РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ КОМИ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

СЫКТЫВКАРСКИЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СБОРНИК





Вып. 101

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И МОРФОЛОГИЯ АЛМАЗОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИЧЕТЪЮ

В.П.Лютоев, Ю.В.Глухов, А.Б.Макеев

Алмазы являются одним из главных полезных компонентов комплексного алмаз-золото-редкометалльного месторождения Ичетью, расположенного на севере Вымской гряды (Средний Тиман). К настоящему времени из этого месторождения уже добыто более 200 алмазов, несколько килограммов золота и несколько сотен килограммов редкометалльного концентрата, содержащего ильменит, ильменорутил, колумбит, монацит, куларит, циркон и др. Найдены один двухкаратник, семь каратников, остальные алмазы более мелких размеров. Большая часть добытых алмазов относится к классу 0.25-0.5 карат, ювелирного качества - чистой воды. Встречаются окрашенные алмазы - желтоватые, зеленоватые (или с зелеными пигментными пятнами вблизи поверхности), коричневые и черные в графитовой оболочке [2]. Ю.В.Клюев (НПО ВНИИАЛМАЗ, 1988 г.) исследовал алмазы россыпи методами ИК-спектроскопии и фотолюминесценции и пришел к заключению о наличии двух источников сноса в формировании месторождения. Руководством ЗАО Тимангеология для исследований нам было предоставлено около 50 кристаллов алмазов. являющихся однородной выборкой полной добычи одного полевого сезона в одном карьере. С целью сравнительного анализа среднетиманских алмазов с алмазами Красновишерского района (Пермская обл., Средний Урал) и Зимнего Берега (Архангельская обл.) нами проведено изучение морфологии алмазов, исследование их методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), рентгено- и фотолюминесценции.

Габитус и морфологические особенности алмазов изучались с помощью фотогониометра и сканирующего электронного микроскопа. Главные гранные формы исследованных кристаллов описаны следующим набором индексов и соответствующих им кривогранных форм: наиболее широко распространен (более 50% кристаллов) псевдотетрагексаэдр (056), встречаются псевдоромбододекаэдр со сферически искривленными псевдогранями близкими к (011), псевдотригонгексаокгаэдр (467), неправильные угловатые обломки, двойники. Большая

1999

часть кривогранных кристаллов имеет относительно свежий облик и гладкую поверхность без следов истирания, что не дает оснований предполагать дальний источник их сноса, и только 2% кристаллов обнаружили сильный износ ребер признак длительного нахождения в водном потоке или дальнего источника сноса. На гранях кристаллов отчетливо видны вицинали и буторки роста, ямки травления, двойниковые швы, отпечатки других кристаллов (октаэдров - возможно, алмаза, хромшпинелидов; гексагональных пластин - вероятно, графита и др.), выходы включений графита, кремнезема (коэсита), твердых включений сложного состава (Na, K. Ca, Al, Fe, Ti, Si, P. Cl, S) типа джерфишерита и (Nd, Ta)TiO₃ - перовскитоподобной фазы, сложных редкоземельных алюмосульфатофосфатов и др. Ряд морфологических признаков и включения минераловситников указывают на рост этих алмазов на границе равновесия алмаз-графит в эклогитовом первичном парагенезисе.

Методом ЭПР в алмазах установлены разнообразные парамагнитные центры. связанные с наличием примесей, вакансий, протяженных и объемных нарушений кристаллической структуры [9]. Многие из них проявляются в оптическом и инфракрасном поглощении, люминесценции алмазов [1.7]. Основной примесью в природных алмазах является азот, и соответственно большое количество различных парамагнитных центров, присутствующих в них, включают один или несколько атомов азота в различных конфигурациях. Изучение парамагнитных центров в алмазах Ичетью проводилось на радиоспектрометре X-диапазона SE/X 2547 (RadioPAN, Poland) при частоте ВЧ-модуляции 100 кГц. Использовался прямоугольный резонатор RX-102 (мода ТЕ₁₀₂). Калибровка спектров по магнитному полю и мощности СВЧ произведена по спектрам ЭПР Е'-центров в кварце, параметры которого известны с высокой точностью. Концентрация парамагнитных центров определялась методом двойного интегрирования линий эталона (MgO:Mn²⁺) и исследуемого образца, записанных в одном спектре. Условия регистрации выбирались таким образом, чтобы обеспечить для линий ЭПР алмаза режим, далский от насыщения, и присмлемое отношение сигнал - шум для всех анализируемых линий.

