renishaw inVia). Изображения внутреннего строения алмазов были получены по вырезанным из кристаллов пластинам методом катодolumинесценции на электронном микроскопе CamScan MX2500S. Соответствующие спектры регистрировались при 77 К на установке с микроанализатором «Самбах». Фотолуминесценция анализировалась при 77 К в диапазоне 490–1050 нм на спектрометре Renishaw In Via (возбуждение лазерами – 488 нм и 785 нм) и Horiba FL3 (возбуждение лазером – 405 нм). Спектры ИК поглощения регистрировали на спектрометре Vertex 70 с микроскопом Hyperion1000 при разрешении 2 см^{-1} , усреднении от 32 до 500 сканов в диапазоне от 600 до 4000 см^{-1} . Измерения проводили в центральной области и в краевой части кристаллов для выявления зональности. В пластинах ИК-спектры регистрировали по профилям с

шагом 200 мкм, область регистрации отдельного спектра составила 100×100 мкм. Спектры оптической плотности нормировали по собственному двухфонному поглощению, общую концентрацию N_{tot} вычисляли по известным коэффициентам пропорциональности. Концентрацию структурно азота определяли как валовую, так и в форме дефектов А и В1. Относительные погрешности определения при этом составили до 10% – в зависимости от формы кристаллов, толщины, наличия включений, морфологии поверхности. Оценивался также коэффициент поглощения в полосе планарных дефектов В2 и положение его максимума, зависящие от концентрации и размера соответствующих дефектов. Измерялась также концентрация СН-дефектов (система 3107 см^{-1}).

Кристалломорфология алмазов

Для гониометрических исследований были отобраны наиболее типичные для Ичетъюского месторождения 50 додекаэдров и относительно крупных обломков с поверхностями мантийного растворения и признаками пластической деформации и ударного износа (Ракин, 2003, 2013). Редкое присутствие фрагментов поверхностей октаэдра объясняется процессами регенерации

эллипсоидной поверхности растворения и травления. Доля двойников среди исследованных алмазов составила 10%, что находится в хорошем согласии с округлыми алмазами из Восточной Бразилии. По угловым размерам гониометрических рефлексов, полученных от кристаллов с наиболее сохранившимися поверхностями растворения, были рассчитаны параметры обобщенного эллипсоида, охарактеризованного на диаграмме форм растворения алмазов (рис. 3). Полученные данные в сопоставлении с данными по округлым алмазам из месторождений важнейших алмазоносных провинций приводят к следующим выводам.

Закономерное воздействие диффузионного травления и пластического течения структуры привело к незначительному занижению параметра a_2 . Механическая деградация алмазов в форме ударного износа и пластического течения структуры была отмечена на 96% кристаллов. При этом признаки ударного износа проявились на 83% кристаллов, но только 2 кристалла (4% от числа исследованных) продемонстрировали наивысшую степень износа. Структуры пластического течения тоже были установлены на 83% кристаллах, но наивысшая степень этого зафиксирована лишь на 18% алмазов.

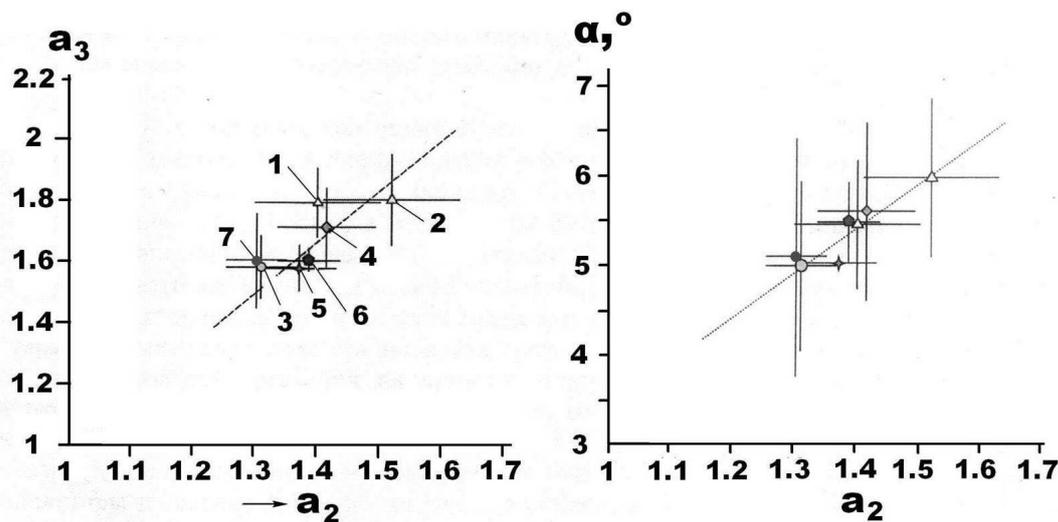


Рис. 3. Диаграмма форм растворения алмазов, выявленных голографическим методом (a_2 , a_3 , α – масштабно-инвариантные параметры поверхности эллипсоида растворения). Коллекции алмазов: 1, 2 – соответственно, Урал-1 и Урал-2; 3 – бассейн р. Макаубас, Восточная Бразилия; 4, 5 – россыпи соответственно на рр. Холомолоох и Эбелях, Якутия; 6 – россыпь на р. Булкур, Западное Верхоянье; 7 – месторождение Ичетъю. Пунктирными линиями показаны генеральные тренды параметров. Отрезки соответствуют стандартным отклонениям

По показателю ударного износа ичетьюские алмазы занимают лидирующее положение среди исследованных нами ранее коллекций алмазов россыпных и коренных алмазных месторождений. На поверхностях ичетьюских алмазов кинетический и диффузионный режимы растворения проявились по-разному. Признаки первого режима отмечены на 52% кристаллов, в том числе для 22% кристаллов с наивысшей степенью трансформации поверхности. Признаки второго режима обнаружены на 88% кристаллов, в том числе на 22% алмазов – с высокой степенью проявления. Растворение в обоих режимах свидетельствует об осуществлении этого процесса как минимум в поле стабильности графита, т.е. в условиях подкоровых РТ-параметров. Активность проявления обоих режимов свидетельствует о протекании растворения как в восстановительных, так и в окислительных условиях. На некоторых алмазах сохранились признаки фрагментарного перехода алмаза в графит. Полирующий износ, завершающий историю формирования поверхности алмазов в россыпях, для ичетьюских кристаллов не характерен.

В целом, на основании полученных данных можно сделать следующее заключение. Ичетьюские алмазы претерпели растворение в мантийных условиях, испытав пластическое течение. Затем в процессе эвакуации к поверхности они подвергались хаотическому механическому износу с последующим травлением при высоких РТ-параметрах. Значительный полирующий износ, происходящий в экзогенных условиях, на исследованных алмазах выражен крайне слабо, что противоречит россыпной гипотезе образования соответствующего месторождения.

Внутреннее строение (анатомия) алмазов

Для исследования анатомии ичетьюских алмазов были изготовлены пластинки размером +2–4 мм и толщиной 400–600 мкм. Все проанализированные кристаллы имеют зонально-секторальное внутреннее строение различной контрастности, достаточно хорошо выявляющееся в режимах аномального двулучепреломления и катодolumинесценции (рис. 4). Проведенный анализ показал (Васильев и др., 2014, 2017), что наблюдаю-

щиеся неоднородности соответствуют динамике роста октаэдрических форм, впоследствии частично растворенных с поверхности. В строении некоторых кристаллов отмечаются регенерационные слои. В двух кристаллах методом КР-спектроскопии диагностированы включения форстерита (перидотитовый парагенезис), в одном образце обнаружены включения диопсида, в пяти алмазах – включения сульфидов. Отмечены также микровключения графитоподобной фазы.

В целом внутреннее строение исследованных ичетьюских алмазов существенно отличается от зонально-секториальных картин неоднородности алмазов из наиболее изученных в этом отношении кимберлитовых месторождений. В частности, в ичетьюских алмазах не отмечены случаи совместного проявления пирамид нарастания кубических и октаэдрических граней. Ростовые формы здесь представлены только октаэдрами, часто с мелкоступенчатыми гранями. В некоторых кристаллах центральная часть имеет концентрические ростовые поверхности, также не характерные для внутреннего строения кимберлитовых алмазов из месторождений Якутской и Архангельской провинций.

Люминесценция и спектроскопия

Кристаллы ичетьюских алмазов проявляют преимущественно голубую (480–510 нм) люминесценцию, пластинки при электронном возбуждении обнаруживают в основном синее свечение (450–480 нм), некоторые ростовые слои отличаются зеленой (510–550 нм) люминесценцией (Клюев и др., 1974; Исаенко, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002; Петровский и др., 2014; Васильев и др., 2017). В спектрах фотolumинесценции, полученных с поверхности алмазных пластинок (рис. 5, а), зарегистрированы система радиационных центров N3 (дефекты N₃V) и две системы пластически-деформационных центров N3 и N4 (VN₂V).

Кроме того, в таких спектрах наблюдается так называемая А-полоса, объединяющая фонные повторения линии излучения центра N3. Некоторые образцы по границе октаэдрического фантома имеют небольшие участки с розовой люминесценцией.

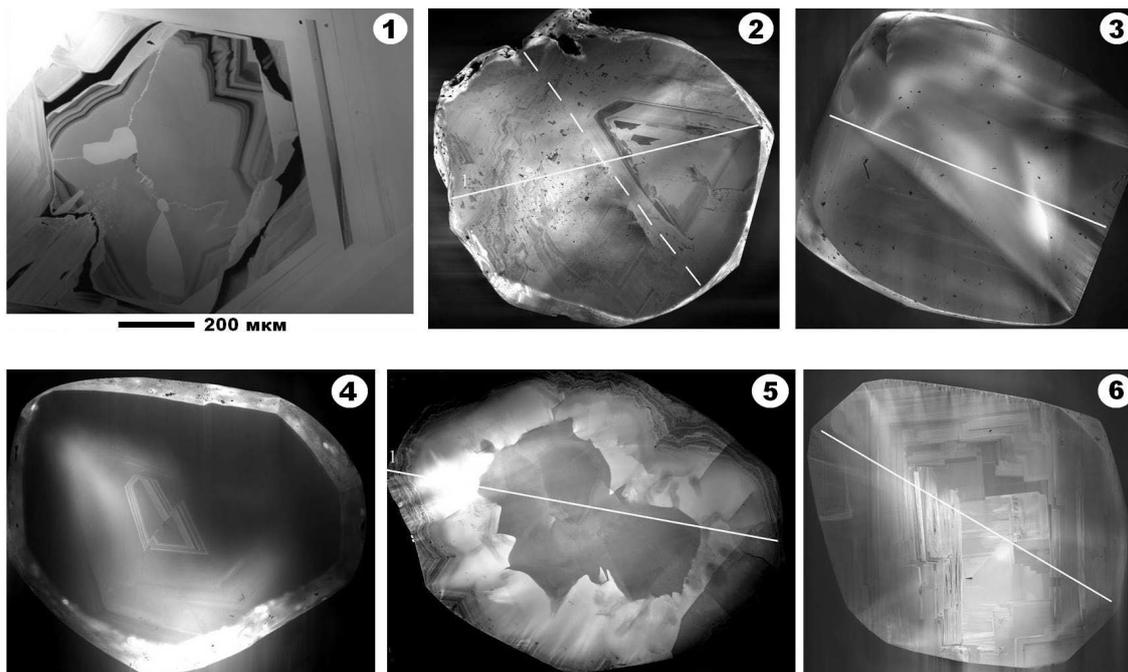


Рис. 4. Неоднородности внутреннего строения ичетьюских алмазов, выявленные методом катодолюминесценции. Белые линии – профили измерения концентрации азотных дефектов

В спектрах рентгенолюминесценции (рис. 5, б) регистрируются те же системы, но в менее контрастном виде. В версии ЭПР упомянутые радиационные и деформационные центры трактуются как центры P1 и P2 (Лютюев и др., 1999).

Особенно важное значение для определения генетической природы алмазов имеют данные ИК-спектроскопии. Проведенные исследования показали, что для ичетьюских алмазов свойственно широкое варьирование как валовой концентрации структурного азота, так и степени агрегации атомов азота с образованием дефектов А (N_2), В1 (N_4V) и планарных дефектов В2 (двумерные кластеры вытолкнутых в междуузельные пространства атомов углерода). Валовая концентрация азота изменяется в пределах 10–3000 ppm, степень агрегации атомов азота до центров В1 колеблется от 0 до 100%. Для планарных дефектов установлены признаки разрушения. Отмечается также постоянная примесь СН-центров, концентрация которых прямо согласуется со степенью агрегации азота дефектов. Изменения валовой концентрации азота, степени агрегации его атомов, концентрации СН-дефектов происходят в ичетьюских алмазах анатомически

закономерно, образуя максимумы в их центральных частях (рис. 6).

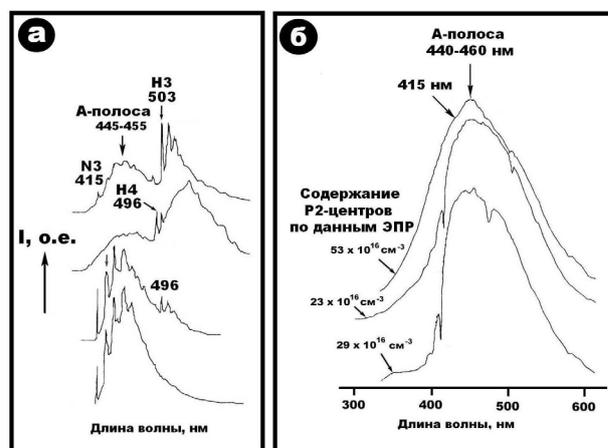


Рис. 5. Типичные для ичетьюских алмазов спектры фото- (а) и рентгено- (б) люминесценции

Обобщение полученных данных приводит к выводу о том, что ичетьюские алмазы претерпели высокотемпературный мантийный отжиг и практически не подвергались механическому износу в условиях земной поверхности. На диаграмме У.В. Тейлора (Tayler, 1990) при принятии возраста в 3 млрд лет основная масса исследованных кристаллов укладывается в температурный диапазон от 1050 до 1250 К (рис. 7).

