

*На правах рукописи*



**КЛЕПИКОВ Игорь Вячеславович**

**АЛМАЗЫ ЗАПАДНОГО ПРИУРАЛЬЯ: ДЕФЕКТНО-  
ПРИМЕСНЫЙ СОСТАВ, ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И  
ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ**

25.00.05 – минералогия, кристаллография

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-  
минералогических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте имени А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

Научный руководитель:

**Васильев Евгений Алексеевич**, кандидат геолого-минералогических наук, Санкт-Петербургский Горный Университет

Официальные оппоненты:

**Шумилова Татьяна Григорьевна**, доктор геолого-минералогических наук, руководитель Лаборатории минералогии алмаза ФГБУН Института геологии Коми НЦ УрО РАН.

**Рагозин Алексей Львович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Лаборатории экспериментальной минералогии и кристаллогенезиса ФГБУН Института геологии и минералогии СО РАН.

**Ведущая организация:**

Минералогический Музей им. А.Е. Ферсмана Российской Академии Наук, г. Москва.

Защита состоится 02 июня 2020 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.067.02, созданного на базе ИГМ СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3; факс(383) 373-05-61; e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН. Адрес сайта: <http://www.igm.nsc.ru>, раздел «Образование».

Автореферат разослан «27 » апреля 2020 г.

Ученый секретарь

Диссертационного

совета



Гаськова О.Л.

Доктор геолого-минералогических наук

## **Введение**

### Актуальность исследований

190 лет назад на Урале был найден первый алмаз. С тех пор велись поиски месторождений, которые привели к обнаружению промышленно алмазоносных аллювиальных россыпей на Среднем и Северном Урале. Морфология алмазов Урала описана насколько возможно полно [Кухаренко, 1955; Орлов, 1973; Шеманина, 1993; Ракин, 2013]. Исследования алмазов Урала методом ИК-спектроскопии проводили Г.К. Хачатрян (2003), Ю.В. Нефедов (2012), В.П. Лютоев (2012), Е.Н. Федорова с коллегами (2013). Исследование люминесцентных особенностей носят фрагментарный характер [Гомон, 1960; Титков и др., 2010; Исаенко, 2016]. Внутреннее строение алмазов Урала изучалось на единичных образцах [Смирнова, 1995; Бескрованов, 2000; Kaminsky, Khachatryan, 2004; Захарченко, Хачатрян, Гречишников, 2006]. Состав включений в алмазах Урала свидетельствует о кимберлитовой природе источника, парагенезис изученных включений преимущественно эклогитовый [Соболев и др., 1971; Laiginhas, 2008; Sobolev et.al., 2015, 2019].

В 90-х годах была разработана концепция нового типа коренных месторождений алмазов Урала [Жуков 1998; 2001, Лукьянова 1997, 2000], согласно которой коренными алмазоносными породами являются флюидно-эксплозивные образования (пирокластиты, туффзиты и их брекчии). Одним из наиболее крупных месторождений этого типа является «Рассольнинская депрессия» в Красновишерском районе. Этот объект промышленно разрабатывался, и его алмазы описаны И.И. Шафрановским (2001); Н.Н.Зинчуком и В.И. Коптилем (2003), И.И. Чайковским (2010). Комплексные структурно-минералогические исследования и сравнение представительных коллекций алмазов из источников этого типа и аллювиальных россыпей не проводились.

В связи с вышеизложенным, является актуальным комплексное изучение и сравнение алмазов из пород различных генетических типов месторождений западного Приуралья.

Цель работы - анализ и генетическая интерпретация минералогических особенностей кристаллов алмаза из месторождений алмазов двух типов западного Приуралья.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- исследование и анализ морфологии кристаллов алмаза из двух типов месторождений западного Приуралья на представительных коллекциях;
- исследование кристаллов алмаза методами высокоразрешающей люминесцентной и ИК спектроскопии;
- отбор кристаллов для дальнейшего детального изучения, изготовление плоско-параллельных пластин из выбранных кристаллов и визуализация их внутреннего строения;
- выявление взаимосвязи морфологии и внутреннего строения кристаллов алмаза разного габитуса;
- определение локальных вариаций дефектно-примесного состава по зонам и пирамидам роста кристаллов;
- сравнительный анализ изученных алмазов западного Приуралья с аналогичными алмазами из других регионов мира.

#### Методы и объекты исследования

В диссертации приведены результаты исследований более 650 кристаллов алмаза. Изучены 336 кристаллов алмаза месторождения «Рассольнинская депрессия» (далее РД), добытые в 1995—1999 гг., коллекция ООО «Геокарта-Пермь», и 144 кристалла из современных аллювиальных россыпей рек Б. Колчим, Б. Щугор (далее АР) Красновишерского района, коллекция ВСЕГЕИ. Также исследованы кристаллы современных аллювиальных отложений рек Вижай (14 шт.) и Усьва (15 шт.) Горнозаводского района из коллекции ВСЕГЕИ. Кроме этого, были изучены 164 кристалла алмаза из аллювиальных россыпей Анабаро-Оленекского междуречья (далее АОМ), добыты в 1960-70-х гг., коллекция музея кафедры минералогии СПбГУ. Из кристаллов алмаза было изготовлено более 40 плоско-параллельных пластин.

Особенности дефектно-примесного состава, морфологии и внутреннего строения кристаллов алмаза были изучены с помощью следующих методов:

- ИК-спектроскопии – на спектрометре Vertex 70 с микроскопом Hyperion1000;
- фотOLUMИНЕСЦЕНЦИИ (ФЛ) – на спектрометрах Renishaw In Via и Horiba FL3;
- монохромной катодOLUMИНЕСЦЕНЦИИ (КЛ) – на СЭМ CamScan MX2500 S;

- электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) – на приборах РЭ 1306/1307 и ELEXSYSE 580;
- спектроскопии поглощения в видимой области (ВО) – на спектрофотометре UV-2550PC;
- оптической микроскопии (ОМ) – на микроскопе Leica M205.

