

*На правах рукописи*

**Рябов Евгений Валерьевич**

**ПРОЦЕССЫ КОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ И  
РАССЕЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В КРИСТАЛЛАХ ПРИРОДНОГО АЛМАЗА**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**ИРКУТСК - 2010**

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте прикладной физики  
ГОУ ВПО «Иркутский Государственный Университет».

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук, доцент  
Мухачёв Юрий Сергеевич

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор  
Барышников Валентин Иванович  
(ГОУ ВПО ИрГУПС, г. Иркутск)

кандидат физико-математических наук  
Клюев Юрий Алексеевич  
(ВНИИ «Алмаз», г. Москва)

**Ведущая организация:** Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Защита состоится «23» июня в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при Иркутском государственном университете по адресу: 664003, г.Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета.

Автореферат разослан «19» мая 2010г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



Б.В. Мангазеев

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Физические свойства природных алмазов являются основой для создания систем идентификации кристаллов природного алмаза. Разработка новых и совершенствование существующих методов обнаружения природных алмазов неразрывно связаны с экспериментальными и теоретическими исследованиями их свойств. Основным физическим методом, применяемым в настоящее время в системах обнаружения природных алмазов, является рентгенолюминесцентный, обладающий, наряду со многими преимуществами, двумя принципиальными недостатками: во-первых, часть алмазов имеет низкий уровень свечения, во-вторых, некоторая часть сопутствующих минералов обладает рентгенолюминесценцией, сравнимой со средним уровнем свечения алмазов. Поиск альтернативных методов, основанных на иных физических явлениях, показал возможность обнаружения алмазов в автоматическом режиме двумя новыми способами: 1) *трибоэлектromетрическим* методом контроля алмазосодержащих руд, основанным на эффекте накопления избыточного трибоэлектрического заряда кристаллами в процессе контактной электризации; 2) *рентгенорадиометрическим*, основанным на регистрации рассеянного рентгеновского излучения. Указанный факт делает *актуальным* экспериментальное и теоретическое исследование процессов контактной электризации и рассеяния рентгеновского излучения в кристаллах природного алмаза и минералах сопутствующей породы, направленное на физическое обоснование и повышение технологических показателей трибоэлектromетрического и рентгенорадиометрического методов обнаружения природных алмазов.

**Состояние вопроса.** Физическое обоснование трибоэлектromетрического метода обнаружения развито слабо. Недостаточно изучены механизмы создания трибоэлектрического заряда, нет исследований величины трибоэлектрического заряда, накапливаемой кристаллами алмазов при контактной электризации на поверхности металлического вибрационного лотка при различных внешних воздействиях. Кроме того, существующие методы неразрушающего измерения трибозаряда кристалла имеют значительную погрешность, обусловленную слабой проработкой вопросов аппаратного обеспечения эксперимента.

Физическое обоснование рентгенорадиометрического метода обнаружения природных алмазов, основанного на анализе процессов поглощения и рассеяния рентгеновского излучения кристаллом, развито для простых, одноканальных схем регистрации излучения. При этом основное внимание уделено только амплитудным характеристикам процессов взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Вопрос использования углового распределения интенсивности рассеянного на частице излучения для формирования признаков разделения в системах обнаружения природных алмазов на момент начала выполнения диссертационной работы не проработан.

**Цель работы и задачи исследования.** *Целью диссертационной работы* является экспериментальное и теоретическое исследование процессов контактной электризации и рассеяния рентгеновского излучения в кристаллах природного алмаза и минералах сопутствующей породы, направленное на физическое обоснование и повышение технологических показателей трибоэлектromетриче-

ского и рентгенорадиометрического методов обнаружения природных алмазов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методы исследования процессов контактной электризации и взаимодействия с рентгеновским излучением природных алмазов и минералов сопутствующей породы.

2. Исследовать процесс контактной электризации природного алмаза и установить влияние внешних факторов на величину накапливаемого трибоэлектрического заряда.

3. Разработать физическую модель процесса контактной электризации кристалла алмаза.

4. Исследовать возможность использования характеристик углового распределения интенсивности рентгеновского излучения, рассеянного на кристаллах алмаза и минералах сопутствующей породы, для формирования признаков разделения в рентгенорадиометрическом методе обнаружения природных алмазов.