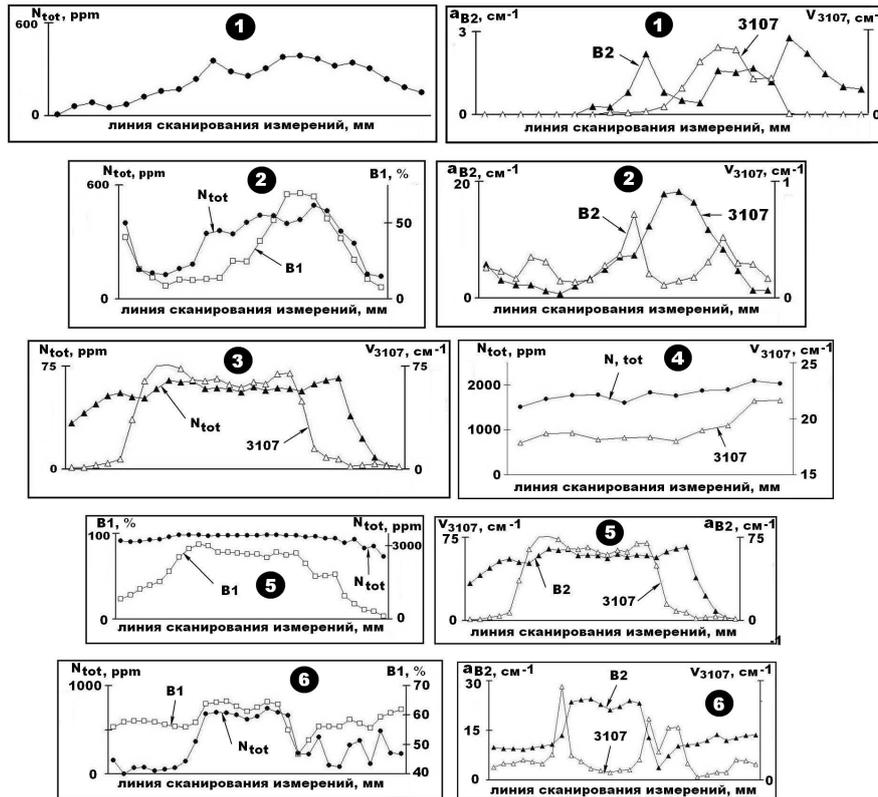


Рис. 6. Корреляция концентраций структурных дефектов с внутренним строением мантийских алмазов. Номера соответствуют номерам кристаллов на рис. 4

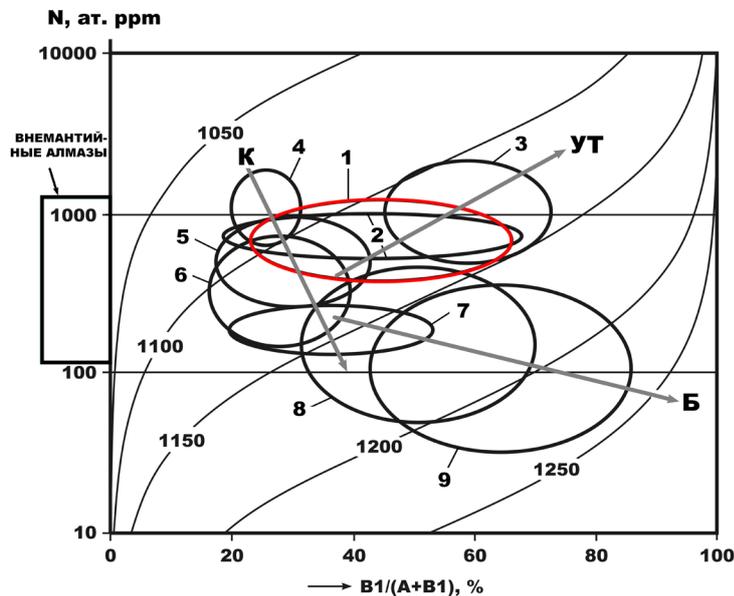


Рис. 7. Генеральная диаграмма для оценки степени агрегации точечных азотных дефектов в мантийных алмазах по У.Р. Тейлору, рассчитанная по ИКС-данным: 1 – ичетъюские алмазы; 2, 3 – алмазы из соответственно Усьвинской и Рассольнинской россыпей (Северный Урал); 4, 5 – кимберлитовые алмазы из соответственно Архангельской и Якутской провинции; 6 – кимберлитовые алмазы с Украинского кристаллического щита; 7 – кимберлитовые алмазы из Южно-Африканской провинции; 8, 9 – бразильские алмазы из провинций соответственно Минас-Жерайс и Жуина. Серыми стрелками показаны тренды изменения азотструктурных свойств алмазов. Тренды: К – кимберлитовый, УТ – уральский туффизитовый; Б – бразильский монокристалльно-карбонадный

В двух образцах коэффициент поглощения на СН-дефектах достигает 17 и 56 см⁻¹ при степени агрегации азота в 100 и 80% В1 соответственно. Проявление планарных дефектов зависит от степени агрегации азотных атомов до В1. В кристаллах с низкой долей В1 максимум полосы В2 смещен к 1370–1372 см⁻¹, приобретая резкую асимметричность.

В кристаллах с наибольшей долей дефектов В1 положение максимума полосы В2 не сдвигается далее 32 см⁻¹, а в одном таком кристалле полосы В2 вообще не были зарегистрированы. При этом для большинства исследованных кристаллов установлено соотношение между системами В2 и В1, близкое к максимальному.

Сравнение полученных данных с результатами ИК-спектроскопического исследования основных генетических типов алмазов показывает, что ичетьюские кристаллы, безусловно, относятся к мантийным, объединяясь с уральскими алмазами в рамках единого тренда изменчивости валовой концентрации и степени агрегации азотных дефектов. При этом следует отметить, что алмазы Тимано-Североуральской провинции характеризуются прямой корреляцией между валовой концентрацией структурного азота и степенью агрегации азотных дефектов в отличие от кимберлитовых алмазов и бразильских карбонадо, в которых между теми же параметрами реализуется обратная корреляция.

Элементы-примеси и изотопия углерода

В составе ичетьюских алмазов методом ЛА-ИСП-МС выявлено 45 микроэлементов со средними содержаниями (мг/т): Cr (37), Fe (820), Co (2), Ni (25), Cu (31); Mn (44), Zn (130), Sc (8), Ti (125), V (2); Re (1), Bi (6), Mo (10), Ag (458), Cd (28), Sn (238); Th (242), U (3), Tl (1), Pb (256), Hf (2), Ta (3), W (1), Nb (11), Sb (41), Cs (2), Ba (35), Rb (50), Sr (86), Zr (119), Y (23), La (45), Ce (66), Pr (12), Nd (60), Sm (21), Eu (4), Gd (20), Tb (3), Dy (13), Ho (3), Er (6), Tm (0.5), Yb (3), Lu (0.5). Средняя сумма содержаний микроэлементов определяется в 3.84 г/т. Сумма лантаноидов достигает в среднем 257 мг/т, что составляет около 7% от баланса микроэлементов. Нор-

мированные на хондрит концентрации лантаноидов образуют тренды со сравнительно пологим уклоном в сторону тяжелых элементов (рис. 8), что несколько необычно. Кимберлитовые алмазы, например, демонстрируют субгоризонтальные тренды.

С позиции модели глобальной геохимической дифференциации (Щербаков, 1976; Тейлор, Леннон, 1988) в составе исследованных алмазов относительная концентрация мантийных (цетростремительных) элементов составляет 29%, мантийно-коровых (минимально- и дефицитно-центробежных) – 34%, а коровых (центробежных) – 37%. На диаграмме геохимической дифференциации (рис. 9) точка среднего микроэлементного состава ичетьюских алмазов оказалась вблизи поля состава примитивной мантии, характеризующейся минимальной степенью деплетирования. Интересно, что по рассматриваемому критерию ичетьюские алмазы существенно отличаются не только от кимберлитовых, но и уральских туффзитовых алмазов (Силаев и др., 2015), демонстрируя гораздо меньшее относительное содержание промежуточных по геохимическим свойствам – мантийно-коровых – элементов-примесей.

По результатам масс-спектрометрии, коэффициент изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) в ичетьюских алмазах варьируется в необычно широком диапазоне – от –1.56 до –27.4‰.

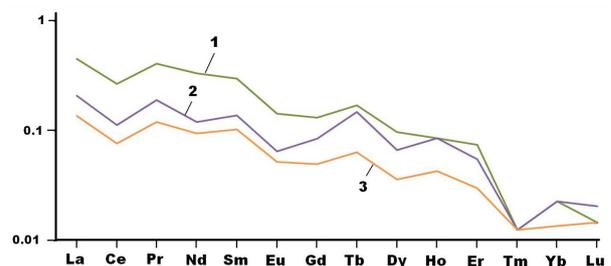


Рис. 8. Хондритнормированные содержания лантаноидов в ичетьюских алмазах: 1, 2 – образцы с наибольшими содержаниями лантаноидов; 3 – средние содержания по пяти образцам

В пределах этого диапазона полученные данные распределяются неравномерно, подразделяясь в соответствии с современными представлениями о первоисточниках углерода в природных алмазах на три группы: «уг-

лекислогоазовые» ($-5.86 \pm 1.86\%$, встречаемость – 70.7%), «угарногазовые» ($-13.86 \pm 2.97\%$, встречаемость – 18.5%) и «метановые» (-24.26% , встречаемость – 10.8%) алмазы.

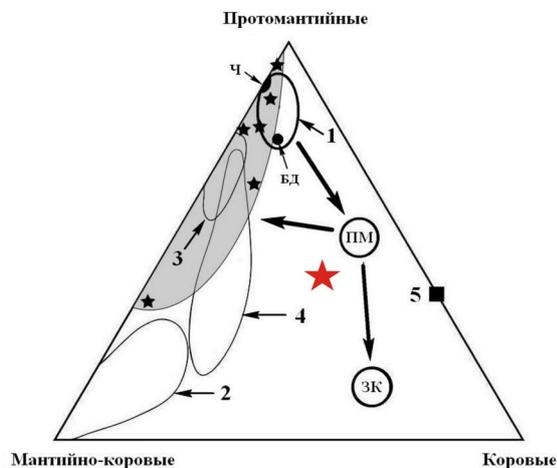


Рис. 9. Сопоставление ичетьюских алмазов (красная звезда) с метеоритами и основными геолого-генетическими типами алмазов по степени геохимической дифференциации микроэлементов: 1 – поле метеоритов (Ч – хондрит «Челябинск», БД – сидерит «Большой Долгучан»); 2, 3 – алмазы из соответственно кимберлитовой трубки Удачной и уральских туффзитов (2), эбеляхских, уральских и бразильских россыпей (3); 4 – якутиты; 5 – бразильские карбонадо. Черными звездочками и заливкой показаны толбачинские вулcano-атмоэлектрогенные алмазы. ПМ и ЗК – соответственно примитивная мантия и земная кора

Таким образом, выясняется, что в отличие от бразильских округлых алмазов с преимущественно «метановым» углеродом (Галимов и др., 1985; Петровский и др., 2005) и сибирских якутитов с «угарногазовым» углеродом (Силаев и др., 2014) ичетьюские алмазы содержат все три варианта углерода, хотя и в разной пропорции.

Микроминеральные пленки на поверхности алмазов

С целью изучения пленочных микроминерализаций на поверхности ичетьюских алмазов были исследованы несколько десятков округлых (68% коллекции), угловатых

(20%) и ступенчато-угловатых (12%) кристаллов. Исследованные округлые алмазы (рис. 10) характеризовались размерами $(2.49 \pm 0.79) \times (2.23 \pm 0.7) \times (2.02 \pm 0.67)$ мм, коэффициент вариации размеров лежал в пределах 30–35%. Коэффициент вытянутости – 1.26 ± 0.26 – свидетельствует о близости формы кристаллов к изометричной. Угловатые и ступенчато-угловатые алмазы (рис. 11) были почти в два раза мельче – $(1.48 \pm 1.17) \times (1.31 \pm 1.03) \times (1.15 \pm 0.9)$ мм, с коэффициентом вариации размеров 75–80% и коэффициентом вытянутости 1.27 ± 0.2 .

На поверхности практически всех проанализированных кристаллов были обнаружены локальные микроминеральные пленки толщиной до 200 мкм. Размеры пленок в зависимости от морфологии кристаллов существенно различаются. На поверхности более крупных округлых алмазов они статистически определяются как $(736 \pm 233) \times (614 \pm 145)$ мкм, в единичных случаях достигают 3 мм. Коэффициент удлинения пленок составляет (2.88 ± 0.9) . Для более мелких угловатых и ступенчато-угловатых алмазов характерны более локальные пленки размером $(251 \pm 85) \times 216 \pm 74$ мкм, но при этом в 1.5–2 раза более вытянутые – (4.63 ± 6.07) , иногда и вовсе волосовидные. Во всех случаях минеральные пленки имеют полизернистое строение. Размеры зерен в них варьируются в диапазоне от 1 мкм до 1 мм, подразделяясь при этом на три градации.

88% зерен колеблются по размеру в диапазоне 1–50 мкм, оцениваясь статистически как $(12.9 \pm 11) \times (7.2 \pm 6.6) \times (2.2 \pm 2)$ мкм. Коэффициенты вариации размеров таких частиц составляют 85–95%.

8% зерен изменяются в пределах 51–100 мкм – $(67.9 \pm 16.3) \times (40.3 \pm 24.4) \times (2.3 \pm 1.4)$ мкм. Коэффициенты вариации их размеров резко снижаются до 24–65%.

4% зерен варьируются в весьма широком диапазоне – от 100 мкм до 1 мм – $(204.5 \pm 67) \times (92.6 \pm 22.7) \times (2.2 \pm 0.7)$ мкм.

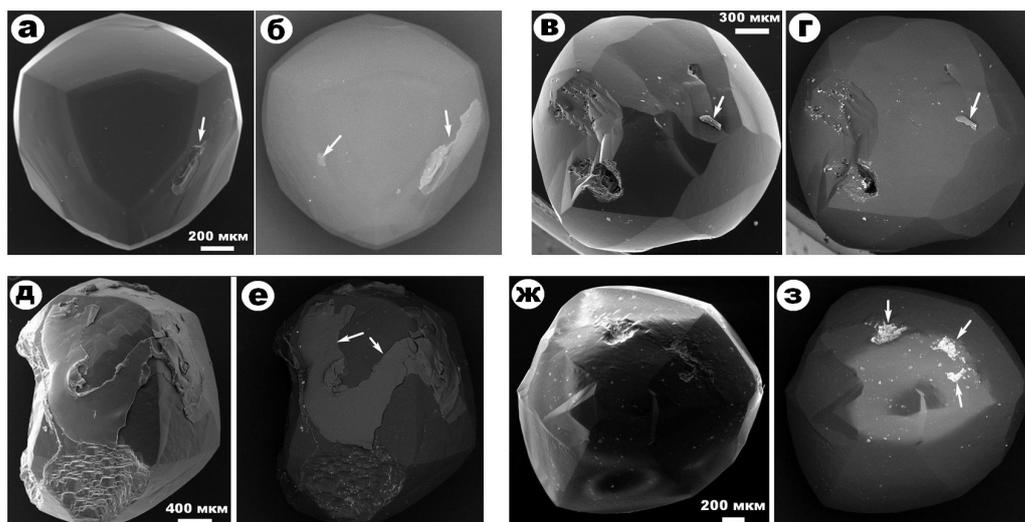


Рис. 10. Примеры исследованных округлых алмазов с микроминеральными пленками на поверхности (показаны стрелками). СЭМ-изображения в режимах вторичных (а, в, д, ж) и упруго-отраженных (б, г, е, з) электронов