#### Научная новизна

1) Установлено отличие морфологических особенностей, примесного состава и спектроскопических характеристик кристаллов алмаза из месторождения «Рассольнинская депрессия» и из аллювиальных россыпей западного Приуралья. Показано, что кристаллы месторождения «Рассольнинская депрессия» характеризуются достаточно узким диапазоном разброса данных параметров, что позволяет связывать их с единым коренным источником;

2) Показана ростовая природа четырехугольных углублений на поверхности кристаллов алмаза с пирамидами роста граней {100}. Установлено, что их наличие есть индикатор сложного внутреннего строения кристаллов;

3) В аллювиальных россыпях выявлены 4 группы кристаллов алмаза с пирамидами роста граней {100}. Показано, что эти группы характерны для большинства источников с кристаллами «уральского» типа;

4) Выявлены не наблюдавшиеся ранее системы ФЛ. Установлена приуроченность систем ФЛ 926 и 933 нм к пирамидам роста граней {100} и {111} соответственно. Для группы кубоидов II разновидности по Ю.Л. Орлову установлена интенсивная ФЛ с бесфонными линиями - 800, 820.5, 840, 860, 869 нм.

Личный вклад автора. В основу диссертации положены результаты работы автора на протяжении 2014-2019 гг. в магистратуре СПбГУ и аспирантуре ФБГУ «ВСЕГЕИ». Автор принимал непосредственное участие в получении, обработке, интерпретации данных ИК-спектроскопии, фотолюминесценции и ЭПР, проведении морфологического анализа. Также автор принимал участие в изготовлении плоско-параллельных пластин и последующей интерпретации данных по визуализации внутреннего строения кристаллов алмаза.

Практическая значимость. Полученные результаты повышают перспективность района на обнаружение коренных источников

кристаллов алмаза. Материалы диссертации могут быть использованы при диагностике бриллиантов, для определения искусственного или природного происхождения алмазов, при поиске алмазных месторождений.

#### Апробация работы:

Результаты проведенных исследований обсуждались на различных Всероссийских и Международных конференциях: «Международный Геммологический Конгресс» в Мадриде (2014 г.), XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» в Москве (2015 г.), Конференция Российского Минералогического общества в Санкт-Петербурге (2017 г.), V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения» в Мирном (2018); конференция «Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского» в Перми (2019 г.), юбилейная Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске (2019 г.), научная конференция «Минералогические музеи – 2019. Минералогия вчера, сегодня, завтра» в Санкт-Петербурге; научная конференция «Геммология» в Томске, (2019).

Материалы диссертации опубликованы в 18 работах, из них 8 статей в реферируемых журналах и 10 тезисы докладов Всероссийских и Международных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из 4 глав, введения и заключения. Общий объем диссертации составляет 167 страниц, в том числе 79 рисунков и 7 таблиц. Список использованной литературы включает 148 наименований.

**В первой главе** рассмотрены вопросы истории открытия, коренных источников россыпей, морфологии, внутреннего строения и спектроскопических особенностей алмазов Урала, известные на сегодняшний день. По литературным данным [Кухаренко, 1955; Остроумов и др., 1996; Жуков 1998; 2001, Лукьянова 1997, 2000; Рыбальченко, 1997, 2011; Россыпи алмазов..., 2007] установлено, что в западном Приуралье существует 2 типа источников кристаллов алмаза сложного генезиса: современные аллювиальные россыпи и месторождения, связанные с флюидно-эксплозивными

образованиями. Показана необходимость сравнительного исследования кристаллов алмаза из источников этих двух типов.

Во **второй главе** рассмотрены методы и объекты исследования.

В **третьей главе** рассмотрены вопросы типоморфизма алмазов «уральского» типа. Проведен сравнительный анализ морфологии и спектроскопических особенностей алмазов из двух источников западного Приуралья (аллювиальные россыпи Красновишерского района и месторождение «Рассолинская депрессия»), а также приведены исследования алмазов из россыпей Анабаро-Оленекского междуречья.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования внутреннего строения и дефектно-примесного состава разнообразных морфологических типов кристаллов алмаза из россыпей Красновишерского района и месторождения «Рассолинская депрессия».

#### Благодарности

Автор диссертационной работы выражает глубокую благодарность научному руководителю- к.г.-м.н. Васильеву Е.А. и научному консультанту к.г.-м.н. Лукьяновой Л.И., за помощь на всех этапах выполнения работы и ценные замечания. Искреннюю благодарность хотелось бы выразить руководству ФГБУ «ВСЕГЕИ» за предоставленные коллекции и поддержку в обучении, а также руководству компании ООО «Нью Даймонд Технолоджи» - Хихинашвили Т.Ю., Колядину А.В., Анели И.Д. за помощь в проведении исследований. Отдельное спасибо автор выражает коллективу кафедры минералогии СПбГУ, а особенно куратору музея Г.Ф. Анастасенко за всестороннюю помощь и предоставление для исследований образцов кристаллов алмаза Анабаро-Оленекского междуречья.

Автор признателен д.г.-м.н. Козлову А.В. за ценные замечания и возможность проведения исследований на кафедре минералогии, кристаллографии, петрографии (МКП) Санкт-Петербургского Горного университета. Исследования методом ЭПР проходили в РЦ СПбГУ «Магнитно-резонансные методы исследования» под руководством специалиста С.М. Сухаржевского. За получение изображений КЛ автор благодарит Антонова А.В. (центр Изотопных исследований ВСЕГЕИ). За ценные замечания и демонстрацию

образцов автор благодарит сотрудников ЗАО «Пермгеологодобыча» В.А. Кириллова, И.П. Тетерина и сотрудников Горного института Уро РАН – д.г.-м.н. И.И. Чайковского и к.г.-м.н. О.В.Коротченкову.

### **Обоснование защищаемых положений**

**1. Кристаллы алмаза месторождения «Рассольнинская депрессия» отличаются от кристаллов из аллювиальных россыпей Красновишерского района по морфологии, концентрации азотных дефектов и частоте встречаемости систем ФЛ.**

**Унимодальное распределение концентрации азотных дефектов и сходство морфологических особенностей кристаллов месторождения «Рассольнинская депрессия» есть признак единственности их коренного источника.**

Особенности морфологии алмазов Красновишерского района. Анализ морфологических особенностей алмазов позволил выявить заметные отличия кристаллов из РД и АР (таблица 1). Кристаллы алмаза АР представлены октаэдрами, додекаэдроидами и кубоидами. Округлых кристаллов «уральского (бразильского)» типа в этих источниках около 65 %. В коллекции РД доля округлых кристаллов достигает 84 %, содержание октаэдров и октаэдроидов около 9 %. В выборке АР 12 % кристаллов с фрагментами граней куба, а также встречены темно-зеленые кристаллы IV разновидности по Ю.Л. Орлову и безазотные индивиды (4%). В коллекции РД фрагменты кристаллов составляют 6.7 %, в коллекции АР 2 %. На алмазах АР встречаются следы механического износа в форме: а) выкрашивания ребер, б) серповидных трещин, в) матировки. На алмазах РД выкрашивание ребер и матировка не обнаружены, отдельные серповидные трещины отмечены на двух кристаллах. Леденцовая скульптура на алмазах РД встречается реже и выражена слабее.