5. На основании исследований процессов контактной электризации и рассеяния рентгеновского излучения в кристаллах природного алмаза разработать основные принципы повышения технологических показателей систем обнаружения.

**Методы исследования.** Для достижения цели диссертационной работы использованы методы математического моделирования, методы теории термостимулированного тока (ТСТ), численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных (метод зарядовой плотности), методы анализа радиотехнических цепей и сигналов, экспериментальные исследования алмазов и сопутствующих минералов.

**Объект исследований.** Кристаллы природных алмазов и сопутствующих минералов.

**Область исследований включает:**

- разработку экспериментальных методов исследования физических свойств природных алмазов;

- теоретическое и экспериментальное изучение физической природы трибоэлектрических эффектов в природных алмазах;

- теоретическое и экспериментальное изучение взаимодействия рентгеновского излучения с природными алмазами и сопутствующими минералами;

- технические и технологические применения физических свойств природных алмазов.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Определены энергетические уровни в запрещенной зоне алмаза, принимающие участие в формировании трибоэлектрического заряда алмаза в процессе контактной электризации.

2. Предложена физическая модель формирования трибоэлектрического заряда в кристаллах природного алмаза в процессе контактной электризации при движении по металлической поверхности вибрационного лотка.

3. Обнаружена фоточувствительность процесса контактной электризации и определено влияние внешнего электрического поля на величину накапливаемого электрического заряда.

4. Показана возможность селективного выделения кристаллов природного алмаза из смеси сопутствующих минералов на основе анализа углового распределения интенсивности рассеянного рентгеновского излучения.

5. Разработаны алгоритмы обнаружения кристаллов природного алмаза на основе регистрации трибоэлектрического заряда и рассеянного рентгеновского излучения.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Разработано аппаратное и методологическое обеспечение экспериментальных исследований процесса контактной электризации кристалла алмаза.

2. Установлено, что величина трибоэлектрического заряда и характеристики углового распределения интенсивности рассеянного рентгеновского излучения могут использоваться в качестве признаков распознавания в системах обнаружения природных алмазов.

3. Теоретические и экспериментальные исследования использованы для повышения эффективности трибоэлектрометрического и рентгенорадиометрического методов обнаружения природных алмазов.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы при реализации научного направления «Новые физические методы диагностики и извлечения алмазов» и выполнении 2 госбюджетных тем и 11 хозяйственных договоров в лаборатории физики алмазов НИИПФ ГОУ ВПО «ИГУ». Полученные результаты использованы при разработке экспериментальных образцов трибоэлектрометрического (в количестве 7 экземпляров) и рентгенорадиометрического (в количестве 5 экземпляров) сепараторов в рамках выполнения НИР со структурными подразделениями АК «Алроса», а также с ОАО «Алмазы Анабара», с ОАО «Геологоразведка» и с ОАО «ИрГИРЕДМЕТ».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях:

1. Международная конференция X-ray and Neutron Capillary Optic 2 (Москва, 2004).

2. Международная конференция VUVS 2005 (вакуумная ультрафиолетовая спектроскопия и взаимодействие излучения с конденсированными средами. Иркутск, 2005).

3. Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Современные методы переработки минерального сырья».

4. Научно-практическая конференция, посвященной 50-летию алмазодобывающей промышленности и г. Мирного (Мирный, 2005).

5. V международный симпозиум по трибофатике (Иркутск, 2005).

6. Международная конференция Conference on X-Ray Analysis (Улан-Батор, 2006).

7. X Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики» (Москва- Сочи, 2007).

8. XI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики» (Москва- Сочи, 2008).

**Публикации.** Результаты работы представлены в 16 научных публикациях. Получено 2 патента РФ, 2 положительных решения о выдаче патента РФ и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и пяти приложений. Основная часть работы изложена на 164 страницах, содержит 60 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 112 библиографических наименований.

**На защиту выносятся:**

1. Особенность зависимости ТСТ алмаза после предварительной контактной электризации, заключающаяся в наличии *пиков ТСТ* с температурой максимума в интервале 408 К – 428 К и энергией активации 0.95-2.17 эВ, экспериментально обнаруженных у всех исследованных кристаллов и *пиков ТСТ* с температурой максимума в интервале 452 К – 495 К и энергией активации 1.90-2.14 эВ, экспериментально обнаруженных только у ряда исследованных кристаллов, *связана* с термическим опустошением заполненных в процессе контактной электризации уровней захвата заряда, что приводит к изменению неравновесной дырочной проводимости кристалла алмаза.