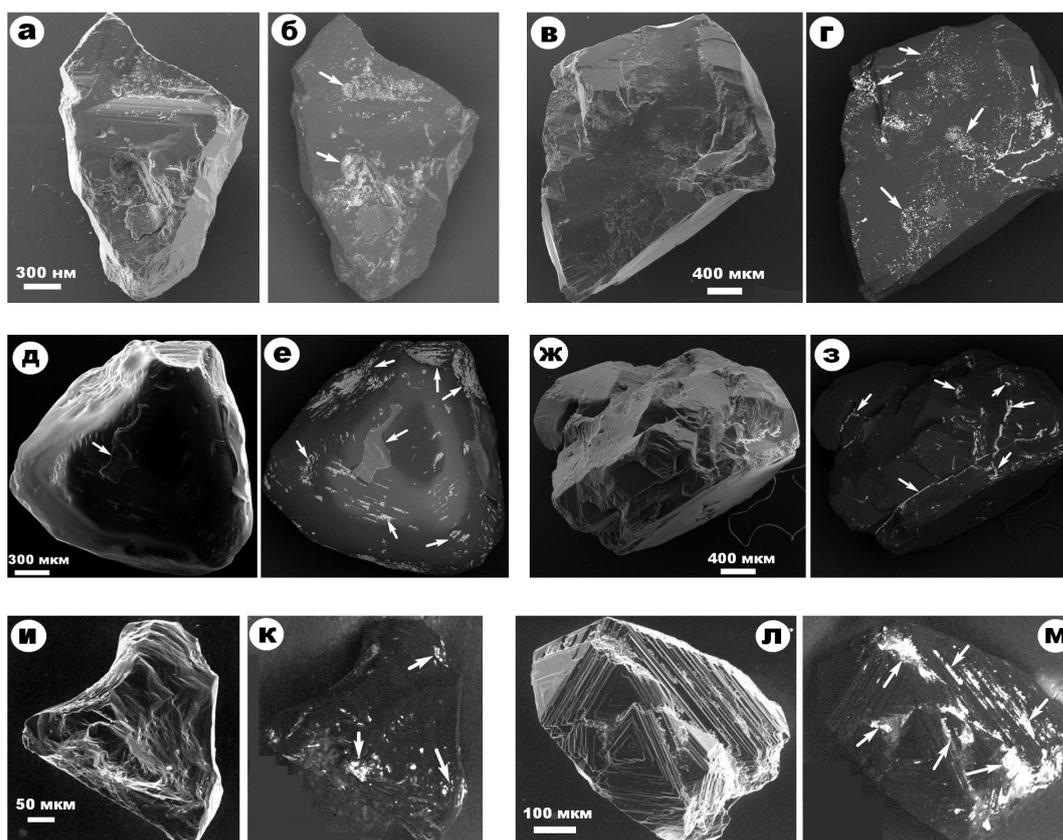


Рис. 11. Примеры исследованных угловатых и ступенчато-угловатых алмазов с микроминеральными пленками на поверхности (показаны стрелками). СЭМ-изображения в режимах вторичных (а, в, д, ж, и, л) и упруго-отраженных (б, г, е, з, к, м) электронов

Коэффициенты вариации размеров в этой градации наиболее низкие, оценивающиеся в 25–35%. Последнее указывает на то, что, несмотря на максимальный разброс по размерам, эта градация зерен статистически харак-

теризуется в целом наибольшей размерной однородностью.

В ходе СЭМ-аналитических исследований (около 500 рентгеноспектральных микронзондовых анализов) в составе пленок были

выявлены 53 микроминерала, относящиеся ко всем основным минеральным типам.

Тип самородных металлов, сплавов и простых веществ представлен 16 видами и разновидностями: самородное железо; алюможелезо – $\text{Fe}_{0.86-0.9}\text{Al}_{0.01-0.14}$; хромжелезо – $\text{Fe}_{0.75-0.89}\text{Cr}_{0.11-0.25}$; никельхромжелезо – $\text{Fe}_{0.65-0.69}\text{Cr}_{0.18-0.32}\text{Ni}_{0-0.11}\text{Mn}_{0.02-0.03}$; никельцинкжелезо – $\text{Fe}_{0.51}\text{Zn}_{0.36}\text{Ni}_{0.13}$; молибденхромжелезо $\text{Fe}_{0.65}\text{Cr}_{0.32}\text{Mo}_{0.03}$; марганецникельхромжелезо – $\text{Fe}_{0.69}\text{Cr}_{0.18}\text{Ni}_{0.11}\text{Mn}_{0.02}$; электрум медистый – $\text{Au}_{0.56}\text{Ag}_{0.26}\text{Cu}_{0.18}$; серебро – $\text{Ag}_{0.97-1}\text{Cu}_{0-0.03}$ (в самородной форме и в форме твердого раствора в акантите); золотопалладий – $\text{Pd}_2\text{Au}-\text{PdAu}$; молибдензолотопалладий – $\text{Pd}_{5-13}\text{Au}_{3-7}\text{Mo}_{1-2}$; таллийзолотопалладий – $\text{Pd}_{0.62}\text{Au}_{0.35}\text{Pb}_{0.03}$; латунь – $\text{Cu}_{0.6-0.65}\text{Zn}_{0.35-0.4}$; вольфрам-квансонгит – $\text{W}-\text{WC}$; свинец – $\text{Pb}_{0.82-0.95}\text{Ag}_{0-0.15}\text{Cu}_{0.03-0.06}$ (твердый раствор в котуните); фаза состава S_7As_2 . Из выявленных сплавов наиболее редкими являются золотопалладий, уже отмечавшийся в связи с ичетьюскими алмазами (Макеев, Филиппов, 1999; Макеев, Макеев, 2001), молибдензолотопалладий и впервые обнаруженный таллийзолотопалладий.

К типу халькогенидов относятся два сульфида: акантит – Ag_2S и галенит – PbS (твердый раствор в котуните).

Тип галогенидов включает 9 минералов: галит – $(\text{Na}_{0.94-0.98}\text{K}_{0-0.02}\text{Ca}_{0-0.02}\text{Pb}_{0-0.01})\text{Cl}_{1-1.04}$; сильвин – KCl ; йодсодержащий хлораргирит – $\text{Ag}(\text{Cl}_{0.98}\text{J}_{0.02})$; бромйодаргирит – $\text{Ag}(\text{J}_{0.67}\text{Br}_{0.33})$; йодаргирит – AgJ ; гибридная фаза – $\text{Ag}(\text{Cl}_{0.67-0.85}\text{Br}_{0.08-0.09}\text{J}_{0.06-0.07})_{0.83-1}(\text{OH})_{0-0.17}$; котунит – PbCl_2 ; таллиевый гидроксихлорид – $\text{TlCl}_{1.33-1.4}(\text{OH})_{0.6-0.67}$; свинцово-таллиевый гидроксихлорид – $(\text{Tl}_{0.4-0.85}\text{Pb}_{0.15-0.6})\text{Cl}_{0.27-1.44}(\text{OH})_{0.56-1.73}$.

Тип оксидов представлен 6 видами: кварц; анатаз; массикот – $(\text{Pb}_{0.95-1}\text{Cu}_{0.03-0.05})\text{O}$; цинкит – ZnO ; фаза $(\text{La}_{2.24}\text{Nd}_{0.76})_2\text{O}_3$; шпинелидные твердые растворы – $(\text{Fe}_{0.35-1}\text{Mn}_{0-0.29}\text{Ni}_{0-0.3}\text{Cu}_{0-0.05})(\text{Fe}_{1.34-2}\text{Cr}_{0-0.66}\text{Ti}_{0-0.56})_2\text{O}_4$; гётит.

Тип силикатов включает 4 вида: алюмоселадонитовая слюда – $\text{K}_{0.43-0.5}(\text{Al}_{1.29-1.34}\text{Mg}_{0.14-0.18}\text{Fe}_{0.5-0.53})_2[\text{Al}_{1.28-1.32}\text{Si}_{2.68-2.72}\text{O}_{10}](\text{OH})_{0.4-0.55}$; каолинит – $(\text{Al}_{3.63-4.05}\text{Fe}_{0-0.4})_{3.63-4.05}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_{6.92-8.18}$; циркон – $(\text{Zr}_{0.9-1}\text{Hf}_{0-0.08})[\text{SiO}_4]$; ортопироксен – $(\text{Mg}_{0.65-1}\text{Fe}_{0-0.36})[\text{SiO}_3]$.

К типу кислородных солей отнесены 16 минералов и фаз: кальцит; сидерит; сода – $\text{Na}_2[\text{CO}_3]n\text{H}_2\text{O}$; Na -смитсонит – $(\text{Zn}_{0.76}\text{Na}_{0.24})[\text{CO}_3]_{0.88}$; фазы – $(\text{Ca}_{0.57-0.88}\text{Mg}_{0.02-0.03}\text{Na}_{0.08-0.35}\text{K}_{0.02-0.05})[\text{CO}_3]_{0.74-0.89}$, $\text{K}[\text{CO}_3]_{0.11-0.17}\text{Cl}_{0.65-0.88}$, $\text{Na}[\text{CO}_3]_{0.39}\text{Cl}_{0.22}$, $(\text{Na}_{0.68-0.76}\text{K}_{0.01-0.13}\text{Ca}_{0.03-0.05}\text{Mg}_{0.01-0.06})[\text{CO}_3]_{0.34-0.46}\text{Cl}_{0.31-0.43}$, $\text{Na}_{0.64}\text{K}_{0.12}\text{Zn}_{0.15}\text{Ca}_{0.09}[\text{CO}_3]_{0.46}\text{Cl}_{0.31}$, $(\text{Pb}_{0.07-0.88}\text{Mg}_{0-0.24}\text{Ca}_{0-0.1}\text{Na}_{0.11-0.63}\text{K}_{0-0.31})[\text{CO}_3]_{0.24-0.88}\text{Cl}_{0.12-0.79}$, $(\text{Na}_{0.72-0.95}\text{K}_{0.01-0.23})[\text{CO}_3]_{0.11-0.26}\text{Cl}_{0.66-0.78}$; гипс; арканит-тенардит – $(\text{Na}_{1.74}\text{K}_{0.26})[\text{SO}_4]$; фазы – $(\text{Na}_{0.65}\text{K}_{0.35})[\text{SO}_4]_{0.35}\text{Cl}_{0.3}$ и $\text{Na}_{0.62-0.66}\text{K}_{0.23-0.34}\text{Ca}_{0.01-0.11}\text{Mg}_{0-0.03}[\text{SO}_4]_{0.22-0.31}\text{Cl}_{0.41-0.66}$; алюмосульфатфосфатные твердофазные смеси состава $(\text{Ca}_{0.09-0.52}\text{Ba}_{0-0.07}\text{Sr}_{0-0.38}\text{La}_{0-0.79}\text{Ce}_{0-0.56}\text{Nd}_{0-0.19}\text{Pb}_{0-0.1})_{0.55-1.48}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.28-2.1}[\text{SO}_4]_{0-0.43}(\text{OH})_{5.7-7}$.

Наибольший интерес среди выявленных в пленках минералов представляют две системы твердых растворов – шпинелидная и алюмосульфатфосфатная.

Шпинелидные твердые растворы являются широко варьирующей смесью шести миналов (мол. %): магнетита (68.63 ± 28.97); хромита (10.84 ± 15.38); яковсита (9.08 ± 11.71); ульвита (5.02 ± 14.7); треворита (4.14 ± 9.66) и купрошпинели (0.98 ± 3.28). По характеру распределения миналов эти смеси можно подразделить на десять разновидностей (частота встречаемости, %): магнетитовую (40.9); хромит-яковсит-магнетитовую (20.4); ульвит-магнетитовую (10.2); хромит-треворит-магнетитовую (8.2); магнетит-ульвитовую (6.1); хромит-магнетитовую (4.1); яковсит-магнетитовую (4.1); купрошпинель-яковсит-магнетитовую (2); магнетит-хромитовую (2); магнетит-треворит-хромитовую (2). Очевидно, что на фоне шпинелидов, выявленных на месторождении Ичетью в алмазосодержащих породах (Макеев, Макеев, 2005), описанные нами минералы являются гораздо менее хромистыми. В ряду генетических типов шпинелидов от включений в мантийных алмазах до акцессориев в альпинотипных ультрабазитах (Ваганов, 2000) рассматриваемые минералы выглядят наименее глубинными (рис. 12). Однако и при этом имеющаяся в них примесь купрошпинелевого минала может свидетельствовать об образовании пленочных шпинелидов в ходе эвакуации ичетьюских алмазов из мантии.

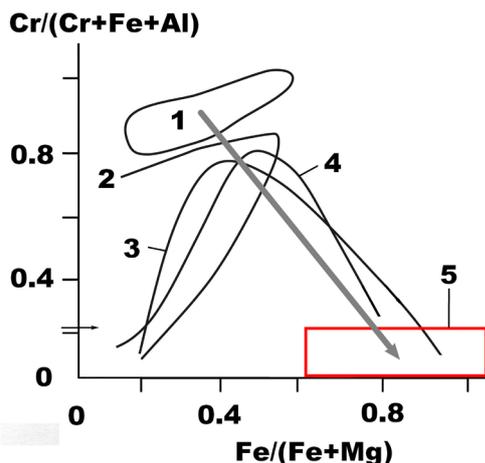


Рис. 12. Составы шпинелидов алмазной ассоциации: 1 – соответственно включения в алмазах; 2 – алмазоносные кимберлиты и лампроиты; 3 – неалмазоносные кимберлиты; 4 – альпинотипные ультрабазиты; 5 – шпинелиды на поверхности ичетьюских алмазов. Стрелкой показан вектор снижения глубинности образования шпинелидов

Система поликомпонентных алюмосульфатфосфатов, характерная именно для эндогенных минеральных месторождений (Силаев и др., 2001), особенно широко рас-

пространена в микроминеральных пленках на поверхности ичетьюских алмазов (табл. 1). Эмпирическая брутто-формула этих минералов в рассматриваемом случае имеет вид – $(Ca_{0.13-0.5} Sr_{0.07-0.31} Ba_{0-0.16} Pb_{0-0.1} La_{0-0.79} Ce_{0-0.79} Nd_{0-0.19})_{0.62-1.69} [PO_4]_{1.28-1.81} [SO_4]_{0-0.43} (OH)_{4.4-7.6}$. В пересчете на минералы состав алюмосульфатфосфатных твердых растворов определяется следующим образом (мол. %): флоренсит = 45.96 ± 12.38 ; вудхаузеит = 29.26 ± 24.29 ; сванбергит = 22.44 ± 9.8 ; пироморфит = 5.53 ± 3.63 . Преобладающему в смесях преимущественно цериевому флоренситу (рис. 13, а) соответствует эмпирическая формула $(Ce_{0-1} La_{0-1} Nd_{0-0.39}) Al_3 [PO_4]_2 (OH)_6$. Среди изученных нами ранее генотипов алюмосульфатфосфатных твердых растворов из гидротермальных и алмазных месторождений (Силаев и др., 2008) алюмосульфатфосфаты в пленках на ичетьюских алмазах ближе всего коррелируются с аналогичными минералами в уральских алмазоносных туффизитах, несколько отличаясь от них только повышенным содержанием церия (рис. 13, б).