Таблица 1. Морфологические особенности кристаллов алмаза Рассольнинской депрессии и современных аллювиальных россыпей.

Источник	Октаэдры, октаэдровиды, %	Додекаэдровиды, %			Кубовиды, %	Серповидные трещины, %
		Реликты граней октаэдра	Без реликтов	Реликты граней куба		
Рассольнинская депрессия	9	4	80	0.3	—	1
Аллювиальные россыпи	16	9	57	10	2	20

Таким образом, алмазы аллювиальных россыпей Красновишерского района характеризуются более широким разнообразием морфологических типов кристаллов. Кристаллы AP и PД имеют значительные отличия по степени механического износа и скульптурам на поверхности.

Особенности ИК-поглощения алмазов Красновишерского района. Анализ распределения алмазов PД и AP по общей концентрации азота  $N_{tot}$  и доле азота в форме дефектов В1 ( $N_{B1}$ ) (рисунок 1) позволил выявить отчетливые отличительные особенности. В выборке PД нет безазотных кристаллов типа Па по физической классификации. Также не обнаружены кристаллы с предельно низкой или высокой долей азота в форме дефектов В1 — типов IaА и IaВ. Основная часть кристаллов располагается в области 30—60 % по степени агрегации и 400—900 ppm по  $N_{tot}$ .

Выборка AP значительно отличается тем, что кристаллы занимают весь диапазон диаграммы и распределены достаточно равномерно. В выборке AP 4 кристалла (3 %) безазотных типа Па, 20 образцов (14 %) типа IaА без дефектов В1 и В2 и 4 кристалла (3 %) типа IaВ. По модельной температуре эти кристаллы занимают диапазон от 1000 до 1400 °С.

Кристаллы PД имеют унимодальное распределение по концентрации азота с максимумом при 725 ppm (рисунок 2, а). В полигенном россыпном месторождении с алмазами из нескольких коренных источников сложно ожидать такого компактного распределения характеристик [Костровицкий и др., 2015]. В выборке AP четверть кристаллов имеют  $N_{tot}$  менее 150 ppm и около 45 % кристаллов с пониженным относительно PД содержанием

азота.

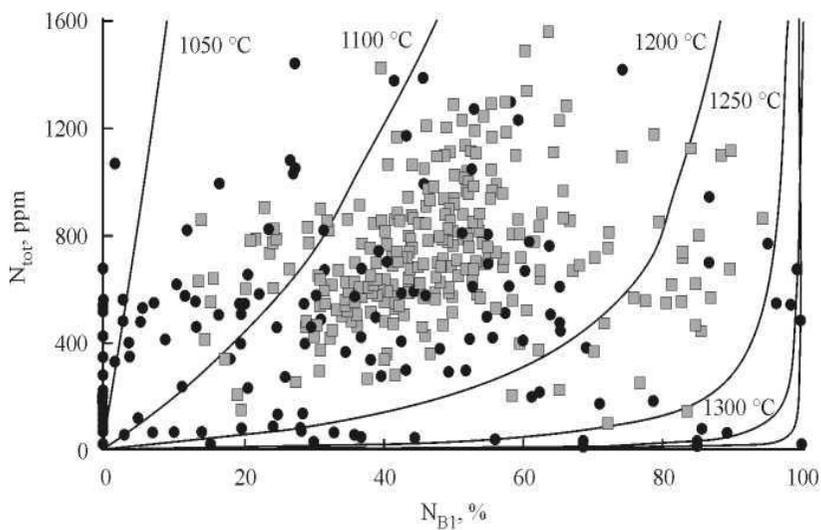


Рис. 1. Распределение кристаллов Рассольнинской депрессии (1) и аллювиальных россыпей (2) по концентрации азота  $N_{tot}$  и доле азота в форме дефектов  $B1$ ,  $N_{B1}$ . На диаграмму вынесены изотермы, соответствующие времени отжига 3 млрд лет [Taylor et.al., 1990].

Распределение по коэффициенту поглощения полосы водородсодержащего дефекта [Goss et al., 2014]  $\alpha_{3107}$  имеет логнормальный характер, у кристаллов РД смещено в сторону больших значений (рисунок 2, б). У кристаллов РД среднее арифметическое  $\alpha_{3107}$  составляет  $2.8 \text{ см}^{-1}$ , мода  $1.1 \text{ см}^{-1}$ ; у кристаллов АР эти значения  $1.1$  и  $0.44 \text{ см}^{-1}$  соответственно. Меньшее значение среднего  $\alpha_{3107}$  в выборке АР по сравнению с РД соответствует меньшей концентрации азота. Максимальные значения  $\alpha_{3107}$  в кристаллах РД составили  $17, 24, 25, 29 \text{ см}^{-1}$ , в выборке АР —  $10$  и  $14 \text{ см}^{-1}$ .

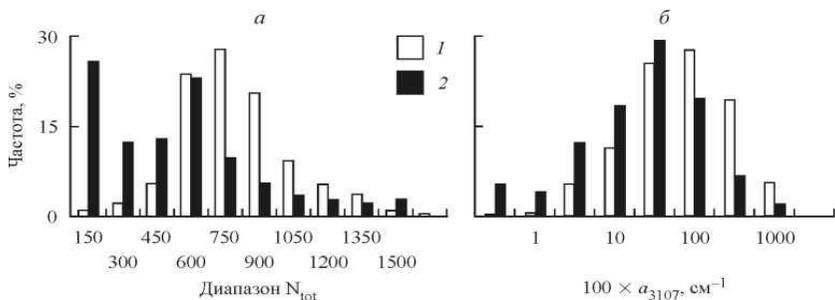


Рис. 2. Распределение кристаллов Рассольнинской депрессии (1) и аллювиальных россыпей (2). а — по концентрации азота  $N_{tot}$ ; б — по коэффициенту поглощения полосы водородсодержащего дефекта в полулогарифмических координатах.