На рис. 1 представлены спектры ЭПР алмазов, ориентированных направлением [100] вдоль поляризующего магнитного поля. В этой ориентации наблюдаются две системы линий, связанных с наличием примесей атомов азота в структуре алмаза. Интенсивный триплет обусловлен Р1-центрами или Сцентрами по оптической классификации. Эти центры включают изолированный атом азота, замещающий в узлах кристаллической решетки углерод. Неспаренный электрон на 70% локализован на соседнем атоме углерода и на 20% на атоме азота, что обуславливает небольшое анизотропное сверхтонкое расщепление на ядре азота и понижение локальной симметрии центра с кубической до тригональной с осью вдоль направления [111]. Спектр ЭПР описывается спин-Гамильтонианом с изотропным g-фактором и аксиальным сверхтонким взаимодействием [14]:

 $H = g_{iso}\beta H_z S_z + A_{\parallel} J_z S_z + A_{\perp} (J_x S_x + J_y S_y),$



Рис. 1. Спектры ЭПР алмазов Ичегью в ориентации магнитного поля вдоль [100].

где S=1/2, J=1, g_{iso} =2.0024, A =4.08 мT, A =25.3 мT.

Сложная система линий, наблюдаемая вокруг центральной линии триплета (рис.1), происходит от широко распространенных в алмазах Р2-центров. Эти центры ответственны за появление N3-системы линий в спектрах оптических поглощения и люминесценции. В струк-

турном плане они представляют собой треугольники Митчелла - три замещающих атома азота в плоскости (111) рядом с вакансией [11]. Парамагнетизм обусловлен наличием неспаренного электрона оборванной связи углерода. Гамильтониан, описывающий спектр ЭПР Р2-центров, включает аксиально-симметричный зеемановский член, суперсверхтонкое взаимодействие с тремя эквивалентными протонами и квадрупольное взаимодействие:

$$H = \beta HgS + \sum_{i=1}^{3} (SAJ_i + J_iPJ_i),$$

где S=1/2, J=1, g_{\parallel} =2.0025, g_{\perp} =2.0031, A_x =0.346 мТ, A_y =0.295 мТ, A_z =0.304 мТ. P~1 Мгц.

В одном из кристаллов с практически нулевой концентрацией Р2-центров были обнаружены также NV- и NV₂-центры: вакансия и дивакансия углерода. захватившие атом азота [12].

В таблице представлены полученные значения концентраций центров P1 и P2, их отношение и некоторые морфологические признаки данных кристаллов. Отметим, что концентрация P1-центров рассчитывается с удовлетворительной точностью (20% для абсолютной концентрации), так как боковые компоненты триплета регистрируются в спектрах ЭПР в чистом виде. Центральная линия триплета наложена на спектр P2-центров, в котором кроме того присутствует и трудноустранимый широкий фон. Все это сильно снижает точность оценки концентрации P2-центров (около 40% для абсолютной концентрации).

Простой вид спектра ЭПР Р1-центров позволяет по характеру расщепления линий, относящихся к четырем магнитно-неэквивалентным положениям центра в элементарной ячейке, выявлять сдвойникованные кристаллы. Так, один из

N≌	Вес, мг	Концентрация, 10 ¹⁶ см ⁻³		CP2/CP1	Цвет	Включения	Габитус
		P1	P2]			
124	46	0.66	28	40	Зеленый	1	Комбинационный
125	58	1.7	12	7	Бесцвет- ный	1	Псевдододекаэдрический
131	216	0.82	23	30	- " -	0	Псевдооктаэдрический
133	48	0.17	5.3	30	Желтый	1	Псевдотетрагексаэдри- ческий
136	99	0.97	11.5	12	- " -	0	Псевдододекаэдрический
138	46	1.5	32	21	- " -	1	Псевдотетрагексаэдри- ческий
139	58	1.5	27	18	- " -	0	_ " _
140	82	0.76	34	45	- " -	0	Псевдододекаэдрический
143	304	0.93	29	31	- " -	0	Псевдотетрагексаэдри- ческий
144	182	1.1	1.4	1	- " -	1	Двойник
145	75	1.5	36	24	Бесцвет- ный	1	Псевдотетрагексаэдри- ческий
146	95	0.23	2.3	10	Желтый	0	- " -
148	106	0.59	10	16	Зеленый	1	- " -
150	47	0.40	~2	~5	Желтый	0	Комбинационный
153	136	0.33	0	0	Бесцвет- ный	1	- 10
154	55	0.20	2	10	- " -	1	- " -
155	46	0.94	5	5	-"-	2	Псевдотетрагексаэдри- ческий
160	102	1.6	1.0	~1	Желтый	0	Псевдооктаэдрический
161	78	0.60	1.1	2	- " -	0	Псевдотетрагексаэдри- ческий
163	37	1.2	18	15	- " -	0	- " -
164	36	1.2	51	43	- " -	1	-*-
165	62	0.46	18	39	Зеленый	0	-"-
166	163	1.0	~3	~3	Желтый	1	Обломок
ЖМК	42	2.7	41	15	- " -	0	Псевдотетрагексаэдри- ческий
PMK	73	1.1	9.7	8.8	Розовый	0	Октаэдрический