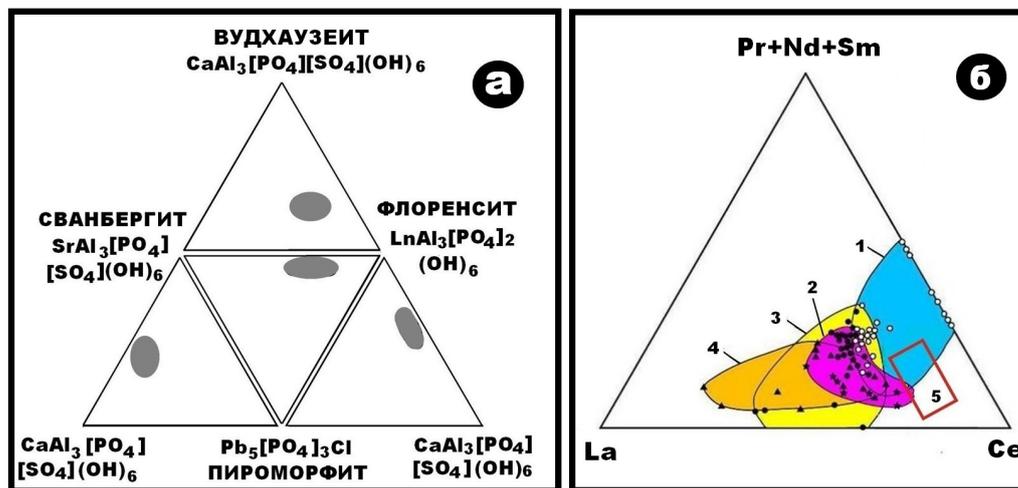


Рис. 13. Минеральный состав алюмосульфатфосфатов, выявленных на поверхности ичетьюских алмазов (а, поля, показанные заливкой), и катионный состав алюмосульфатфосфатных твердых растворов в гидротермальных и алмазных месторождениях (б). На б: 1 – месторождение редкоземельных алюмо-кварцитов на Полярном Урале; 2 – алмазоносные туффизиты на Среднем и Северном Урале; 3 – Крестовоздвиженская и Полуденная алмазосодержащие «россыпи» на Среднем Урале; 4 – включения в карбонадо из месторождений Восточной Бразилии; 5 – пленки на поверхности ичетьюских алмазов

Таблица 1. Минимальный состав (%) и эмпирические формулы алюмосульфатфосфатных твердых растворов, обнаруженные в пленках на ичтёюских алмазах

№ пп	Пиро-морфит	Вудхау-зеит	Сванбергит	Фло-ренсит	Брутто-формула	Формула флоренсита
1	0	24.7	23.6	51.7	$(\text{Ca}_{0.22}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.28}\text{Nd}_{0.07}\text{Sr}_{0.21})_{0.89}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.58}[\text{SO}_4]_{0.43}(\text{OH})_{5.64}$	$(\text{Ce}_{0.61}\text{La}_{0.24}\text{Nd}_{0.15})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
2	10	23.7	17.5	48.8	$(\text{Ca}_{0.14}\text{Ba}_{0.05}\text{La}_{0.09}\text{Ce}_{0.24}\text{Nd}_{0.06}\text{Sr}_{0.14}\text{Pb}_{0.08})_{0.8}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.43}[\text{SO}_4]_{0.19}(\text{OH})_{6.12}$	$(\text{Ce}_{0.61}\text{La}_{0.23}\text{Nd}_{0.16})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
3	0	17.54	13.16	69.3	$(\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.79}\text{Sr}_{0.15})_{1.14}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.65}[\text{SO}_4]_{0.1}(\text{OH})_{6.92}$	$\text{LaAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
4	7.22	15.46	10.31	67.01	$(\text{Ca}_{0.15}\text{La}_{0.07}\text{Ce}_{0.54}\text{Nd}_{0.04}\text{Sr}_{0.1}\text{Pb}_{0.07})_{0.97}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.41}(\text{OH})_{7.36}$	$(\text{Ce}_{0.84}\text{La}_{0.11}\text{Nd}_{0.05})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
5	10.12	22.8	10.3	56.78	$(\text{Ca}_{0.18}\text{La}_{0.16}\text{Ce}_{0.27}\text{Sr}_{0.1}\text{Pb}_{0.08})_{0.79}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.53}[\text{SO}_4]_{0.09}(\text{OH})_{6.24}$	$(\text{Ce}_{0.62}\text{La}_{0.38})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
6	4.4	24.18	21.98	49.44	$(\text{Ca}_{0.22}\text{La}_{0.15}\text{Ce}_{0.25}\text{Nd}_{0.05}\text{Sr}_{0.2}\text{Pb}_{0.04})_{0.91}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.67}[\text{SO}_4]_{0.08}(\text{OH})_{6.1}$	$(\text{Ce}_{0.55}\text{La}_{0.33}\text{Nd}_{0.12})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
7	8.3	16.67	8.33	66.7	$(\text{Ca}_{0.16}\text{La}_{0.17}\text{Ce}_{0.36}\text{Nd}_{0.11}\text{Sr}_{0.08}\text{Pb}_{0.08})_{0.96}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.69}[\text{SO}_4]_{0.14}(\text{OH})_{6.21}$	$(\text{Ce}_{0.52}\text{La}_{0.25}\text{Nd}_{0.23})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
8	8.89	15.56	10	75.55	$(\text{Ca}_{0.14}\text{La}_{0.17}\text{Ce}_{0.33}\text{Nd}_{0.09}\text{Sr}_{0.09}\text{Pb}_{0.08})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.6}[\text{SO}_4]_{0.09}(\text{OH})_{6.41}$	$(\text{Ce}_{0.56}\text{La}_{0.29}\text{Nd}_{0.15})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
9	6.59	26.4	16.48	50.53	$(\text{Ca}_{0.17}\text{Ba}_{0.07}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.26}\text{Nd}_{0.09}\text{Sr}_{0.15}\text{Pb}_{0.06})_{0.91}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.75}[\text{SO}_4]_{0.11}(\text{OH})_{5.81}$	$(\text{Ce}_{0.56}\text{La}_{0.24}\text{Nd}_{0.2})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
10	0	17.05	26.14	56.81	$(\text{Ca}_{0.15}\text{La}_{0.14}\text{Ce}_{0.27}\text{Nd}_{0.09}\text{Sr}_{0.23})_{0.88}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.47}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{6.53}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.16}\text{Nd}_{0.3})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
11	12.82	20.51	15.38	51.29	$(\text{Ca}_{0.16}\text{La}_{0.12}\text{Ce}_{0.18}\text{Nd}_{0.05}\text{Sr}_{0.12}\text{Pb}_{0.1})_{0.78}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.55}(\text{OH})_{6.16}$	$(\text{Ce}_{0.65}\text{La}_{0.35})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
12	8.11	24.32	20.27	47.3	$(\text{Ca}_{0.14}\text{Ba}_{0.04}\text{La}_{0.12}\text{Ce}_{0.18}\text{Nd}_{0.05}\text{Sr}_{0.15}\text{Pb}_{0.06})_{0.73}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.38}(\text{OH})_{6.61}$	$(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.34}\text{Nd}_{0.15})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
13	4.44	15.55	17.78	62.23	$(\text{Ca}_{0.14}\text{La}_{0.08}\text{Ce}_{0.4}\text{Nd}_{0.08}\text{Sr}_{0.16}\text{Pb}_{0.04})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.55}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{6.39}$	$(\text{Ce}_{0.71}\text{La}_{0.14}\text{Nd}_{0.15})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
14	7.25	18.84	18.84	55.07	$(\text{Ca}_{0.13}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.22}\text{Nd}_{0.05}\text{Sr}_{0.13}\text{Pb}_{0.05})_{0.69}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.44}[\text{SO}_4]_{0.08}(\text{OH})_{6.28}$	$(\text{Ce}_{0.58}\text{La}_{0.29}\text{Nd}_{0.13})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
15	9.09	34.54	23.64	32.73	$(\text{Ca}_{0.13}\text{Ba}_{0.06}\text{La}_{0.12}\text{Nd}_{0.06}\text{Sr}_{0.13}\text{Pb}_{0.05})_{0.89}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.55}(\text{OH})_{5.37}$	$(\text{La}_{0.67}\text{Nd}_{0.33})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
16	4.08	23.47	30.61	41.84	$(\text{Ca}_{0.23}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.22}\text{Nd}_{0.08}\text{Sr}_{0.3}\text{Pb}_{0.04})_{0.98}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.71}[\text{SO}_4]_{0.13}(\text{OH})_{5.90}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.27}\text{Nd}_{0.19})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
17	6.1	24.39	37.8	31.71	$(\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.26}\text{Sr}_{0.31}\text{Pb}_{0.05})_{0.82}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.81}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{5.15}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
18	6.15	27.69	41.54	24.62	$(\text{Ca}_{0.18}\text{Ce}_{0.16}\text{Sr}_{0.27}\text{Pb}_{0.04})_{0.65}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.45}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{6.27}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
19	14.52	37.1	20.97	27.41	$(\text{Ca}_{0.23}\text{Ce}_{0.17}\text{Sr}_{0.13}\text{Pb}_{0.09})_{0.62}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.69}[\text{SO}_4]_{0.08}(\text{OH})$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
20	5.26	31.58	30.26	32.9	$(\text{Ca}_{0.24}\text{La}_{0.06}\text{Ce}_{0.19}\text{Sr}_{0.23}\text{Pb}_{0.04})_{0.76}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.55}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{5.18}$	$(\text{Ce}_{0.76}\text{La}_{0.24})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
21	5.81	29.07	27.91	37.21	$(\text{Ca}_{0.2}\text{Ba}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.05}\text{Sr}_{0.24}\text{Pb}_{0.05})_{0.86}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.51}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.27}$	$(\text{Ce}_{0.53}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.16})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
22	6.67	31.11	22.22	40	$(\text{Ca}_{0.24}\text{Ba}_{0.04}\text{La}_{0.09}\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.1}\text{Sr}_{0.2}\text{Pb}_{0.06})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.6}[\text{SO}_4]_{0.13}(\text{OH})_{6.1}$	$(\text{Ce}_{0.47}\text{La}_{0.25}\text{Nd}_{0.28})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
23	5.95	26.19	27.38	40.48	$(\text{Ca}_{0.22}\text{La}_{0.1}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.06}\text{Sr}_{0.22}\text{Pb}_{0.05})_{0.84}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.28}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.95}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.28}\text{Nd}_{0.18})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
24	6.58	23.68	31.58	38.16	$(\text{Ca}_{0.18}\text{La}_{0.06}\text{Ce}_{0.18}\text{Nd}_{0.05}\text{Sr}_{0.24}\text{Pb}_{0.05})_{0.76}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.47}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.16}$	$(\text{Ce}_{0.62}\text{La}_{0.21}\text{Nd}_{0.17})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
25	5.77	26.92	20.19	47.12	$(\text{Ca}_{0.23}\text{Ba}_{0.05}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.19}\text{Sr}_{0.21}\text{Pb}_{0.06})_{1.04}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.61}[\text{SO}_4]_{0.07}(\text{OH})$	$(\text{Ce}_{0.39}\text{La}_{0.22}\text{Nd}_{0.39})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
26	6.06	26.26	22.22	45.46	$(\text{Ca}_{0.2}\text{Ba}_{0.06}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.18}\text{Nd}_{0.06}\text{Sr}_{0.22}\text{Pb}_{0.06})_{0.99}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.54}[\text{SO}_4]_{0.09}(\text{OH})_{6.56}$	$(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.18})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$