Таким образом, для кристаллов месторождения «Рассольнинская депрессия» характерно унимодальное распределение по концентрации азота и более узкий диапазон значений доли дефекта В1 - они принципиально отличаются от кристаллов аллювиальных россыпей.

Особенности фотолюминесценции алмазов Красновишерского района. В таблице 2 приведены частоты встречаемости наиболее интенсивных систем люминесценции: НЗ, Н4, GR1 и 575 нм, полос 700.3, 797, 926, 933 нм при возбуждении 488 нм.

Таблица 2. Набор систем в спектрах ФЛ (возбуждение 488 нм) кристаллов алмаза РД и АР.

Источник/ Полоса люминесценции	Н4	НЗ	GR1	575 нм	787 нм	926 нм	933 нм	max 720*	max 900*
Частота встречаемости, %									
Рассольнинская депрессия	11	63	33	5	64	22	66	23	45
Аллювиальные россыпи	11	86	25	12	23	13	15	23	8

Примечание. \*max 720, max 900 — широкие полосы люминесценции с максимумами при 720 и 900 нм.

Как видно из таблицы, в два раза отличается частота встречаемости дефекта NV(575 нм), значительные различия наблюдаются по частотам встречаемости полос 787, 933 нм, широкой полосы с максимумом около 900 нм

**2. Четырехугольные углубления на поверхности кристаллов алмаза из россыпей западного Приуралья - это проявление полицентрического регенерационного роста граней  $\{111\}$  в направлении  $[100]$ . Они являются индикатором сложного внутреннего строения кристалла и смены механизма его роста.**

Одним из основных отличий изученных кристаллов алмаза АР и РД является присутствие в коллекции АР 12% кристаллов с четырехугольными углублениями (кубоидов, тетрагексаэдров и додекаэдров). Эти кристаллы выделяются в коллекции АР как в морфологическом, так и в спектроскопическом аспектах. Поэтому предметом детального исследования внутреннего строения и локальных спектроскопических особенностей на плоско-параллельных пластинах явились именно такие кристаллы.

На рисунке 3а, 3б показаны торцевые фрагменты вырезанных пластин и фрагмент кристалла 612-66 при просмотре в направлении  $[100]$  (рисунок 3, в), на которых отчетливо видны четырехугольные углубления, и с ними сопоставлены изображения КЛ приповерхностных слоев (рисунок 3, г-е). Внешняя часть кристаллов состоит из слоев  $\{111\}$ , расположенных в направлении  $[100]$ .

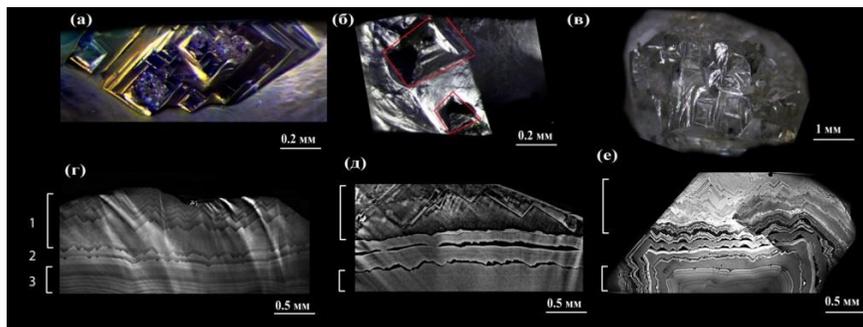


Рис. 3. Фрагменты поверхности с четырехугольными углублениями и внутреннее строение внешних зон в сечении кристаллов 123-76 (а – ОМ, г – КЛ), 122-76 (б – ОМ, д – КЛ) и 612-66 (в – ОМ, е – КЛ). 1 – октаэдрическая зональность, 2 – промежуточная стадия, 3 – криволинейная зональность.

При начале тангенциального регенерационного роста образуется множество мелких ступеней роста слоёв  $\{111\}$  по

общему направлению [100]. На этом этапе в огранении кристалла появляется комбинационная штриховка. Кристаллы имеют кубический габитус, но их поверхность сформирована рельефом слоев {111} – это пирамидки, углубления, мелкоступенчатые октаэдрические положительные формы. При дальнейшем росте слоев {111} формируется регенерационная поверхность полицентрического роста, далее происходит оформление кристалла гранями торможения {100}. Следовательно, как впервые показано в данной работе, четырехугольные углубления это проявление в рельефе поверхности в направлении [100] полицентрического роста граней {111} (рисунок 4). В экспериментах по выращиванию кристаллов алмаза методом НРНТ [Brozdov et al., 2002; Palyanov et al., 2009] также показан регенерационный рост граней {111} в направлении [100] с формированием четырехугольных углублений.

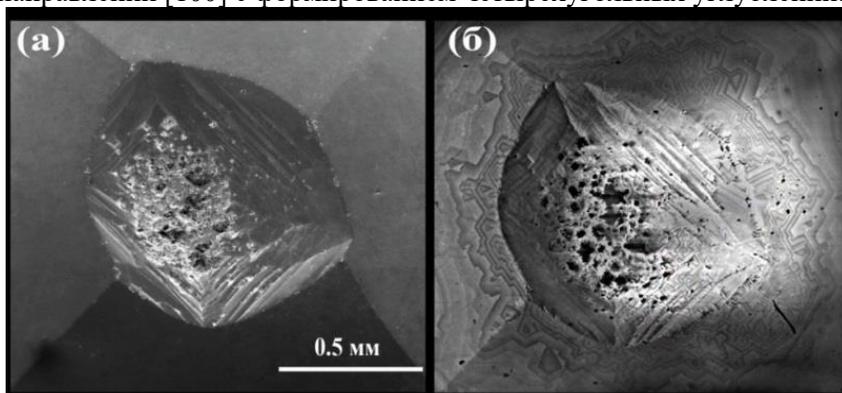


Рис. 4. Фрагменты рельефа и КЛ изображение естественной поверхности кристалла с четырехугольными углублениями 123-76 (а – BSE , б – КЛ).

В многочисленных опытах по травлению и растворению алмаза показано формирование четырехугольных ямок в направлении [100] [Хохряков, 2004; Khokhryakov, Palyanov, 2007; Fedortchouk, Sanil, 2009]. Поэтому при растворении кристаллов с рельефом полицентрического роста и поверхность усложняется – ямки травления накладываются на ростовой рельеф.