Концентрации парамагнитных центров и морфологическая характеристика алмазов

Примечания. В обр. 153 присутствуют также NV-и NV₂-центры с концентрацией 10¹⁵ см³. В колонке "Включения" приведено количество идентифицированных во включениях минералов. Выделены номера образцов алмазов с сильным износом ребер - признаком дальнего переноса. Для сравнения приведены данные по двум алмазам - РМК и ЖМК с месторождения Тоудаогоу, Китай [13].

исследованных алмазов (N144) оказался двойником, что проявилось в спектре ЭПР (рис.2). В общей ориентации данного алмаза наблюдается восемь магнитнонеэквивалентных спектров Р1-центров, состоящих из двух четверок равных по интенсивности линий, что говорит о наличии двух разноориентированных блоков. Интенсивность одной четверки линий примерно вдвое выше, чем у другой. Если



Рис.2. Спектры ЭПР сдвойникованного алмаза N144 при направлении магнитного поля вдоль направления [100] большого (а) и малого двойников (б).

предположить равенство концентраций Р1-центров в обеих частях, то вес меньшего блока должен составлять 30% от общей массы кристалла. При ориентации магнитного поля вдоль направления [100] большого блока более интенсивная четверка линий Р1-центров вы-

рождается в одну линию, вторая четверка представлена двумя одиночными и одной двойной линией. Аналогичная ситуация с направлением [100] малого блока наблюдается при развороте алмаза на угол около 30 или 60°. Таким образом, алмаз N144 является двойником разноориентированных индивидов с относительными весами 30 и 70%, оси четвертого порядка которых развернуты на углы примерно 60 или 30°.

Спектры рентгено- и фотолюминесценции (РЛ и ФЛ) получены при комнатной температуре. Аппаратурные условия съемки спектров люминесценции алмазов были следующими: монохроматор AAS-1 (Carl Zeiss); рентгеновское возбуждение - УРС-1,0 (трубка БСВ-2, Fe-антикатод, 50 кВ, 14 мА), ультрафиолетовое возбуждение - ртутная лампа ДРК-120; регистрация излучения - ФЭУ-106, самописец КСПП-4. Спектры ФЛ отдельных алмазов в целях уточнения спектрального состава сняты при температуре кипения жидкого азота на оборудовании Коми государственного педагогического института (КГПИ).

В спектрах ФЛ практически всех алмазов обнаружена система линий, отнесенная в соответствии с литературными данными к N3-дефектам, или парамагнитным P2-центрам по классификации, принятой в исследованиях ЭПР [7, 9]. Она представлена серией пиков: 415.5±0.3 нм, являющейся самой узкой и характерной линией бесфононных переходов - своеобразной "визитной карточ-кой" N3-системы, а также модами фононных повторений в области 428.7±0.7, 438.8±0.5 и 451±0.5 нм (рис.3). Для определения соотношения интенсивностей бесфононных линий наблюдаются концентрационно-зависимые вариации эмиссионно-реабсорбционной природы, отмечавшиеся ранее М.Л.Гафтом [15] и нами [8]. Изредка в желто-зеленой области спектров ФЛ фиксируется относительно широкая полоса (510-520 нм), при температуре кипения жидкого

Рис.3. Спектры люминесценции алмазов с Ичетью при 300К. Все кривые нормированы на интенсивность А-полосы.