Таблица 1. Продолжение

27	7.86	24.72	31.46	35.96	$(Ca_{0.22}La_{0.09}Ce_{0.19}Nd_{0.04}Sr_{0.28}Pb_{0.07})_{0.89}Al_3[PO_4]_{1.54}[SO_4]_{0.15}(OH)_{6.18}$	$(Ce_{0.59}La_{0.28}Nd_{0.13})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
28	0	31.47	26.57	41.96	$(Ca_{0.45}La_{0.06}Ce_{0.04}Nd_{0.14}Sr_{0.22}Pb_{0.04})_{0.91}Al_3[PO_4]_{2.1}[SO_4]_{0.27}(OH)_{4.3}$	$(Ce_{0.67}La_{0.1}Nd_{0.23})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
29	5.41	46.85	0	47.74	$(Ca_{0.52}La_{0.18}Ce_{0.35}Pb_{0.06})_{1.11}Al_3[PO_4]_2(OH)_{5.75}$	$(Ce_{0.66}La_{0.34})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
30	8.33	30.55	11.11	50.01	$(Ca_{0.17}Ba_{0.05}La_{0.2}Ce_{0.2}Nd_{0.06}Sr_{0.08}Pb_{0.06})_{0.72}Al_3[PO_4]_{1.53}[SO_4]_{0.04}(OH)_{6.43}$	$(Ce_{0.55}La_{0.28}Nd_{0.17})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
31	0	27.14	14.28	58.58	$(Ca_{0.15}Ba_{0.04}La_{0.1}Ce_{0.2}Nd_{0.11}Sr_{0.1}Pb_{0.04})_{0.7}Al_3[PO_4]_{1.48}[SO_4]_{0.06}(OH)_{6.33}$	$(Ce_{0.49}La_{0.24}Nd_{0.27})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
32	6.17	32.1	12.35	49.38	$(Ca_{0.19}Ba_{0.07}La_{0.11}Ce_{0.22}Nd_{0.07}Sr_{0.1}Pb_{0.05})_{0.81}Al_3[PO_4]_{1.57}[SO_4]_{0.06}(OH)_{6.19}$	$(Ce_{0.55}La_{0.27}Nd_{0.18})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
33	2.83	17.92	12.26	66.99	$(Ca_{0.14}Ba_{0.05}La_{0.1}Ce_{0.56}Nd_{0.05}Sr_{0.13}Pb_{0.03})_{1.06}Al_3[PO_4]_{1.42}[SO_4]_{0.07}(OH)_{7.43}$	$(Ce_{0.79}La_{0.14}Nd_{0.07})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
34	8.8	20.59	10.29	60.32	$(Ca_{0.09}Ba_{0.05}La_{0.12}Ce_{0.24}Nd_{0.05}Sr_{0.07}Pb_{0.06})_{0.68}Al_3[PO_4]_{1.36}[SO_4]_{0.26}(OH)_{7.17}$	$(Ce_{0.35}La_{0.29}Nd_{0.36})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
35	0	40	0	60	$(Ca_{0.3}Ba_{0.1}La_{0.16}Ce_{0.33}Nd_{0.11})Al_3[PO_4]_{1.75}[SO_4]_{0.76}(OH)_{4.83}$	$(Ce_{0.55}La_{0.27}Nd_{0.18})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
36	0	40.3	9.4	50.3	$(Ca_{0.44}Ba_{0.16}Sr_{0.14}La_{0.19}Ce_{0.56})_{1.49}Al_3[PO_4]_{1.69}[SO_4]_{0.99}(OH)_{5.78}$	$(Ce_{0.75}La_{0.25})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
37	10.1	22.8	12.6	54.5	$(Ca_{0.18}Sr_{0.1}La_{0.16}Ce_{0.27}Pb_{0.08})_{0.79}Al_3[PO_4]_{1.53}[SO_4]_{0.17}(OH)_{6.08}$	$(Ce_{0.63}Nd_{0.37})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
38	0	29.5	22.1	48.4	$(Ca_{0.22}Ba_{0.06}Sr_{0.21}La_{0.11}Ce_{0.28}Nd_{0.07})_{0.95}Al_3[PO_4]_{1.58}[SO_4]_{0.42}(OH)_{6.41}$	$(Ce_{0.63}La_{0.29}Nd_{0.08})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
39	9.2	21.8	24.1	44.9	$(Ca_{0.14}Ba_{0.05}Sr_{0.14}La_{0.09}Ce_{0.24}Nd_{0.06}Pb_{0.08})_{0.8}Al_3[PO_4]_{1.43}[SO_4]_{0.19}(OH)_{5.96}$	$(Ce_{0.62}La_{0.23}Nd_{0.15})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
40	0	17.5	13.1	69.5	$(Ca_{0.2}Sr_{0.15}Ce_{0.79})_{1.14}Al_3[PO_4]_{1.64}[SO_4]_{0.1}(OH)_{6.95}$	$CeAl_3[PO_4]_2(OH)_6$
41	6.9	19.6	9.8	63.7	$(Ca_{0.15}Ba_{0.05}Sr_{0.1}La_{0.07}Ce_{0.54}Nd_{0.04}Pb_{0.07})_{1.02}Al_3[PO_4]_{1.41}(OH)_{7.56}$	$(Ce_{0.83}La_{0.11}Nd_{0.06})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
42	10	23.7	17.5	48.8	$(Ca_{0.14}Ba_{0.05}Sr_{0.14}La_{0.09}Ce_{0.24}Nd_{0.06}Pb_{0.08})_{0.8}Al_3[PO_4]_{1.43}[SO_4]_{0.19}(OH)_{6.74}$	$(Ce_{0.61}La_{0.23}Nd_{0.16})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
43	6.3	25	10.7	58	$(Ca_{0.2}Ba_{0.08}Sr_{0.12}La_{0.17}Ce_{0.43}Nd_{0.08}Pb_{0.07})_{1.12}Al_3[PO_4]_{1.57}[SO_4]_{0.13}(OH)_{7.01}$	$(Ce_{0.63}La_{0.25}Nd_{0.12})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
44	5.8	16.5	12.4	65.3	$(Ca_{0.2}Sr_{0.15}Ce_{0.2}Pb_{0.07})_{1.21}Al_3[PO_4]_{1.65}[SO_4]_{0.1}(OH)_{5.29}$	$CeAl_3[PO_4]_2(OH)_6$
45	6.9	19.6	8.3	65.2	$(Ca_{0.15}Ba_{0.05}Sr_{0.1}La_{0.1}Ce_{0.54}Nd_{0.04}Pb_{0.07})_{1.02}Al_3[PO_4]_{1.41}(OH)_{6.55}$	$(Ce_{0.79}La_{0.29}Nd_{0.12})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
46	8.3	30.5	11.1	50.1	$(Ca_{0.17}Ba_{0.05}Sr_{0.08}La_{0.1}Ce_{0.2}Nd_{0.06}Pb_{0.06})_{0.72}Al_3[PO_4]_{1.53}[SO_4]_{0.04}(OH)_{6.43}$	$(Ce_{0.55}La_{0.28}Nd_{0.17})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
47	7.2	27.5	14.5	50.8	$(Ca_{0.15}Ba_{0.04}Sr_{0.1}La_{0.1}Ce_{0.2}Nd_{0.05}Pb_{0.05})_{0.69}Al_3[PO_4]_{1.48}[SO_4]_{0.06}(OH)_{6.17}$	$(Ce_{0.57}La_{0.28}Nd_{0.15})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
48	6.2	32.5	12.5	48.8	$(Ca_{0.19}Ba_{0.07}Sr_{0.1}La_{0.11}Ce_{0.22}Nd_{0.06}Pb_{0.05})_{0.86}Al_3[PO_4]_{1.57}[SO_4]_{0.06}(OH)_{6.16}$	$(Ce_{0.56}La_{0.28}Nd_{0.16})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
49	4.3	27.5	18.8	49.4	$(Ca_{0.14}Ba_{0.05}Sr_{0.13}La_{0.1}Ce_{0.19}Nd_{0.05}Pb_{0.03})_{0.69}Al_3[PO_4]_{1.42}[SO_4]_{0.07}(OH)_{6.32}$	$(Ce_{0.56}La_{0.29}Nd_{0.15})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
50	8.8	20.6	10.3	60.3	$(Ca_{0.5}Ba_{0.05}Sr_{0.07}La_{0.12}Ce_{0.24}Nd_{0.05}Pb_{0.06})_{0.68}Al_3[PO_4]_{1.35}[SO_4]_{0.09}(OH)_{7.36}$	$(Ce_{0.58}La_{0.29}Nd_{0.13})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
51	5.5	16.4	13.6	64.5	$(Ca_{0.14}Ba_{0.04}Sr_{0.15}La_{0.48}Ce_{0.18}Nd_{0.05}Pb_{0.06})_{1.1}Al_3[PO_4]_{1.38}(OH)_{7.6}$	$(Ce_{0.25}La_{0.68}Nd_{0.07})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
52	5.3	18.4	21.1	55.2	$(Ca_{0.14}Sr_{0.16}La_{0.08}Ce_{0.25}Nd_{0.09}Pb_{0.04})_{0.76}Al_3[PO_4]_{1.55}[SO_4]_{0.16}(OH)_{5.97}$	$(Ce_{0.6}La_{0.19}Nd_{0.21})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
53	7.2	18.8	18.8	55.2	$(Ca_{0.13}Sr_{0.13}La_{0.11}Ce_{0.22}Nd_{0.05}Pb_{0.05})_{0.7}Al_3[PO_4]_{1.44}(OH)_{6.44}$	$(Ce_{0.58}La_{0.29}Nd_{0.13})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
54	0	25	17.1	57.9	$(Ca_{0.13}Ba_{0.06}Sr_{0.13}La_{0.12}Ce_{0.26}Nd_{0.06})_{0.78}Al_3[PO_4]_{1.55}[SO_4]_{0.08}(OH)$	$(Ce_{0.59}La_{0.27}Nd_{0.14})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$
55	8.9	15.6	10	65.5	$(Ca_{0.14}Sr_{0.09}La_{0.17}Ce_{0.33}Nd_{0.09}Pb_{0.08})_{0.9}Al_3[PO_4]_{1.6}[SO_4]_{0.09}(OH)_{6.15}$	$(Ce_{0.56}La_{0.29}Nd_{0.15})Al_3[PO_4]_2(OH)_6$

Таблица 1. Продолжение

56	8.3	16.7	8.3	66.7	$(\text{Ca}_{0.16}\text{Sr}_{0.08}\text{La}_{0.17}\text{Ce}_{0.36}\text{Nd}_{0.11}\text{Pb}_{0.08})_{0.96}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.69}[\text{SO}_4]_{0.14}(\text{OH})_{6.21}$	$(\text{Ce}_{0.56}\text{La}_{0.26}\text{Nd}_{0.18})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
57	6.6	26.4	16.5	51.1	$(\text{Ca}_{0.17}\text{Ba}_{0.07}\text{Sr}_{0.15}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.26}\text{Nd}_{0.09}\text{Pb}_{0.06})_{1.47}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.75}[\text{SO}_4]_{0.11}(\text{OH})_{5.81}$	$(\text{Ce}_{0.56}\text{La}_{0.24}\text{Nd}_{0.2})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
58	8.9	15.6	10	65.5	$(\text{Ca}_{0.14}\text{Sr}_{0.09}\text{La}_{0.17}\text{Ce}_{0.33}\text{Nd}_{0.09}\text{Pb}_{0.08})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.56}[\text{SO}_4]_{0.27}(\text{OH})_{6.17}$	$(\text{Ce}_{0.56}\text{La}_{0.29}\text{Nd}_{0.15})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
59	0	17	26.1	56.9	$(\text{Ca}_{0.15}\text{Sr}_{0.23}\text{La}_{0.14}\text{Ce}_{0.27}\text{Nd}_{0.09})_{0.88}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.47}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{6.53}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.28}\text{Nd}_{0.18})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
60	12.8	20.5	15.4	51.3	$(\text{Ca}_{0.16}\text{Sr}_{0.12}\text{La}_{0.14}\text{Ce}_{0.26}\text{Pb}_{0.1})_{0.78}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.55}(\text{OH})_{6.31}$	$(\text{Ce}_{0.65}\text{La}_{0.35})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
61	0	17	26.1	56.9	$(\text{Ca}_{0.1}\text{Sr}_{0.23}\text{La}_{0.14}\text{Ce}_{0.27}\text{Nd}_{0.09})_{0.88}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.47}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{6.43}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.28}\text{Nd}_{0.18})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
62	0	35.4	38.5	26.1	$(\text{Ca}_{0.16}\text{Ba}_{0.07}\text{Sr}_{0.25}\text{La}_{0.08}\text{Ce}_{0.05}\text{Nd}_{0.04})_{0.65}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.51}[\text{SO}_4]_{0.19}(\text{OH})_{5.56}$	$(\text{Ce}_{0.29}\text{La}_{0.47}\text{Nd}_{0.24})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
63	0	31.9	40.3	27.8	$(\text{Ca}_{0.13}\text{Ba}_{0.1}\text{Sr}_{0.29}\text{Ce}_{0.11}\text{Nd}_{0.09})_{0.72}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.56}[\text{SO}_4]_{0.27}(\text{OH})_{5.42}$	$(\text{Ce}_{0.55}\text{Nd}_{0.45})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
64	0	35	36.7	28.3	$(\text{Ca}_{0.21}\text{Sr}_{0.22}\text{Ce}_{0.17})_{0.6}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.7}[\text{SO}_4]_{0.17}(\text{OH})_{4.76}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
65	0	35.2	33.3	31.5	$(\text{Ca}_{0.19}\text{Sr}_{0.18}\text{Ce}_{0.17})_{0.54}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.54}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{5.14}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
66	6.7	31.1	22.2	40	$(\text{Ca}_{0.24}\text{Ba}_{0.04}\text{Sr}_{0.2}\text{La}_{0.09}\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.1}\text{Pb}_{0.06})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.6}[\text{SO}_4]_{0.13}(\text{OH})_{5.98}$	$(\text{Ce}_{0.47}\text{La}_{0.25}\text{Nd}_{0.36})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
67	6	26.2	26.2	41.06	$(\text{Ca}_{0.22}\text{Sr}_{0.22}\text{La}_{0.1}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.06}\text{Pb}_{0.05})_{0.84}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.28}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.95}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.28}\text{Nd}_{0.15})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
68	6.5	24.7	31.2	37.6	$(\text{Ca}_{0.19}\text{Sr}_{0.24}\text{La}_{0.06}\text{Ce}_{0.18}\text{Nd}_{0.05}\text{Pb}_{0.05})_{0.77}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.47}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.18}$	$(\text{Ce}_{0.62}\text{La}_{0.21}\text{Nd}_{0.17})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
69	6.3	29.5	25.3	38.9	$(\text{Ca}_{0.23}\text{Ba}_{0.05}\text{Sr}_{0.24}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.07}\text{Pb}_{0.06})_{0.95}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.61}[\text{SO}_4]_{0.07}(\text{OH})_{6.3}$	$(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.30}\text{Nd}_{0.19})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
70	6.7	29.2	24.7	39.4	$(\text{Ca}_{0.2}\text{Ba}_{0.06}\text{Sr}_{0.22}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.18}\text{Nd}_{0.06}\text{Pb}_{0.06})_{0.89}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.54}[\text{SO}_4]_{0.09}(\text{OH})_{6.33}$	$(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.18})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
71	5.8	21.4	27.2	45.6	$(\text{Ca}_{0.22}\text{Sr}_{0.28}\text{La}_{0.24}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.04}\text{Pb}_{0.06})_{1.03}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.54}[\text{SO}_4]_{0.15}(\text{OH})_{6.61}$	$(\text{Ce}_{0.4}\text{La}_{0.51}\text{Nd}_{0.09})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
72	4	24.2	30.3	41.5	$(\text{Ca}_{0.24}\text{Sr}_{0.3}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.22}\text{Nd}_{0.08}\text{Pb}_{0.04})_{0.99}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.71}[\text{SO}_4]_{0.13}(\text{OH})_6$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.27}\text{Nd}_{0.19})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
73	6.1	24.4	37.8	31.7	$(\text{Ca}_{0.2}\text{Sr}_{0.31}\text{Ce}_{0.26}\text{Pb}_{0.05})_{0.82}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.81}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{5.15}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
74	6.2	27.7	41.5	24.6	$(\text{Ca}_{0.18}\text{Sr}_{0.27}\text{Ce}_{0.16}\text{Pb}_{0.04})_{0.65}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.45}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{5.79}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
75	14.5	37.1	21	27.4	$(\text{Ca}_{0.23}\text{Sr}_{0.13}\text{Ce}_{0.17}\text{Pb}_{0.09})_{0.62}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.69}(\text{OH})_{5.34}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
76	5.3	31.6	30.3	32.8	$(\text{Ca}_{0.24}\text{Sr}_{0.23}\text{La}_{0.06}\text{Ce}_{0.19}\text{Pb}_{0.04})_{0.76}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.55}[\text{SO}_4]_{0.09}(\text{OH})_{5.94}$	$(\text{Ce}_{0.76}\text{La}_{0.24})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
77	5.8	29.1	27.9	37.2	$(\text{Ca}_{0.2}\text{Ba}_{0.05}\text{Sr}_{0.24}\text{La}_{0.1}\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.05}\text{Pb}_{0.05})_{0.86}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.51}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.27}$	$(\text{Ce}_{0.53}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.16})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
78	4.4	24.2	22	49.4	$(\text{Ca}_{0.22}\text{Sr}_{0.2}\text{La}_{0.15}\text{Ce}_{0.25}\text{Nd}_{0.05}\text{Pb}_{0.04})_{0.91}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.67}[\text{SO}_4]_{0.08}(\text{OH})_{6.7}$	$(\text{Ce}_{0.56}\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.14})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
79	6.	31.1	22.2	40	$(\text{Ca}_{0.24}\text{Ba}_{0.04}\text{Sr}_{0.2}\text{La}_{0.09}\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.1}\text{Pb}_{0.06})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.6}[\text{SO}_4]_{0.13}(\text{OH})_{6.1}$	$(\text{Ce}_{0.47}\text{La}_{0.25}\text{Nd}_{0.28})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
80	6	26.2	26.2	41.6	$(\text{Ca}_{0.22}\text{Sr}_{0.22}\text{La}_{0.1}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.06}\text{Pb}_{0.05})_{0.84}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.28}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.95}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.28}\text{Nd}_{0.18})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
81	6.5	24.7	31.2	37.6	$(\text{Ca}_{0.19}\text{Sr}_{0.24}\text{La}_{0.06}\text{Ce}_{0.18}\text{Nd}_{0.05}\text{Pb}_{0.05})_{0.77}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.49}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{7.12}$	$(\text{Ce}_{0.62}\text{La}_{0.21}\text{Nd}_{0.17})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
82	6.5	30.4	22.8	40.3	$(\text{Ca}_{0.23}\text{Ba}_{0.05}\text{Sr}_{0.21}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.07}\text{Pb}_{0.06})_{0.92}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.61}[\text{SO}_4]_{0.07}(\text{OH})_{6.12}$	$(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.19})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
83	6.7	28.9	24.4	40	$(\text{Ca}_{0.2}\text{Ba}_{0.06}\text{Sr}_{0.22}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.06}\text{Pb}_{0.06})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.54}[\text{SO}_4]_{0.09}(\text{OH})_{6.41}$	$(\text{Ce}_{0.53}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.16})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
84	7.9	24.7	31.5	35.9	$(\text{Ca}_{0.22}\text{Sr}_{0.28}\text{La}_{0.09}\text{Ce}_{0.19}\text{Nd}_{0.04}\text{Pb}_{0.07})_{0.89}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.54}[\text{SO}_4]_{0.15}(\text{OH})_{6.18}$	$(\text{Ce}_{0.59}\text{La}_{0.28}\text{Nd}_{0.13})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$