**3. Для современных аллювиальных россыпей западного Приуралья характерна ассоциация кристаллов алмаза с пирамидами роста граней {100}: 1) кубиды II разновидности по**

Ю.Л. Орлову; 2) кубоиды с прозрачным ядром и внешней зоной, насыщенной включениями; 3) кристаллы с совместным ростом пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$ ; 4) кристаллы с последовательным ростом пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$ . Наличие таких кристаллов - характерный признак источников алмазов с преобладанием кристаллов кривогранных форм.

Изученные кристаллы кубического габитуса разделяются на несколько групп, которые отличаются по ростовым и спектроскопическим особенностям.

1. Кубоиды, II разновидность по классификации Ю.Л. Орлова.

Встречаются как кубы с незначительным растворением ребер, так и додекаэдрониды, абсолютно утратившие морфологию куба. Это кристаллы типа IaA+Ib,  $N_{tot}=20-300$  ppm. Центр кристалла обладает желтой ФЛ и желтой окраской (рисунок 5), обусловленной C-центрами. Системы N3 и H3 проявлены во внешних зонах кристаллов, эти зоны бесцветны в ОМ. Также есть слабо люминесцирующая зона, имеющая неравномерные криволинейные границы в ФЛ и КЛ (рисунок 5, а). Общая особенность этой группы кристаллов - присутствие в спектрах ФЛ сложной широкой полосы с фоновыми повторениями и максимумом около 700 нм, центра 635.1 нм и центра 636.8 нм. При возбуждении 785 нм тонкая структура ФЛ проявляется еще более отчетливо – выявлены интенсивные линии 800, 820.5, 823, 840, 843, 847, 860, 869, 884, 890, 912 нм.

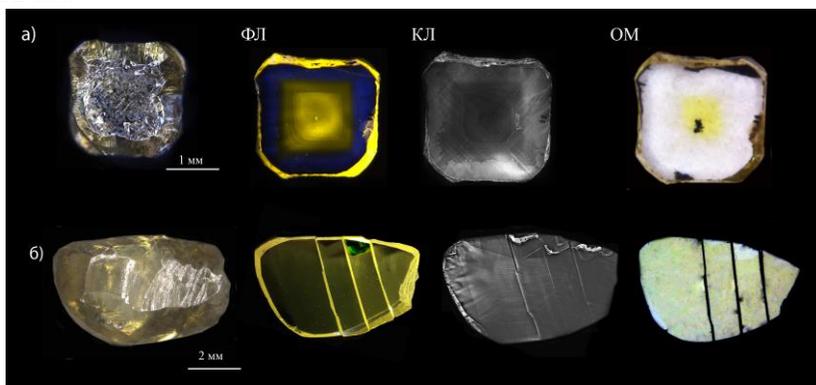


Рис. 5. Кристаллы группы №1. Кубоиды а) 600-66; б) 126-76, II разновидность по классификации Ю.Л.Орлова. Фото ФЛ сделаны при возбуждении 365 нм, 1- кубическая зона, 2 - октаэдрическая зона.

2. Кубоиды с прозрачным ядром и внешней зоной, насыщенной включениями. Данную группу сложно однозначно отнести к какой-то разновидности по классификации Ю.Л. Орлова [Афанасьев, 2011]. Это кристаллы типа IaA,  $N_{tot}=200-500$  ppm. Прозрачные ядра кристаллов соответствуют изначальному совместному росту пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$  или только  $\{111\}$ , а составляющая большую часть кристалла зона с включениями - рост по кубу (рисунок 6). Желтая ФЛ в этих кристаллах обусловлена только S1-системой люминесценции, центров 635.1 и 636.8 нм, широкой полосы ФЛ с максимумом 700 нм в них не обнаружено, отсутствует и сложная люминесценция при возбуждении лазером 785 нм. На спектрах ФЛ выражены системы N3, N3 и присутствует слабый пик 926 нм. Кристаллы либо однородны по  $N_{tot}$ , либо близки по распределению к первой группе. В этих кристаллах наблюдается однородная ФЛ системы N3 по всей площади, а желтая ФЛ соответствует зонам, насыщенным микровключениями.

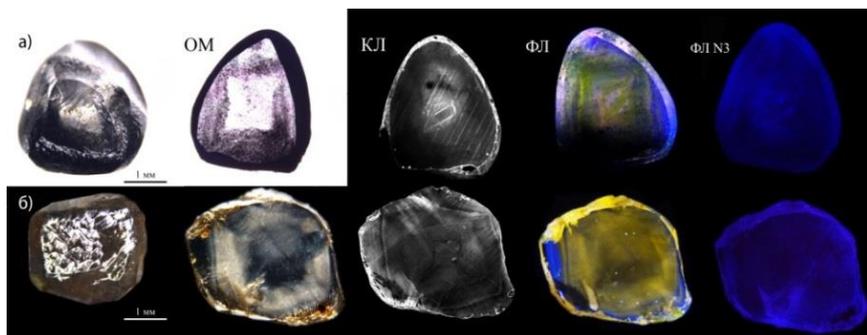


Рис. 6. Кристаллы группы № 2 - кубоиды с прозрачным ядром и внешней зоной, насыщенной включениями: а) 685-66; б) 602-66. ФЛ при возбуждении 405 нм, ФЛ системы N3 при возбуждении 405 нм, через светофильтры 450 нм и синий СС4.

3. Кристаллы с совместным ростом пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$ .

На поверхности этих кристаллов часто отмечается сонахождение четырехугольных и треугольных фигур, их особенностью является совместный рост пирамид куба и октаэдра (рисунок 7). Пространственный объем пирамиды куба и октаэдра приблизительно одинаков. Исходя из этого, морфология кристаллов

смещается в сторону тетрагексаэдроида.  $N_{\text{tot}}=600-1500$  ppm,  $N_{\text{B1}}=0-70$  %, высокий  $\alpha_{3107}$ , множество микровключений в секторах куба.