азота в ряде случаев она разделяется на отдельные компоненты, типичные для H3-системы, - проявления центров, возникающих при захвате парой замещающих атомов азота двух вакансий с образованием дефекта типа VN_2V . Как в спектрах ФЛ, так и в спектрах РЛ всех алмазов р е г и с т р и р о в а л о с ь интенсивное излучение широкой А-полосы с максимумом в голубой спектральной области (445-455 нм). Эта



полоса, как известно, является хорошим диагностическим признаком алмаза и успешно используется в технологических линиях сепарации [1]. Предполагается, что А-полоса люминесценции вызвана электронными переходами в системе "оборванная связь (ненасыщенные радикалы) - трехвалентный атом азота" [8]. На фоне "бесструктурной" А-полосы в спектрах РЛ часто отмечают электронноколебательные моды, которые относят к проявлениям различных примесных и радиационных дефектов. В нашем случае на фоне широкой колоколообразной Аполосы РЛ зарегистрированы узкие провалы, которые обусловлены реабсорбцией оптического излучения N3-центрами (402.9±0.4 и 415.3±0.3 нм), Н3-центрами (504.3±0.3 нм) и другими центрами (475-480, 440 нм). Аналогичную картину повидимому наблюдал Рамачандран [16], который рассматривал спектры алмазов с интенсивной синей рентгенолюминесценцией как наложение на сплошной спектр свечения спектра поглощения (область 415 нм и короче) и спектра фотолюминесценции в области больших длин волн.

Интенсивность как РЛ, так и ФЛ существенно зависит от размеров, формы, свойств поверхности анализируемых кристаллов. Иногда отмечаются заметные отличия спектров люминесценции, зарегистрированных с разных граней кристалла, что скорее всего указывает на неоднородность строения этих индивидов. Это частично учитывалось путем усреднения спектров люминесценции, снятых при различных ориентировках кристаллов.

Так как прямое применение значений интенсивности люминесценции для характеристики кристаллов затруднено, мы использовали параметры спектров, получаемые как отношение интенсивностей излучения в одном спектре. Для определения интенсивности реабсорбции в бесфононной линии N3-системы, проявляющейся в спектрах РЛ, использован коэффициент, аналогичный вычисляемому по спектрам оптического пропускания:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{\rho}{m}} \cdot \ln \frac{I_0}{I},$$

где ρ - плотность алмаза (3.515 г/см³), т - его масса, I - интенсивность РЛ при 415.3 нм, I₀ - интерполированное значение интенсивности РЛ в А-полосе при 415.3 нм (рис.3). Сопоставление рассчитанных таким образом коэффициентов реабсорбции N3-центров с концентрацией Р2-центров, измеренных методом ЭПР, показало прямопропорциональную зависимость между ними (рис.4). Этого и следовало ожидать, так как в обоих случаях мы имели дело с одним и тем же структурным дефектом. Исходя из полученных данных, по спектрам РЛ можно дать прогнозную оценку концентрации Р2- или N3-центров в алмазе с использованием следующего соотношения:

 $C_{m} = (2.0 \pm 0.3) \cdot 10^{17} \alpha, \tag{1}$

где α выражается в см⁻¹, а концентрация центров - в см⁻³. Найденный нами коэффициент совпадает с полученным Е.В.Соболевым [11] пересчетным коэффициентом для оценки концентрации центров по спектрам оптического поглощения. Отметим, что хотя предлагаемый вариант годится лишь для приближенной оценки концентрации данных дефектов, но он прост в реализации и характеризуется низким порогом обнаружения.

Приближенная оценка концентраций N3-центров возможна и по спектрам ФЛ. В тех кристаллах, где обнаружены высокие концентрации Р2-центров, интенсивность ФЛ как в А-полосе, так и во всех линиях N3-системы оказывается максимальной. Однако относительный вклад бесфононной линии 415.5 в общий спектр тем меньше, чем больше концентация Р2-центров (рис.3), что связано с наличием возрастающего с увеличением концентрации N3-центров перепоглощения в бесфононной полосе и отсутствием этого в полосах фононных повторений.

Проведен корреляционный анализ связей между концентрацией ЭПР центров и кристалломорфологическими особенностями алмазов. Признаками сравнения выбраны: концентрации Р1 и Р2 центров и их отношение C_{p2}/C_{p1} , с одной стороны, с другой - вес кристаллов, цвет, наличие пигментных пятен, включений, сложность гранного рельефа, наличие изношенных ребер, ямки травления. пирамиды и бугорки роста, спиральные вицинали, ступени на гранях, отпечатки минералов-спутников, наличие трещин и свилей. габитус кристаллов. Выборка включала 24 индивида - половину из всех изученных кристаллов, так как особенности спектрометра не позволяли работать со слишком мелкими кристаллами, меньше 30 мг. В результате анализа однозначные корреляционные связи между параметрами ЭПР и какими-либо кристалломорфологическими признаками не установлены.