Таблица 1. Окончание

85	4	24.2	30.3	41.5	$(\text{Ca}_{0.24}\text{Sr}_{0.3}\text{La}_{0.11}\text{Ce}_{0.22}\text{Nd}_{0.008}\text{Pb}_{0.04})_{0.9}$ $9\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.7}[\text{SO}_4]_{0.13}(\text{OH})_{6.03}$	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.27}\text{Nd}_{0.19})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2$ $(\text{OH})_6$
86	6.2	27.7	41.5	24.6	$(\text{Ca}_{0.18}\text{Sr}_{0.27}\text{Ce}_{0.16}\text{Pb}_{0.04})_{0.65}\text{Al}_3$ $[\text{PO}_4]_{1.45}[\text{SO}_4]_{0.16}(\text{OH})_{5.79}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
87	14.5	37.1	20	28.4	$(\text{Ca}_{0.23}\text{Sr}_{0.13}\text{Ce}_{0.17}\text{Pb}_{0.09})_{0.62}\text{Al}_3$ $[\text{PO}_4]_{1.69}(\text{OH})_{5.34}$	$\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
88	5.3	31.6	30.3	32.8	$(\text{Ca}_{0.24}\text{Sr}_{0.23}\text{La}_{0.06}\text{Ce}_{0.19}\text{Pb}_{0.04})_{0.76}\text{Al}_3$ $[\text{PO}_4]_{1.55}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{5.88}$	$(\text{Ce}_{0.76}\text{La}_{0.24})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$
89	5.8	29.1	27.9	37.2	$(\text{Ca}_{0.2}\text{Ba}_{0.05}\text{Sr}_{0.24}\text{La}_{0.1}\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.005}$ $\text{Pb}_{0.05})_{0.86}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.51}[\text{SO}_4]_{0.12}(\text{OH})_{6.27}$	$(\text{Ce}_{0.53}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.16})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2$ $(\text{OH})_6$
90	6.7	25.5	23.3	44.5	$(\text{Ca}_{0.23}\text{Sr}_{0.21}\text{La}_{0.12}\text{Ce}_{0.22}\text{Nd}_{0.006}$ $\text{Pb}_{0.06})_{0.9}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.55}[\text{SO}_4]_{0.1}(\text{OH})_{6.35}$	$(\text{Ce}_{0.64}\text{La}_{0.24}\text{Nd}_{0.12})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2$ $(\text{OH})_6$
91	0	25.3	23	51.7	$(\text{Ca}_{0.22}\text{Sr}_{0.2}\text{La}_{0.15}\text{Ce}_{0.25}\text{Nd}_{0.005}$ $\text{Pb}_{0.06})_{0.87}\text{Al}_3[\text{PO}_4]_{1.67}[\text{SO}_4]_{0.08}(\text{OH})_{5.17}$	$(\text{Ce}_{0.55}\text{La}_{0.33}\text{Nd}_{0.12})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2$ $(\text{OH})_6$

Таблица 2. Распределение минералов (%) по типам в пленках на поверхности ичетьюских алмазов (1), в земной коре (2), на Европейском Северо-Востоке России (3), на Урале (4), в пеплах Ключевского вулкана

Минеральные типы	1	2	3	4	5
Простые вещества (ПВ)	30.2	2.21	7.21	6.85	36.11
Халькогениды (ХГ)	3.8	17.18	30.02	22.14	11.11
Галогениды (Г)	17.0	4.13	1.17	1.78	8.33
Оксиды (О)	11.3	12.18	15.11	16.24	13.89
Силикаты (С)	7.5	26.66	29.2	29.27	16.67
Кислородные соли (КС)	30.2	36.17	17.29	23.51	13.89
A = ПВ + ХГ	34.0	20.1	37.2	29.0	47.22
B = Г + О	28.3	16.3	16.3	18.0	22.22
C = С + КС	37.7	63.6	46.5	54.9	30.56
C/A	1.11	3.2	1.3	1.9	0.65
C/B	1.33	3.9	2.9	3.1	1.37
КС/C	4.02	1.4	0.6	0.8	0.83

Выявление в пленках на ичетьюских алмазах значительного числа минеральных видов позволяет оценить уровень минералогической организации пленок по известной методологии (Юшкин и др., 2003). Проведенный анализ показал, что на фоне земной коры и ближайших регионов (Урал, Европейский Северо-Восток) исследованные нами минеральные пленки выделяются явным обогащением самородными металлами, простыми веществами и галогенидами относительно силикатов и кислородных солей (табл. 2). Единственным более или менее сопоставимым с изученными пленками по структуре минерального кадастра является взрывчатый минерально-фазовый парагенезис на современных островодужных вулканах (Карпов и др., 2014; Карпов и др., 2017; Силаев и др., 2019; Гордеев и др., 2019; Силаев и др., 2022).

Заключение

Результаты комплексных исследований алмазов из Ичетьюского месторождения, считающегося одним из крупнейших на территории Тимано-Североуральской алмазодобывающей провинции, привели к следующим выводам.

Данные гониометрических исследований показали, что ичетьюские алмазы подвергались мантийному растворению в кинетическом и диффузионном режимах, пластическим и ударным деформациям в процессе эвакуации из мантии к земной поверхности, но практически не претерпели полирующего износа, завершающего историю формирования поверхности россыпных алмазов.

Во внутреннем строении ичетьюских алмазов не отмечено совместного проявления пирамид нарастания кубических и октаэдри-

ческих граней. Ростовые формы в них представлены только октаэдрами, часто с мелко-ступенчатыми гранями. В некоторых кристаллах центральная часть имеет концентрические ростовые поверхности, не характерные для внутреннего строения кимберлитовых алмазов.

Ичетьюские алмазы характеризуются преимущественно сине-голубой люминесценцией. По спектрам фото- и рентгенолюминесценции в них диагностированы радиационные центры N3 и две системы пластически-деформационных центров – N3 и N4. Кроме того, зарегистрирована А-полоса, объединяющая фоновые повторения линии излучения центра N3. Некоторые образцы имеют небольшие участки с розовой люминесценцией по границе подвергнувшегося растворению октаэдрического фантома. В спектрах ЭПР упомянутые радиационные и деформационные центры проявлены как P1, P2- центры.

По данным ИК-спектроскопии поглощения, ичетьюские алмазы характеризуются широким диапазоном варьирования как валовой концентрации структурного азота, так и степени агрегации атомов азота с образованием дефектов А, В1 и В2. Валовая концентрация структурного азота в исследуемых кристаллах варьируется в пределах 10–3000 ppm, концентрация центров В1 достигает 100%. Отмечается постоянная примесь СН-центров (система 3107 см^{-1}), содержание которых прямо коррелируется со степенью агрегации азотных дефектов. Изменения валовой концентрации азота, степени агрегации его атомов и концентрации СН-дефектов происходят в ичетюских алмазах анатомически закономерно с образованием максимумов в их центральных частях.

Согласно ИК-спектроскопическим данным, ичетьюские алмазы претерпели мантийный отжиг в температурном диапазоне 1050–1250 К, образуя на азотной диаграмме совместно с уральскими алмазами единый тренд, обусловленный прямой корреляцией валовой концентрации структурного азота и степени агрегации азотных дефектов. Этот тренд принципиально отличается от аналогичных трендов кимберлитовых алмазов и бразильских карбонадо, отражающих обратную корреляцию между теми же параметрами.

В составе ичетьюских алмазов выявлено 45 микроэлементов, суммарное содержание которых составляет в среднем 3.84 г/т. Около 7% этого содержания обеспечивают лантаноиды, хондритнормированные концентрации которых образуют тренды с необычным для алмазов пологим уклоном в сторону тяжелых элементов.

По изотопному составу первоисточника углерода ичетьюские алмазы подразделяются на три группы: «углекислогазовые» ($\delta^{12}\text{C}_{\text{PDB}} = -5.86 \pm 1.86\text{ ‰}$, встречаемость – 70.7%), «угарногазовые» ($-13.86 \pm 2.97\text{ ‰}$, 18.5%) и «метановые» (-24.26 ‰ , 10.8%). Этим они существенно отличаются как от бразильских карбонадо, так и от сибирских якутитов.

На поверхности практически всех проанализированных кристаллов были обнаружены локальные микроминеральные пленки, в составе которых выявлено более 50 минералов, относящихся ко всем основным минеральным типам: 16 самородных металлов, сплавов и простых веществ; 2 халькогенида; 9 галлогенидов; 6 оксидов; 4 силиката; 16 кислородных солей. Наибольший интерес среди этих минералов представляют золотопалладий, молибдензолотопалладий, таллийзолотопалладий и две системы твердых растворов – шпинелидная и алюмосульфатфосфатная. Шпинелидные твердые растворы по характеру распределения минералов подразделяются на десять разновидностей (в последовательности снижения частоты встречаемости): магнетитовую, хромит-якобсит-магнетитовую, ульвит-магнетитовую, хромит-треворит-магнетитовую, магнетит-ульвитовую, хромит-магнетитовую, якобсит-магнетитовую, купрошпинель-якобсит-магнетитовую, магнетит-хромитовую, магнетит-треворит-хромитовую. Примесь в шпинелидах купрошпинелевого минала может свидетельствовать об их образовании еще в ходе эвакуации ичетьюских алмазов из мантии. Система поликомпонентных алюмосульфатфосфатов характеризуется эмпирической брутто-формулой – $(\text{Ca}_{0.13-0.5}\text{Sr}_{0.07-0.31}\text{Ba}_{0-0.16}\text{Pb}_{0-0.1}\text{La}_{0-0.79}\text{Ce}_{0-0.79}\text{Nd}_{0-0.19})_{0.62-1.69}[\text{PO}_4]_{1.28-1.81}[\text{SO}_4]_{0-0.43}(\text{OH})_{4.4-7.6}$. В пересчете на миналы состав этих твердофазных смесей определяется комбинацией флоренсита, ву-

дхаузеита, сванбергита и пироморфита. Среди изученных нами генотипов алюмосульфатфосфатных твердых растворов минералы в пленках ичетьюских алмазов ближе всего коррелируются с алюмосульфатфосфатами в уральских алмазоносных туффизитах, несколько отличаясь от них только повышенным содержанием церия. По уровню минералогической организации пленки на поверхности ичетьюских алмазов наиболее сопоставимы с взрывными минерально-фазовыми парагенезисами на современных вулканах.

Практически вся полученная информация свидетельствует о том, что в части алмазов Ичетьюское месторождение является не россыпным, а коренным – туффизито-флюидизатным, в понимании А.Я. Рыбальченко.

Исследования выполнены в рамках бюджетной государственной темы № 1021062211108-5-1.5.2 «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий» и при поддержке грантом РФФИ 21-77-20026.

Благодарности

За сотрудничество в исследованиях авторы благодарят г. н. с., доктора г.- м. н. В.И. Ракина (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН) и с. н. с., кандидата х. н. С.В. Палесского (Институт геологии и минералогии СО РАН).

Библиографический список

Ваганов В.И. Алмазоносные месторождения России и мира (основы прогнозирования). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. 371 с.

Васильев Е.А., Петровский В.А., Козлов А.В., Антонов А.В. Инфракрасная спектроскопия и внутреннее строение алмазов россыпи Ичетью (Средний Тиман, Россия) // Записки РМО, 2017. Ч. 146. № 2. С. 58–72.

Васильев В.А., Петровский В.А., Силаев В.И., Сухарев А.Е., Козлов А.В. Анатомия алмазов из месторождения Ичетью, Средний Тиман // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юш-

кинские чтения 2014). Сыктывкар: Геопринт, 2014. С. 70–71.

Галимов Э.М., Каминский Ф.В., Кодина Л.А. Новые данные об изотопном составе углерода карбонадо // Геохимия, 1985. № 5. С. 723–726.

Гордеев Е.И., Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П., Васильев Е.А., Сухарев А.Е. Об истории открытия и природе алмазов в вулканических породах Камчатки // Вестник Пермского университета. Геология, 2019. Т. 18. С. 307–331.

Гракова О.В. Акцессорный ильменорутит из алмазосодержащих пород Южного Тимана // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2011. № 10. С. 11–13.

Гракова О.В. Алмазопоявления Среднего и Южного Тимана. Сыктывкар: ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2021. 144 с.

Гракова О.В. Видовой состав, химические и типоморфные особенности акцессорных минералов девонских алмазосодержащих отложений Южного и Среднего Тимана // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2014. № 3. С. 3–9.

Деревянко И.В. Перспективы Республики Коми на обнаружение коренных месторождений алмазов // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона. Материалы Всероссийского совещания. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 27–30.

Дудар В.А. Россыпи Среднего Тимана // Руды и металлы, 1996. № 4. С. 80–90.

Дудар В.А. Формирование палеороссыпи Ичетью и основные направления работ на алмазы по Вольско-Вымской гряде // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: Материалы Всероссийского совещания. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 35–38.

Исаенко С.И. Видовые составы дополнительных азотных дефектов в кристаллах алмаза со Среднего Тимана и их из других регионов России // Сыктывкарский минералогический сборник, 2002. № 32. С. 61–67.

Исаенко С.И. Кристалломорфология и оптические свойства из Вадювожской туффизитовой трубки // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 7-й научной конференции ИГ Коми НЦ УрО РАН, 1998. С. 58–61.

Исаенко С.И. Рентгеностимулированная люминесценция азотных дефектов природных алмазов // Структура, вещества, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 9-й научной конференции. Сыктывкар, 2000. С. 53–58.

Исаенко С.И. Спектроскопические характеристики алмазов Среднего Тимана и других регионов России // Структура, вещество, история

литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы научной конференции. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 79–81.

Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П., Мохов А.В., Горностаева Т.А., Сухарев А.Е. Эксплозивная минерализация ТТИ-50 // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. Новосибирск: СО РАН, 2017. С. 241–245.

Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П., Ракин В.И., Васильев Е.А., Филатов С.К., Петровский В.А., Флеров Г.Б. Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология, 2014. № 6. С. 3–20.

Клюев Ю.А., Дуденков Ю.А., Ненца В.И., Николаева Т.Т. Некоторые особенности алмазов Сев. Тимана // Доклады АН СССР, 1974. Т. 218. № 6. С. 1424–1426.