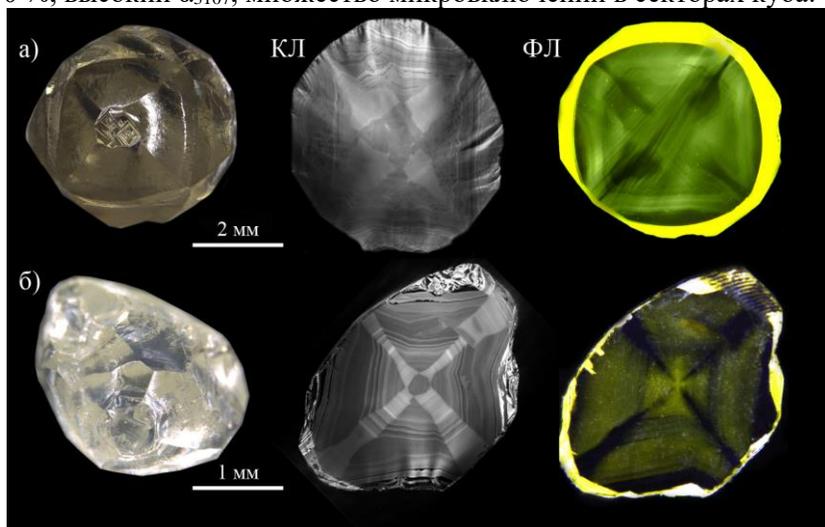


Рис. 7. Кристаллы группы № 3 с совместным ростом пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$ : а) 123-76; б) 29-76. ФЛ при возбуждении 365 нм и 405 нм через светофильтр 450 нм.

На спектрах ФЛ при возбуждении 350 нм (при  $23^\circ \text{C}$ ) регистрируется система ФЛ  $N3$  и широкая полоса  $S$  дефектов; при  $-196^\circ \text{C}$  на спектрах появляются пики 489, 498, 523, 526, 536, 557, 575, 603, 700.3, 787 нм. При возбуждении 450 нм (при  $23^\circ \text{C}$ ) помимо широкой зеленой полосы появляются пик 584 нм с повторениями 606 и 630 нм.

4. Кристаллы с последовательным ростом пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$ . В таких кристаллах наблюдается как минимум 2 последовательные стадии роста по разному механизму [Zedgenizov et al., 2006; Скузоватов и др., 2011]. Например, в ядре кристалла видна только октаэдрическая зональность, а затем появляется концентрическая зональность пирамид роста граней  $\{100\}$  (рисунок 8, а). Или наоборот, центральную часть представляет куб, а затем развит октаэдр (рисунок 8, б). Морфология кристалла может меняться, в зависимости от преобладания той или иной пирамиды

роста на последнем этапе. По спектроскопическим особенностям данные кристаллы в целом аналогичны предыдущей группе.

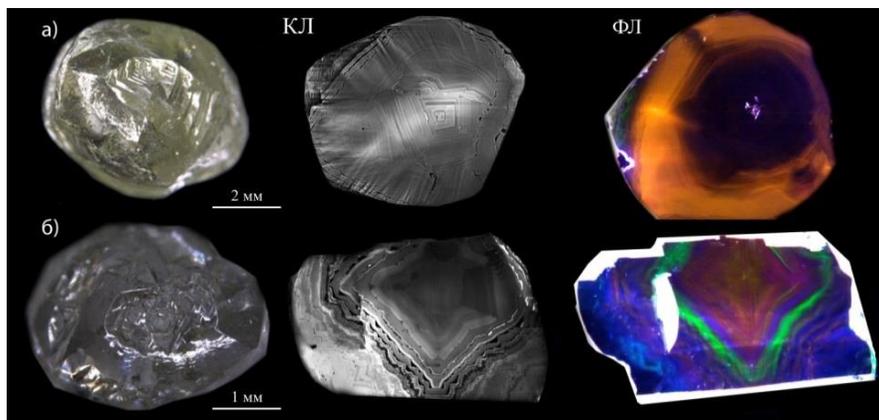


Рис. 8. Кристаллы группы №4 с последовательным ростом пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$ : а) 122-76; б) 612-66. ФЛ при возбуждении 405 нм (краевой светофильтр 450 нм).

Проведенные исследования показывают, что кубоиды II разновидности из россыпей Урала близки по внутреннему строению и спектроскопическим особенностям к «янтарным» кубоидам Анабаро-Оленекского междуречья [Зудина и др., 2013; Титков и др., 2015; Zedgenizov et al., 2016], россыпей Калимантана [Smith et al., 2009] и россыпей Зимми, Сьерра-Леоне [Smit et al., 2018]. Кристаллы с совместным ростом пирамид граней  $\{100\}$  и  $\{111\}$  также являются достаточно редкими, аналогичная группа кристаллов выделена и исследована в россыпях Маранге, Зимбабве [Smit et al., 2016]. В коренных месторождениях Ботсваны [Timmerman et al., 2018] и Архангельской субпровинции [Kriulina et al., 2012, 2019], некоторые породы которых по своему происхождению сравниваются с уральскими флюидно-эксплозивными туффизитами, также обнаружены группы низкоазотных кубоидов, аналогичных Уральским. Это очень редкие группы кристаллов но, не смотря на уникальность, при сравнении их между собой из разных регионов, они обнаруживают очень сходное внутреннее строение и спектроскопические особенности.

4. В кристаллах с совместным или последовательным ростом полосы 912 и 933 нм приурочены к пирамидам роста граней {111}, а полоса 926 нм – к пирамидам роста граней {100}.

В алмазах кубического габитуса II разновидности по Ю.Л. Орлову впервые установлены линии ФЛ 800, 820.5, 840, 860, 869 нм, которые приурочены к зонам с желтой окраской.

По результатам локальных исследований ФЛ на плоско-параллельных пластинах установлено, что в кристаллах с совместным ростом пирамид граней {100} и {111} (рисунок 7) в секторах октаэдра регистрируются линии 912, 933 нм, а в секторах куба – полоса с максимумом 926 нм. Интенсивность полос 700.3 и 787 нм в секторе куба на 3 порядка сильнее, чем в секторе октаэдра (Рисунок 9).