Объем проведенных спектроскопических исследований невелик, но тем не менее достаточен для предварительной характеристики алмазов месторождения Ичетью. Статистические данные по 200 добытым кристаллам показали, что почти

Рис.4. Зависимость коэффициента реабсорбции в бесфононной линии N3-системы в спектрах РЛ алмазов от концентрации Р2центров по данным ЭПР.

все кристаллы кривогранные. Преобладающая габитусная форма - кубоиды (псевдотетрагексаэдры) с подчиненным присутствием октаэдроидов и додекаэдроидов. Преобладают алмазы со слабым зеленым цветом, много бесцветных и с желтым



нацветом. Прозрачные, бесцветные и слабоокрашенные кристаллы ювелирного качества составляют примерно 94% общего веса исследованных алмазов.

Кристаллы обладают голубой фото- и рентгенолюминесценцией, обусловленной суперпозицией линий излучения N3-системы и А-полосы. Только у некоторых кристаллов выявлена зеленая фотолюминесценция, в нескольких случаях связанная с азотными центрами H3-системы. По данным ЭПР исследованные алмазы содержат довольно постоянные количества P1-центров ($<C_{p_1} > = 9 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $\sigma = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³), но концентрация P2-центров в них сильно варьирует ($<C_{p_2} > = 1.5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $\sigma = 1.5 \cdot 10^{17}$ см⁻³). На диаграмме содержаний данных центров видно (рис.5), что фигуративные точки изученных кристаллов достаточно равномерно заполняют область значений, удовлетворяющих отношению $C_{p_2}/C_{p_1} < 40$. Условно можно выделить алмазы с высоким относительным содержанием P2-центров ($C_{p_2}/C_{p_1} > 10, <C_{p_1} > (30 \pm 10) \cdot 10^{16}$ см⁻³, n=10) и низким, до практически полного их отсутствия ($C_{p_2}/C_{p_1} < 10$, $<C_{p_1} > = (4,3\pm4,2) \cdot 10^{16}$ см⁻³, n=13).

Распределение алмазов Ичетью по концентрациям N3-центров устанавливалось по спектрам рентгенолюминесценции, с использованием соотношения (1). На гистограмме проявились две группы алмазов - с высокими и низкими содержаниями N3-центров. Двухмодальный характер распределения среднетиманских алмазов по их спектроскопическим характеристикам отмечался и ранее (Ю.В.Клюев, 1988 г.). Алмазы первой группы отличаются широким диапазоном вариации спектроскопических характеристик и наиболее яркой люминесценцией как при рентгеновском, так и при ультрафиолетовом возбуждении. Алмазы второй группы с низкими содержаниями N3-центров обладают слабой люминесценцией.

Известно, что для кристаллов алмаза характерна тенденция к агрегации изолированных атомов азота или P1-центров в кластеры, линейные, плоские и объемные структуры, стимулированной высокими температурой и давлением



Рис..5. Распределение концентраций Р1- и Р2-центров в алмазах Ичетью.

на этапах роста алмаза, продвижения и выхода кимберлитовой магмы на поверхность. Первая стадия такой агрегации сопровождается образованием Р2- или N3центров - кластеров из трех атомов азота и вакансии [7]. Судя по содержаниям Р1- и Р2центров, алмазы Ичетью характеризуются широким диапазоном вариации степени

агрегации азота и термобарических условий формирования. Можно предположить, что поступление алмазов в гравелиты Ичетью происходило из разных кимберлитовых (лампроитовых) трубок или с разных уровней одной трубки. В изученной выборке кристаллов устанавливается четкий верхний предел степени агрегации примесного азота ($C_{p_2}/C_{p_1} < 40$), не зависящий от концентрации каждого из компонентов. Возможно, эта особенность указывает на происхождение данных алмазов с разных уровней одной кимберлитовой (лампроитовой) системы.

Сравнительный анализ кристалломорфологических данных. сведений о составе минералов-спутников во включениях и в гравелитах и опубликованных данных по двум другим алмазоносным провинциям [2-7,10,13] позволяет сделать вывод о большей близости среднетиманских алмазов к уральскому типу. А значит, следует связывать перспективы поисков алмазов на Тимане с проявлениями подобными флюидизатному типу недавно обнаруженному в Пермской области [4].