Лукьянова Л.И., Шарпенко Л.Н., Лобкова Л.П. Признаки эндогенности алмазоносных объектов Урало-Тиманского региона // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: Материалы Всероссийского совещания. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 14–15.

Лукьянова Л.И., Лобкова Л.П., Шаденков Е.М. Перспективы алмазоносности Европейского Северо-Востока России в свете новых данных о коренной алмазоносности Урала // Материалы XIII Геологического съезда Республики Коми, 1999. Т. 4. Сыктывкар. С. 52–54.

Лютюев В.П., Глухов Ю.В., Макеев А.Б. Спектроскопические особенности и морфология алмазов месторождения Ичетью // Сыктывкарский минералогический сборник. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 1999. № 28. С. 84–93.

Макеев А.Б., Дудар В.А., Глухов Ю.В., Лютюев В.П., Ракин В.И., Филиппов В.Н. Морфологические особенности и физические свойства алмазов девонской россыпи Ичетью (Средний Тиман) // Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов. Материалы Всероссийской конференции. Сыктывкар: Геопринт, 1998. С. 138–139.

Макеев А.Б., Дудар В.А., Лютюев В.П., Дервянко И.В., Глухов Ю.В., Исаенко С.И., Филиппов В.Н. Алмазы Среднего Тимана. Сыктывкар, 1999. 80 с.

Макеев А.Б., Макеев Б.А. Алмазы проявления Ичетью (Средний Тиман) – производные эклогитовой мантии // Углерод. Минералогия. Геохимия. Космохимия. Материалы Международной конференции. Сыктывкар: Геопринт, 2003. С. 37–39.

Макеев А.Б., Макеев Б.А. Природа россыпных и коренных алмазопоявлений Республики Коми

// Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: Материалы Всероссийского совещания. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 32–35.

Макеев А.Б., Макеев Б.А. Цинковые хромшпинелиды Среднего Тимана и Приполярного Урала // Доклады РАН, 2005. Т. 404. № 2. С. 235–240.

Макеев А.Б., Рыбальченко А.Я., Дудар В.А., Шаметко В.Г. Новые перспективы алмазоносности Тимана // Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России: Материалы XV Геол. съезда Республики Коми. Сыктывкар, 1999. Т. 4. С. 63–66.

Макеев А.Б., Филиппов В.Н. Металлические пленки на природных алмазах месторождения Ичетью, Средний Тиман // Доклады РАН, 1999. Т. 368. № 6. С. 808–812.

Макеев Б.А. Сравнительный минералогический анализ тяжелой фракции современных отложений Четласского Камня и алмазного проявления Ичетью // Структура и разнообразие минерального мира: Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2008. С. 168–170.

Макеев Б.А., Глухов Ю.В., Варламов Д.А., Шевчук С.С., Исаенко С.И. Иттрийсодержащие цирконы из псефитов россыпепроявления Ичетью // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. № 2. С. 11–16.

Макеев Б.А., Глухов Ю.В., Исаенко С.И. Ниобийсодержащий анатаз проявления Ичетью (Средний Тиман) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии: Материалы минералогического семинара с международным участием (Юшкинские чтения-2018). Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018. С. 40–41.

Мальков Б.А., Тельнова О.П. Стратиграфическое положение и возраст металлоносных отложений девона Среднего Тимана // Геология девона Северо-Востока Европейской части СССР: Материалы Всесоюзной конференции. Сыктывкар, 1991. С. 45–46.

Мальков Б.А., Холопова Е.Б. Эйфельская литоральная алмазоносная россыпь Ичетью на Среднем Тимане // Геология девонской системы: Материалы Международного симпозиума. Сыктывкар, 2002. С. 272–275.

Петровский В.А., Васильев Е.А., Силаев В.И., Козлов А.В., Нефедов Ю.В. Генетическая ИК-спектроскопия среднетиманских алмазов // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геол. съезда Республики Коми. Т. 2. Сыктывкар: Геопринт, 2014. С. 331–332.

Петровский В.А., Глухов Ю.В., Сухарев А.Е., Кучер М.И., Мартинс М., Петровский Д.В. Изотопный состав углерода алмазов (ассоциация монокристаллы–карбонадо) как индикатор условий алмазообразования // Сыктывкарский минералогический сборник, 2005. № 34. С. 108–125.

Пыстин А.М., Махлаев Л.В., Щербаков Э.С. Потенциально алмазоносные магматические комплексы и терригенные алмазоносные отложения Среднего Тимана // Проблемы прогнозирований алмазов на закрытых территориях. Мирный: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. С. 97–102.

Ракин В.И. Кристалломорфология алмазов уральского типа // Сыктывкарский минералогический сборник, 2003. № 33. С. 5–35.

Ракин В.И. Морфология алмазов уральского типа. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 396 с.

Рыбальченко А.Я., Колобянин В.Я., Лукьянова Л.И. О новом типе коренных источников алмазов на Урале // Доклады РАН, 1997. Т. 353. № 1. С. 90–93.

Рыбальченко А.Я., Рыбальченко Т.М., Силаев В.И. Теоретические основы прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов туффизитового типа // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2011. № 1. С. 54–66.

Рыбальченко А.Я., Рыбальченко Т.М., Силаев В.И. Комментарии к некоторым традиционным заблуждениям в генетических оценках алмазных месторождений уральского типа // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана: Петрографический сборник № 6. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2010. С. 92–113.

Силаев В.И. Среднеуральская диамантина: через 178 лет после открытия // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2008. № 1. С. 27–35.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П., Васильев Е.А., Вергасова Л.П., Смолева И.В. Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть 1. Алмазы, углеродные фазы, конденсированные органоиды // Вулканология и сейсмология, 2019. № 5. С. 54–67.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П., Вергасова Л.П., Филиппов В.Н., Тарасов К.В. Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть 2. Минералы-спутники алмазов тобачинского типа // Вулканология и сейсмология, 2019. № 6. С. 36–44.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П., Филиппов В.Н., Смолева И.В., Макеев Б.А., Шанина С.Н., Вергасова Л.П., Киселева Д.В., Солошенко Н.Г., Чередниченко Н.В., Хазов А.Ф., Тара-

сов К.В. Петро-минералого-геохимические свойства пеплов вершинных извержений вулкана Ключевской 2020–2021 гг., предшествующих побочному извержению прорыва Горшкова // Вулканология и сейсмология, 2022. № 2. С. 3–27.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Ракин В.И., Васильев Е.А., Филиппов В.Н., Петровский В.А. Алмазы в продуктах трещинного Толбачинского извержения 2012–2013, Камчатка // Вестник ПГУ. Геология, 2015. Вып. 1. С. 6–27.

Силаев В.И., Петровский В.А., Сухарев А.Е., Смолева И.В., Помазанский Б.С., Земнухов А.Л. Якутиты: минералого-геохимические свойства и новая версия происхождения. Статья 2 // Известия Высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. № 4. С. 12–22.

Силаев В.И., Филиппов В.Н., Сокерин М.Ю. Твердые растворы вудхаузеит-сванбергит-флоренсит во вторичных кварцитах // Записки ВМО, 2001. Т. 130, № 1. С. 99–110.

Тельнова О.П. Стратиграфическое положение, возраст, климатические и фациальные условия формирования продуктивных отложений месторождения Ичетью // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: Материалы Всероссийского совещания. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 48–50.

Тейлор С.Р., Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 344 с.

Чайковский И.И. Петрология и минералогия интрузивных алмазоносных пирокластитов Вишерского Урала. Пермь: Изд-во Пермского университета, 2001. 324 с.

Щербаков Э.С., Плякин А.М. Парастерезис россыпи Ичетью и проблема первоисточников алмазов Тимана // Структура и разнообразие минерального мира: Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2008. С. 166–167.

Щербаков Э.С., Плякин А.М., Битков П.П. Динамические обстановки, контролировавшие формирование продуктивного пласта полиминеральной россыпи Ичетью // Геология девонской системы. Сыктывкар: Геопринт: Материалы Международного симпозиума, 2002. С. 314–316

Щербаков Э.С., Плякин А.М., Битков П.П. Условия образования среднедевонских алмазоносных отложений Тимана // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: Материалы Всероссийского совещания. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 39–40.

Щербаков Ю.Г. Геохимическая эволюция и рудные формации. Проблемы эндогенного рудообразования и металлогении. Новосибирск: Наука, 1976. С. 217–229.

Юшкин Н.П., Силаев В.И., Плоскова С.И. Минералогический облик Урала (анализ минеральных кадастров) // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 513–519.

Taylor W.R. Nitrogen-defect aggregation Characteristics of some Australian diamonds: time-temperature constants on the source regions of pipe and alluvial diamonds. *American Mineralogist*, 1990. V. 75. P. 1290–1310.

Ichetyu Diamonds: Constitution, Surface Film Micromineralization, Genesis

A.E. Sukharev^a, V.I. Silaev^a, V.A. Petrovsky^a, E.A. Vasiliev^b, V.N. Filippov^a, A.F. Khazov^a, I.V. Smoleva^a

^aInstitute of Geology Komi SC Russian Academy of Sciences

54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar 167982, Russia, E-mail: sukharev@geo.komisc.ru

^bSt. Petersburg Mining University

Vasilyevsky Island, 21 line, 2. St. Petersburg 199106, Russia

E-mail: simply12@mail.ru

Diamonds from the Ichetyu deposit of disputable genesis have been studied using X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, cathode-, photo- and X-ray luminescence; spectroscopy of Raman scattering and IR absorption, LA-ICP-MS, isotope mass spectrometry. The crystal morphology of diamonds has been analyzed, the parameters of the forms of their mantle dissolution, the degree and nature of plastic and impact deformations have been determined. Features of the internal structure, luminescent-spectroscopic properties were revealed. The bulk concentration of structural nitrogen, the degree of aggregation of point nitrogen defects, and the temperature of mantle annealing are estimated. The composition of microelements and carbon isotopy were determined. The mineral-phase composition of films on the surface of diamonds has been studied. A conclusion was made about the tuffizite-fluidisite genetic type of the Ichetyu deposit.

Key words: *Ichetyu deposit; diamonds; morphology; anatomy; luminescent-spectroscopic properties; micromineral films; tuffisite-fluidisite genetic type*

References

Vaganov V.I. 2000. Almazonosnye mestorozhdeniya Rossii i mira (osnovy prognozirovaniya) [Diamond-bearing deposits of Russia and the world (basics of forecasting)]. Moskva, ZAO Geoinformmark, p. 371. (in Russian)

Vasiliev E.A., Petrovsky V.A., Kozlov A.V., Antonov A.V. 2017. Infракрасная спектроскопия и внутреннее строение алмазов россыпи Ichetyu (Sredniy Timan, Rossiya) [Infrared spectroscopy and internal structure of diamonds from the Ichetyu placer (Middle Timan, Russia)]. *Zapiski RMO*. 146(2):58-72. (in Russian)

Vasiliev V.A., Petrovsky V.A., Silaev V.I., Sukharev A.E., Kozlov A.V. 2014. Anatomiyaalmazov iz mestorozhdeniya Ichetyu, Sredniy Timan [Anatomy of diamonds from the Ichetyu deposit, Middle Timan]. In: *Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy* (Yushkin readings-2014). Syktyvkar, Geoprint, pp. 70–71. (in Russian)

Galimov E.M., Kaminsky F.V., Kodina L.A. 1985. Novye dannye ob izotopnom sostave ugleroda

karbonado [New data on the isotopic composition of carbonado carbon]. *Geochemistry*. 5:723–726. (in Russian)

Gordeev E.I., Silaev V.I., Karpov G.A., Anikin L.P., Vasiliev E.A., Sukharev A.E. 2019. Ob istorii otkrytiya i prirodealmazov v vulkanicheskikh porodakh Kamchatki [On the history of the discovery and nature of diamonds in the volcanic rocks of Kamchatka]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 18(4):307–331. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.18.4.307

Grakova O.V. 2011. Aktsessornyy ilmenorutil izalmazosoderzhashchikh porod Yuzhnogo Timana [Accessory ilmenite-rutile from diamond-bearing rocks of the South Timan]. *Bulletin of the IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 10:11–13. (in Russian)

Grakova O.V. 2021. Almazoproyavleniya Srednego i Yuzhnogo Timana [Diamond occurrences of the Middle and Southern Timan]. Syktyvkar, Federal Research Center Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, p. 144. (in Russian)