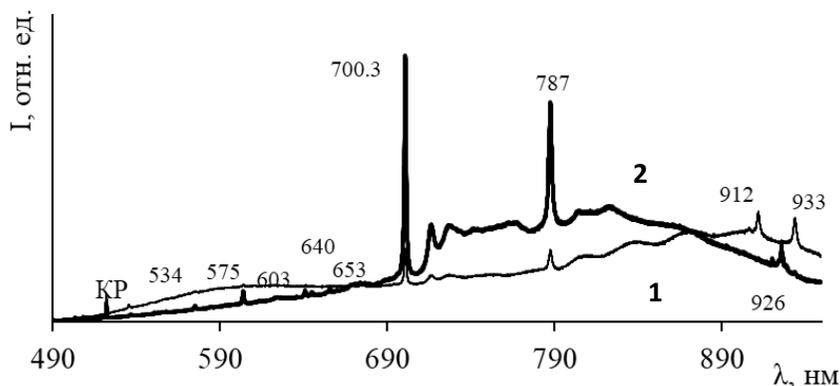


Рис. 9. Спектры ФЛ группы кристаллов №3 (кристалл 123-76) при возбуждении 488 нм ( $T = -196^{\circ}\text{C}$ ): (1) – сектор октаэдра, (2) – сектор куба.

В группе кубоидов II разновидности по Ю.Л. Орлову при возбуждении 488 нм выявлена интенсивная широкая полоса с фоновыми повторениями и максимумом около 700 нм, центр 635.1 нм и центр 636.8 нм (рис. 10, а). При возбуждении 785 нм выявлены интенсивные линии 800, 820.5, 823, 840, 843, 847, 860, 869, 884, 890, 912 нм (рисунок 10, б). Как установлено в данной работе, локализуются эти системы в центральных зонах с желтой ФЛ, во внешних бесцветных зонах они отсутствуют (рисунок 5, б).

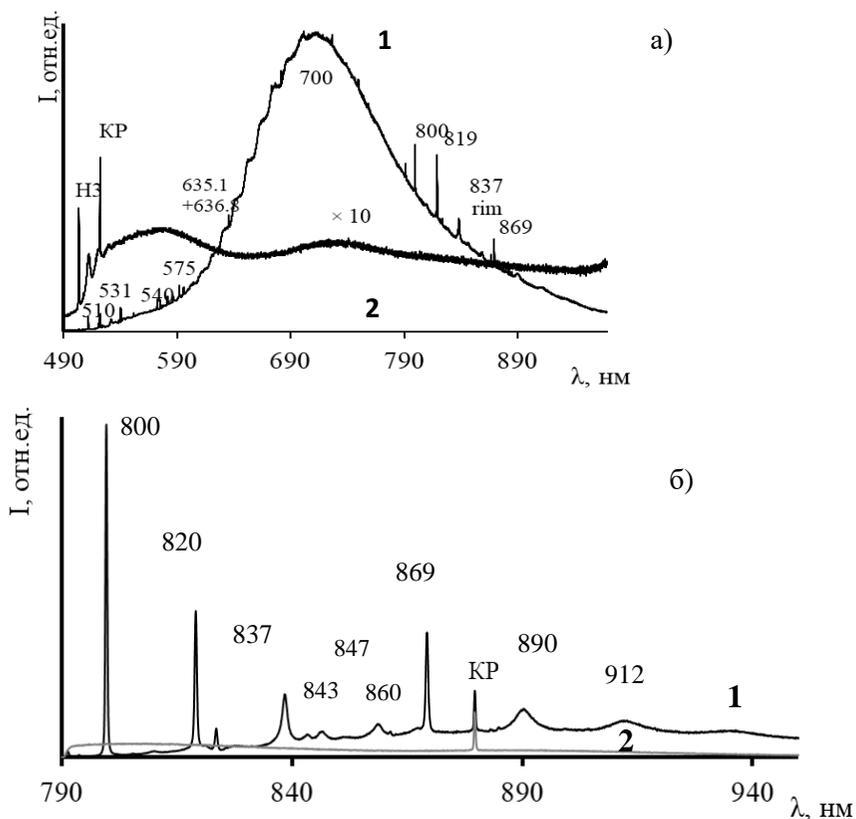


Рис. 10. Спектры ФЛ группы кристаллов №1 (кристалл 126-76: 1- кубическая зона, 2- октаэдрическая зона): а) возбуждение 488 нм; б) возбуждение 785 нм.

Таким образом, при выполнении работы впервые исследована ФЛ алмазов западного Приуралья в диапазоне 800-1050 нм, в том числе распределение особенностей по зонам и секторам роста в кристаллах разных типов. Природа многих обнаруженных систем ФЛ на данный момент остается неизвестной и не изученной [Dishler, 2012].

## Заключение

В результате комплексного изучения кристаллов алмаза западного Приуралья установлено, что алмазы из аллювиальных россыпей имеют отличные от месторождения «Рассольнинская депрессия» типоморфные особенности:

— Группа кристаллов с четырехугольными углублениями в выборке АР составляет 12 %, в выборке РД менее 0.5%. На кристаллах алмаза АР наблюдаются выкрашивание ребер, серповидные трещины, матировка, леденцовая скульптура, для кристаллов РД эти признаки не характерны;

— Кристаллы РД имеют унимодальное распределение по  $N_{\text{tot}}$  с максимумом при 725 ppm, в выборке АР наблюдается бимодальное распределение с максимумами  $N_{\text{tot}}$  при 150 и 600 ppm.

— В выборке РД в 3 и 4 раза чаще, чем в выборке АР встречаются полосы ФЛ 787 и 933 нм соответственно, в 5 раз чаще встречается широкая полоса с максимумом около 900 нм, но в 2 раза реже встречается центр NV (575 нм).

Полученные результаты свидетельствуют о единственности коренного источника алмазов в месторождении «Рассольнинская депрессия». Характер распределения азотных дефектов в алмазах «Рассольнинской депрессии» аналогичен распределению в уникальных по алмазоносности месторождениях Якутской алмазоносной провинции [Костровицкий и др. 2015]. Алмазы из современных аллювиальных россыпей Красновишерского района обладают гораздо более широким диапазоном структурно-минералогических особенностей, что свидетельствует о множественности их коренных источников.

Впервые проведенное детальное изучение внутреннего строения и особенностей дефектно-примесного состава алмазов западного Приуралья на плоско-параллельных пластинах позволило получить следующие результаты:

— Четырехугольные углубления на поверхности кристаллов алмаза возникают в результате регенерационного роста слоёв {111} в кристаллах с пирамидами роста граней {100} и являются индикатором сложного внутреннего строения. Длительный этап формирования кристаллов с пирамидами роста граней {100} и образование ступеней {111} на завершающем этапе может рассматриваться как особенность Уральских алмазов;

— В россыпях Красновишерского района выявлено 4 группы кристаллов с пирамидами роста граней {100}, ранее в них не отмеченные. Кристаллы с пирамидами роста граней {100} характерны также для различных мировых месторождений алмазов «Уральского типа»: россыпей с неустановленным типом коренного источника (Анабаро-Оленекское междуречье, Зимбабве, Сьерра-Леоне, Калимантан) и коренных месторождений (Ботсвана, Архангельская субпровинция).