В заключение авторы выражают свою признательность руководству ЗАО Тимангеология В.А. Дудару и В.Г.Шаметько за любезно предоставленные для исследования кристаллы алмазов, В.Н.Филиппову М.Ф.Щанову и В.И.Ракину за помощь в

Рис.6. Распределение алмазов Ичетью по содержанию N3-центров (данные ретгенолюминесценции).



проведении исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №96-15-98506).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахтин А.И., Горобец Б.С. Оптическая спектроскопия минералов и руд и ее применение в геологоразведочных работах. - Казань: Изд-во КГУ, 1992. - 234 с.

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

3. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. - М: Госгеолиздат, 1955. - 427 с.

4. О новом типе коренных источников алмазов на Урале / А.Я.Рыбальченко, В.Я.Колобянин, Л.И.Лукьянова и др.// ДАН.- 1997. - Т.353. - № 1 - С.90-93.

5. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. - М: Наука, 1984. - 263 с.

6. Особенности кристаллов алмаза Беломорья, Тимана, Северной Якутии и их генезис / А.В.Бовкун, В.К.Гаранин, П.Г.Майбородский, Т.В.Посухова // Минералогический журнал. - 1996. - Т.18. - № 4. - С.44-55.

7. Природные алмазы России: Науч.-справ. изд. под ред. В.Б.Кваскова.- М.: Полярон, 1997.- 304 с.

8. Проявление эффекта реабсорбции в спектрах рентгено- и фотолюминесценции / В.П.Лютоев и др.// Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России: Новые результаты и новые перспективы: Материалы XIII Геологического Съезда Республики Коми. - Т.IV, - Сыктывкар. 1999. - С.56-59.

9. Радиоспектроскопические свойства неорганических материалов / М.В.Власова, Н.Г.Каказей, А.М.Калиниченко, А.С.Литовченко. - Киев: Наукова думка, 1987. - 719 с.

10. Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М. История алмаза. - М.:Недра, 1997. - 601 с.

11. Щербакова М.Я., Надолинный В.А., Соболев Е.В. Центр N3 в природных алмазах по данным ЭПР // ЖСХ. - 1978. - Т.19. - №2. - С.305-314.

12. Щербакова М.Я., Соболев Е.В., Надолинный В.А. Электронный парамагнитный резонанс низкосимметричных примесных центров в алмазе // ДАН СССР - 1992. - Т.204.- №4.- С.851-854.

13. Юшкин Н.П., Макеев А.Б. Алмазные месторождения Тоудаогоу (Китай) и Архангельской области: сравнительный анализ // Сыктывкарский минералогический сборник № 25. - Сыктывкар, 1996. - С.5-33. (Тр. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН; Вып.90).

14. Electron spin resonans of nitrogen donore in diamond / M.V.Smith, P.P.Sorokin, L.L.Gelles et al. // Phys. Rev. -1959.- V.115.- No6. - P.1546-1552.

15. Gaft M. Diamonds photoluminescence at room temperature // Abstacts of 16th IMA Gen.Meet.- Pisa, 1994.- P.131-132.

16. Ramachandran I.N. The luminiscence of diamond excites by X-radiation// Proc. Ind. Acad. Sci. - 1946.-V.24A, N1. УДК 552.323.6+549

Лютоев В.П., Глухов Ю.В., Макеев А.Б. Спектроскопические особенности и морфология алмазов месторождения Ичетъю // Сыктывкарский минералогический сборник №28.- Сыктывкар, 1999.- С. 84-93 (Тр. Ин-та геологии Коми науч. центра УрО РАН; вып.101). Рис.6, табл.1. Библиогр. назв. 14.

Рассматриваются кристалломорфологические особенности (габитус, гранная скульптура, цвет, включения, размер и другие свойства) 46 кристаллов алмазов из месторождения Ичетъю. Методами ЭПР, фото- и рентгенолюминесценции в кристаллах выявлены шесть парамагнитных и оптических центров: P1, P2 (N3), NV и NV₂-центры, H3 (VN₂V) - система, A - полоса, и определены их концентрации. Корреляционный анализ не выявил достоверных связей между внешними кристалломорфологическими особенностями алмазов и их спектроскопическими свойствами. Сравнительный анализ кристалломорфологических данных и сведений по составу минералов-спутников во включениях в гравелитах и опубликованных данных по двум другим европейским алмазоносным провинциям России позволяет сделать вывод о большей близости среднетиманских алмазов к уральскому типу.