- Grakova O.V.* 2014. Vidovoy sostav, khimicheskiye i tipomorfnyye osobennosti aktsessornykh mineralov devonskikhalmazosoderzhashchikh otlozheniy Yuzhnogo i Srednego Timana [Species composition, chemical and typomorphic features of accessory minerals of Devonian diamond-bearing deposits of the Southern and Middle Timan]. Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 3:3–9. (in Russian)
- Derevyanko I.V.* 2001. Perspektivy Respubliki Komi na obnaruzheniye korennykh mestorozhdeniyalmazov [Prospects of the Republic of Komi for the discovery of primary deposits of diamonds]. In: Diamonds and diamond potential of the Timano-Ural region. Syktyvkar, Geoprint, pp. 27–30. (in Russian)
- Dudar V.A.* 1996. Rossypi Srednego Timana [Placers of the Middle Timan]. Ores and Metals. 4: 80–90. (in Russian)
- Dudar V.A.* 2001. Formirovaniye paleoros-sypyi Ichetyu i osnovnyye napravleniya rabot na almazy po Vol'sko-Vymskoy gryade [Formation of the Ichetyu paleoplacers and the main prospecting directions on diamonds along the Volsk-Vymskaya ridge]. In: Diamonds and diamond content of the Timano-Ural region, Syktyvkar, Geoprint, pp. 35–38. (in Russian)
- Isaenko S.I.* 2002. Vidovyye sostavy dopolnitelnykh azotnykh defektov v kristallakh almaza so Srednego Timana i ikh iz drugikh regionov Rossii [Species compositions of additional nitrogen defects in diamond crystals from the Middle Timan and from other regions of Russia]. Syktyvkar Mineralogical Collection. 32:61–67. (in Russian)
- Isaenko S.I.* 1998. Kristallomorfologiya i opticheskiye svoystva iz Vadyuyavozhskoy tuffizitovoy trubki [Crystal morphology and optical properties from the Vadyuyavozhskaya tuffizite pipe]. In: Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment, pp. 58–61. (in Russian)
- Isaenko S.I.* 2000. Rentgenostimulirovannaya lyuminestsentsiya azotnykh defektov prirodnykhalmazov [X-ray stimulated luminescence of nitrogen defects in natural diamonds]. In: Structure, substances, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment. Syktyvkar, pp. 53–58. (in Russian)
- Isaenko S.I.* 2001. Spektroskopicheskiye kharakteristikialmazov Srednego Timana i drugikh regionov Rossii [Spectroscopic characteristics of diamonds in the Middle Timan and other regions of Russia]. In: Structure, substance, history of the lithosphere of Timan-Northern Ural segment. Syktyvkar, Geoprint, pp 79–81. (in Russian)
- Karpov G.A., Silaev V.I., Anikin L.P., Mokhov A.V., Gornostaeva T.A., Sukharev A.E.* 2017. Eksplozivnaya mineralizatsiya TTI-50 [Explosive mineralization of TTI-50]. In: Tolbachin fissure eruption 2012–2013. Novosibirsk, SO RAN, pp. 241–245. (in Russian)
- Karpov G.A., Silaev V.I., Anikin L.P., Rakin V.I., Vasiliev E.A., Filatov S.K., Petrovsky V.A., Flerov G.B.* 2014. Almazy i soputstvuyushchiye mineraly v produktakh Treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya 2012–2013 gg. [Diamonds and Associated Minerals in Products of the 2012–2013 Fissure Tolbachik Eruption]. Volcanology and seismology. 6:3–20. (in Russian)
- Klyuev Yu.A., Dudenkov Yu.A., Nepsha V.I., Nikolaeva T.T.* 1974. Nekotoryye osobennostialmazov Sev. Timana [Some features of North Timan diamonds]. Doklady AN SSSR. 218(6):1424–1426. (in Russian)
- Lukyanova L.I., Sharpenok L.N., Lobkova L.P.* 2001. Priznaki endogennosti almazonosnykh obyektov Uralo-Timanskogo regiona [Signs of endogeneity of diamond-bearing objects in the Ural-Timan region]. In: Diamonds and diamond content of the Timano-Ural region, Syktyvkar, Geoprint, pp. 14–15. (in Russian)
- Lukyanova L.I., Lobkova L.P., Shadenkov E.M.* 1999. Perspektivy almazonosnosti Yevropeyskogo Severo-Vostoka Rossii v svete novykh dannykh o korennoy almazonosnosti Urala [Prospects for the diamond content of the European Northeast of Russia in the light of new data on the primary diamond content of the Urals]. In: Proceedings of the XIII Geological Congress of the Komi Republic. Vol. IV. Syktyvkar, pp. 52–54. (in Russian)
- Lyutoev V.P., Glukhov Yu.V., Makeev A.B.* 1999. Spektroskopicheskiye osobennosti i morfologiyaalmazov mestorozhdeniya Ichetyu [Spectroscopic features and morphology of diamonds from the Ichetyu deposit]. Syktyvkar Mineralogical Collection. Syktyvkar. 28:84–93. (in Russian)
- Makeev A.B., Dudar V.A., Glukhov Yu.V., Lyutoev V.P., Rakin V.I., Filippov V.N.* 1998. Morfologicheskiye osobennosti i fizicheskiye svoystvaalmazov devonskoy rossypi Ichetyu (Sredniy Timan) [Morphological features and physical properties of diamonds from the Devonian placer Ichetyu (Middle Timan)]. In: Gold, platinum and diamonds of the Republic of Komi and adjacent regions. Syktyvkar, Geoprint, pp. 138–139. (in Russian)
- Makeev A.B., Dudar V.A., Lyutoev V.P., Derevyanko I.V., Glukhov Yu.V., Isaenko S.I., Filippov V.N.* 1999. Almazy Srednego Timana [Diamonds of the Middle Timan]. Syktyvkar, p. 80. (in Russian)

- Makeev A.B., Makeev B.A. 2003. Almazy proyavleniya Ichetyu (Sredniy Timan) – proizvodnyye eklogitovoy mantii [Diamonds from the Ichetyu occurrence (Middle Timan) are derivatives of the eclogite mantle]. *In: Carbon. Mineralogy. Geochemistry. Cosmochemistry. Syktyvkar, Geoprint*, pp. 37–39. (in Russian)
- Makeev A.B., Makeev B.A. 2001. Priroda rossypanykh i korenykh almazoprovyavleniy Respubliki Komi [Nature of alluvial and primary diamond occurrences in the Komi Republic]. *In: Diamonds and diamond content of the Timan-Ural region. Syktyvkar, Geoprint*, pp. 32–35. (in Russian)
- Makeev A.B., Makeev B.A. 2005. Tsinkovyye khromshpinelidy Srednego Timana i Pripolyarnogo Urala [Zinc chromium spinels of the Middle Timan and the Subpolar Urals]. *Doklady RAN*. 404(2): 235–240. (in Russian)
- Makeev A.B., Rybalchenko A.Ya., Dudar V.A., Shametko V.G. 1999. Novyye perspektivy almazonosnosti Timana [New prospects for diamond content in Timan]. *In: Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia. Syktyvkar, IV: 63–66*. (in Russian)
- Makeev A.B., Filippov V.N. 1999. Metallicheskiye plenki na prirodnykh almazakh mestorozhdeniya Ichetyu, Sredniy Timan [Metallic films on natural diamonds from the Ichetyu deposit, Middle Timan]. *Doklady RAN*. 368(6):808–812. (in Russian)
- Makeev B.A. 2008. Sravnitelnyy mineralogicheskiy analiz tyazhelyoy fraktsii sovremennykh otlozheniy Chetlaskogo Kamnya i almaznogo proyavleniya Ichetyu [Comparative mineralogical analysis of the heavy fraction of modern deposits of the Chetlas Stone and the Ichetyu diamond occurrence]. *In: Structure and diversity of the mineral world. Syktyvkar, Geoprint*, pp. 168–170. (in Russian)
- Makeev B.A., Glukhov Yu.V., Varlamov D.A., Shevchuk S.S., Isaenko S.I. 2014. Ittriy-soderzhashchiye tsirkony iz psefitov rossy-peproyavleniya Ichetyu [Yttrium-bearing zircons from psephytes of the Ichetyu placer occurrence]. *Vestnik IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2:11–16. (in Russian)
- Makeev B.A., Glukhov Yu.V., Isaenko S.I. 2018. Niobiy-soderzhashchiy anataz proyavleniya Ichetyu (Sredniy Timan) [Niobium-containing anatase of the Ichetyu manifestation (Middle Timan)]. *In: Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy. Syktyvkar, IG Komi SC of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, pp. 40–41. (in Russian)
- Malkov B.A., Telnova O.P. 1991. Stratigraficheskoye polozheniye i vozrast metallonosnykh otlozheniy devona Srednego Timana [Stratigraphic position and age of metal-bearing deposits of the Devonian of the Middle Timan]. *In: Geology of the Devonian of the Northeast of the European part of the USSR. Syktyvkar*, pp. 45–46. (in Russian)
- Malkov B.A., Kholopova E.B. 2002. Eyfelskaya litoral'naya almazonosnaya rossyp Ichetyu na Srednem Timane [Eifel littoral diamond placer Ichetyu on the Middle Timan]. *In: Geology of the Devonian system. Syktyvkar*, pp. 272–275. (in Russian)
- Petrovsky V.A., Vasiliev E.A., Silaev V.I., Kozlov A.V., Nefedov Yu.V. 2014. Geneticheskaya IR-spektroskopiya srednetimanskikh almazov [Genetic IR spectroscopy of Middle Timan diamonds]. *In: Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia. Syktyvkar, Geoprint*, pp. 331–332. (in Russian)
- Petrovsky V.A., Glukhov Yu.V., Sukharev A.E., Kucher M.I., Martins M., Petrovsky D.V. 2005. Izotopnyy sostav ugleroda almazov (assotsiatsiya monokrystallov–karbonado) kak indikator usloviy almazoobrazovaniya [Carbon isotopic composition of diamonds (single crystals–carbonado association) as an indicator of diamond formation conditions] // *Syktyvkar Mineralogical Collection*. 34:108–125. (in Russian)
- Pystin A.M., Makhlaev L.V., Shcherbakov E.S. 2008. Potentsialno almazonosnyye magmaticheskiye komplekсы i terrigenyye almazonosnyye otlozheniya Srednego Timana [Potentially diamond-bearing igneous complexes and terrigenous diamond-bearing deposits of the Middle Timan]. *In: Problems of predicting diamonds in closed areas. Mirny*, pp. 97–102. (in Russian)
- Rakin V.I. 2003. Kristallomorfologiya almazov uralskogo tipa [Crystal morphology of Ural type diamonds]. *Syktyvkar Mineralogical Collection*. 33:5–35. (in Russian)
- Rakin V.I. 2013. Morfologiya almazov uralskogo tipa [Morphology of diamonds of the Ural type]. *Yekaterinburg: RIO UrO RAN*, p. 396. (in Russian)
- Rybalchenko A.Ya., Kolobyanin V.Ya., Lukyanova L.I. 1997. O novom tipe korenykh istochnikov almazov na Urale [On a new type of primary sources of diamonds in the Urals]. *Doklady RAS*. 353(1):90–93. (in Russian)
- Rybalchenko A.Ya., Rybalchenko T.M., Silaev V.I. 2011. Teoreticheskiye osnovy prognozirovaniya i poiskov korenykh mestorozhdeniy almazov tuffizitovogo tipa [Theoretical foundations for forecasting and searching for primary deposits of tuffizite-type diamonds]. *Izvestiya Komi Scientific Center of*

the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 1:54–66. (in Russian)

Rybalchenko A.Ya., Rybalchenko T.M., Silaev V.I. 2010. Kommentarii k nekotorym traditsionnym zabluzhdeniyam v geneticheskikh otsenkakhalmaznykh mestorozhdeniy uralskogo tipa [Comments on Some Traditional Misconceptions in Genetic Estimates of Ural Type Diamond Deposits]. Petrology and Mineralogy of the North of the Urals and Timan: Petrographic collection №6. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, pp. 92–113. (in Russian)

Silaev V.I. 2008. Sredneural'skaya diamantina: cherez 178 let posle otkrytiya [Middle Ural diamantine: 178 years after discovery]. Bulletin of the Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 1:27–35. (in Russian)

Silaev V.I., Karpov G.A., Anikin L.P., Vasiliev E.A., Vergasova L.P., Smoleva I.V. 2019. Mineralno-fazovyy paragenезis v eksplozivnykh produktakh sovremennykh izverzheniy vulkanov Kamchatki i Kuril. Chast 1. Almazy, uglerodnye fazy, kondensirovannyye organoidy [Mineral-phase paragenesis in explosive products of recent eruptions of the volcanoes of Kamchatka and the Kuriles. Part 1. Diamonds, carbon phases, condensed organoids]. Vulkanology and seismology. 5:54–67. (in Russian)

Silaev V.I., Karpov G.A., Anikin L.P., Vergasova L.P., Filippov V.N., Tarasov K.V. 2019. Mineralno-fazovyy paragenезis v eksplozivnykh produktakh sovremennykh izverzheniy vulkanov Kamchatki i Kuril. Chast 2. Mineraly-sputniki almazov tolbachinskogo tipa [Mineral-phase paragenesis in explosive products of recent eruptions of the volcanoes of Kamchatka and the Kuriles. Part 2. Accessory minerals of the Tobachinskiy type diamonds]. Vulkanology and seismology. 6:36–44. (in Russian)

Silaev V.I., Karpov G.A., Anikin L.P., Filippov V.N., Smoleva I.V., Makeev B.A., Shanina S.N., Vergasova L.P., Kiseleva D. V., Soloshenko N.G., Cherednichenko N.V., Khazov A.F., Tarasov K.V. 2022. Petro-mineralogo-geokhimicheskiye svoystva peplov vershinykh izverzheniy vulkana Klyuchevskoy 2020–2021 gg., predshestvuyushchikh pobochnomu izverzheniyu proryva Gorshkova [Petro-mineralogical-geochemical properties of ashes from the summit eruptions of the Klyuchevskoy volcano in 2020–2021, preceding the side eruption of the Gorshkov rupture]. Vulkanology and seismology. 2:3–27. (in Russian)

Silaev V.I., Karpov G.A., Rakin V.I., Vasiliev E.A., Filippov V.N., Petrovsky V.A. 2015. Almazy v produktakh treshchinnogo Tolbachinskogo izver-

zheniya 2012–2013, Kamchatka [Diamonds in products of fissure Tolbachik eruption 2012–2013, Kamchatka]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 1(26):6–27. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.26.6

Silaev V.I., Filippov V.N., Sokerin M.Yu. 2001. Tverdyye rastvory vudkhouzeit-svanbergit-florensit vo vtorichnykh kvartsitakh [Solid solutions of woodhouseite-svanbergite-florensit in secondary quartzites]. Zapiski VMO. 130(1):99–110. (in Russian)

Telnova O.P. 2001. Stratigraficheskoye polozheniye, vozrast, klimaticheskoye i fatsialnyye usloviya formirovaniya produktivnykh otlozheniy mestorozhdeniya Ichetyu [Stratigraphic position, age, climatic and facies conditions for the formation of productive beds of the Ichetyu deposit]. Diamonds and diamond content of the Timano-Ural region, Syktyvkar: Geoprint, pp 48–50. (in Russian)

Taylor S.R., Lennan S.M. 1988. Kontinentalnaya kora, yeyo sostav i evolyutsiya [Continental crust, its composition and evolution]. Moskva, Mir, p. 344. (in Russian)

Tchaikovskiy I.I. 2001. Petrologiya i mineralogiya intruzivnykh almazonosnykh piroklastitov Visherskogo Urala [Petrology and mineralogy of intrusive diamondiferous pyroclastites of the Vishera Urals]. Perm, Perm University Press, p. 324. (in Russian)

Shcherbakov E.S., Plyakin A.M. 2008. Parasterezis rossypi Ichetyu i problema pervoistochnikov almazov Timana [Parasteresis of the Ichetyu placer and the problem of the primary sources of Timan diamonds]. In: Structure and diversity of the mineral world, Syktyvkar, Geoprint, pp. 166–167. (in Russian)

Shcherbakov E.S., Plyakin A.M., Bitkov P.P. 2002. Dinamicheskoye obstanovki, kontrolirovavshiy formirovaniye produktivnogo plasta polimineralnoy rossypi Ichetyu [Dynamic conditions that controlled the formation of a productive layer of the Ichetyu polymineral placer]. In: Geology of the Devonian System. Syktyvkar, Geoprint, pp. 314–316. (in Russian)

Shcherbakov E.S., Plyakin A.M., Bitkov P.P. 2001. Usloviya obrazovaniya srednedevonskikh almazonosnykh otlozheniy Timana [Conditions for the formation of the Middle Devonian diamondiferous deposits of Timan]. In: Diamonds and diamond content of the Timan-Ural region. Syktyvkar, Geoprint, pp. 39–40. (in Russian)

Shcherbakov Yu.G. 1976. Geokhimicheskaya evolyutsiya i rudnyye formatsii [Geochemical evolution and ore formations]. In: Problems of endogenous ore formation and metallogeny. Novosibirsk, Nauka, pp. 217–229. (in Russian)

Yushkin N.P., Silaev V.I., Ploskova S.I. 2007. Mineralogicheskiy oblik Urala (analiz mineralnykh kadaстров) [Mineralogical appearance of the Urals (analysis of mineral inventories)]. *In: Geodynamics, magmatism, metamorphism and ore formation.* Yekaterinburg, IGG UrO RAN, pp. 513–519. (in Russian)

Taylor W.R. 1990. Nitrogen-defect aggregation Characteristics of some Australian diamonds: time-temperature constants on the source regions of pipe and alluvial diamonds. *American Mineralogist*, 75:1290–1310.