— Впервые проведено изучение кристаллов алмаза РД и АР методами высокоразрешающей люминесцентной спектроскопии в диапазоне 400 – 1100 нм. В кристаллах с совместным или последовательным ростом пирамид граней {100} и {111}, полосы люминесценции 912 и 933 нм приурочены к пирамидам роста граней {111}, а полоса 926 нм – к пирамидам роста граней {100}. Интенсивная ФЛ при возбуждении 785 нм с линиями 800, 820.5, 840, 860, 869 нм есть отличительная особенность кубоидов II разновидности.

— В АР выявлены низкоазотные пластически деформированные кристаллы и темно-зеленые кристаллы IV разновидности по классификации Ю.Л. Орлова. Установлено, что сильно удлиненные додекаэдровиды являются обломками кристаллов, их конечная форма обусловлена растворением.

### **Список основных публикаций по теме диссертации:**

*Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Нефедов Ю.В., Матвеева О.П., Васильев Е.А., **Клепиков И.В.**, Анастасенко Г.Ф. Исследование кристаллов алмазов Анабаро-Оленекского междуречья методом ИК-спектроскопии и фотолюминесценции // *Естественные и технические науки. Материалы конф. «Науки о Земле на современном этапе»*. 2013. С. 16-23.
2. Васильев Е. А., **Клепиков И. В.**, Лукьянова Л. И. Сравнение кристаллов алмаза Рассольнинской депрессии и современных аллювиальных россыпей Красновишерского района // *Записки РМО*. 2018. №1. С. 55-68.  
Vasilev E.A., Klepikov I.V., L. I. Lukianova. Comparison of Diamonds from the Rassolninskaya Depression and Modern Alluvial

Placers of the Krasnovishersky District (Ural Region)// Geology of Ore Deposits. 2019. Vol. 61. №. 7. Pp. 598–605.

3. Васильев Е. А., **Клепиков И. В.**, Антонов А.В. Округлые кристаллы алмаза со смешанным механизмом роста из россыпей Красновишерского района (Приуралье)// Записки РМО. 2018. №4. С. 114-126.

4. **Клепиков И. В.**, Васильев Е. А., Антонов А.В. Особенности дефектно-примесного состава кристаллов алмаза с пирамидами роста <100> из россыпей Красновишерского района// Записки РМО. 2019. №5. С. 59-73.

5. Васильев Е.А., **Клепиков И.В.**, Козлов А.В., Антонов А.В. Природа удлиненной формы кристаллов алмаза из россыпей Урала// Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 492-496.

6. **Клепиков И. В.**, Васильев Е. А., Антонов А.В. О ростовой природе отрицательных форм рельефа на кристаллах алмаза из россыпей Урала. Кристаллография. 2020. Том 65. №2. С.304–310.

*Статьи в рецензируемых журналах из базы данных SCOPUS:*

7. **Klepikov I.V.**, Koliadin A.V., Vasilev E.A. Analysis of type IIb synthetic diamond using FTIR spectrometry// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 286. 012035.

8. Nefedov Y.V., **Klepikov I.V.** Occurrence regularities of nitrogen defects in the Ural type crystal diamonds from different regions// Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769. Pp. 201-206.

*Тезисы докладов на конференциях и совещаниях:*

9. **Клепиков И.В.**, Нефедов Ю.В., Анастасенко Г.Ф. Исследование алмазов из аллювиальных отложений северо-востока сибирской платформы методом инфракрасной спектроскопии// Сб. конф. «К 80-летию Геологического факультета СПбГУ: Геология в различных сферах». 2013. СПб. С. 47-48.

10. **Klepikov I.V.**, Nefedov Y.V., Vasilev E.A. «Analysis of the defective and impurity centers in structure of diamonds from alluvial deposits of the north east of the Siberian platform by IR spectroscopy, EPR and PL». Extended abstracts «International gemological congress», 2014. Madrid. P.31-37.

11. **Клепиков И.В.**, Анастасенко Г.Ф., Нефедов Ю.В., Васильев Е.А., Матвеева О.П., Антонов А.В, Сухаржевский С.М. Кристалломорфология и спектроскопические характеристики

- алмазов Анабаро-Оленекского междуречья// Сб. конф. «Новые идеи в науках о Земле». 2015. Москва. С.280-281.
12. Васильев Е. А., **Клепиков И. В.**, Лукьянова Л. И. Характеристики алмаза из источников Красновишерского района// Сб. конф. «200 лет РМО». 2017. С. 60-61.
  13. **Клепиков И. В.**, Васильев Е. А., Лукьянова Л. И., Антонов А.В. Особенности внутреннего строения кристаллов алмаза Рассольнинской депрессии и россыпей Красновишерского района// Сб. конф. «200 лет РМО». 2017. С. 238-240.
  14. Васильев Е. А., **Клепиков И. В.**, Лукьянова Л. И. Алмазы Рассольнинской депрессии и современных аллювиальных россыпей Красновишерского района// Материалы конф., посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ – НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). 2018. Мирный.
  15. **Клепиков И.В.**, Васильев Е.А., Антонов А.В., Лукьянова Л.И. Кубические кристаллы алмаза из россыпей Красновишерского района// Сб. конф. «Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского». 2019. Вып. 22. Пермь. С. 3-10.
  16. Васильев Е. А., Миронов В.П., **Клепиков И. В.** Люминесценция природного алмаза в ближнем ИК диапазоне// Сб. конф., посвященной 50-летию первой школы по люминесценции. 2019. Иркутск. С. 20-21.
  17. **Клепиков И.В.**, Васильев Е.А., Лукьянова Л.И., Анастасенко Г.Ф. Научное значение коллекций алмазов минералогических музеев СПбГУ и ВСЕГЕИ// Сб. конф. «Минералогические музеи – 2019. Минералогия вчера, сегодня, завтра». 2019. СПбГУ. С. 33-34.
  18. Васильев Е.А., Кудрявцев А.А., Петровский В.А., **Клепиков И.В.** Структурные особенности кристаллов алмаза в природной оболочке// Сб. конф. «Геммология». 2019. Томск. С. 49-53.