2. Положительный трибоэлектрический заряд алмаза формируется вследствие туннельных переходов электронов с поверхностных уровней алмаза в зону проводимости металла с последующим переходом неравновесных дырок на энергетические уровни с энергией активации, лежащей в пределах 0.95-2.17 эВ. Общий положительный заряд, формируемый в приповерхностной области кристалла, смещает энергетическую структуру поверхности алмаза вниз до выравнивания уровней Ферми поверхности кристалла и металла.

3. Отличие углового распределения энергии рассеянного рентгеновского излучения с энергией квантов  $20 \text{ кэВ} \leq \varepsilon \leq 30 \text{ кэВ}$  на кристалле алмаза (вещество с низким атомным номером  $Z$ ) и минерале кальцита ( $\text{CaCO}_3$  – вещество со средним атомным номером) с размерами от 2 до 8 мм состоит в степени асимметрии диаграмм направленности рассеянного излучения, что обосновывает возможность селективного выделения кристаллов природного алмаза из смеси минералов на основе анализа характеристик углового распределения энергии рассеянного рентгеновского излучения.

### **Краткое содержание диссертации**

В **первой главе** приведен литературный обзор по электрофизическим свойствам природных алмазов, показана степень исследования процессов контактной электризации кристаллов алмаза, проведен анализ существующих данных по рассеянию рентгеновского излучения на алмазе.

В главе показана актуальность физического обоснования трибоэлектromетрического и рентгенорадиометрического методов обнаружения природных алмазов, поставлена цель работы и сформулированы задачи диссертации.

**Вторая глава** посвящена аппаратному и методологическому обеспечению экспериментальных исследований.

Разработана следующая аппаратура для экспериментальных исследований:

1. Стенд для измерения трибоэлектрического заряда кристаллов.

2. Установка для исследования электрических и люминесцентных свойств кристаллов.

3. Измерительная установка для регистрации рассеянного рентгеновского излучения с двухдетекторной рентгенооптической схемой (РОС).

В главе оценена погрешность проводимых измерений и рассмотрены методы обработки экспериментальных данных.

В **третьей главе** рассмотрен процесс контактной электризации кристаллов природного алмаза.

Анализ результатов измерения величины трибоэлектрических зарядов кристаллов алмаза, накапливаемых в процессе контактной электризации на металлической (алюминиевой) поверхности вибрационного лотка, позволяет установить:

1. Все кристаллы природного алмаза из исследованной коллекции приобретают положительный заряд в процессе контактной электризации на поверхности алюминиевого вибрационного лотка.

2. При прочих равных условиях среднее значение накапливаемого трибоэлектрического заряда возрастает при увеличении амплитуды колебаний электризующей поверхности (вибрационного лотка), причем относительное изменение накапливаемого заряда приблизительно пропорционально относительному изменению амплитуды колебаний с коэффициентом  $(0.2 \div 1)$ .

3. Повторяемость результатов для каждого кристалла, оцененная как отношение доверительного интервала значений (при доверительной вероятности 95%) к среднему значению трибоэлектрического заряда, находится в пределах 8.5 - 27%.

4. Предположительно, существует связь между морфологическими особенностями поверхности и формы кристалла и величиной накапливаемого трибоэлектрического заряда. Наибольшие значения трибозаряда соответствуют кристаллам октаэдров (А7 - 153.3 пКл, А31 - 123 пКл,) и ромбододекаэдров (А41 – 171 пКл, Ур5 – 210 пКл, Ур11 – 200.9 пКл, Ур12 – 234 пКл).

Исследована зависимость величины трибоэлектрического заряда от размера и массы кристалла. С этой целью коллекция алмазов была разделена на 6 групп по размеру (в качестве признака деления использовался максимальный размер кристалла) и на 6 групп по массе. Средние значения трибоэлектрических зарядов для каждой группы приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

Зависимость трибоэлектрического заряда от размера и массы кристалла

Зависимость от размера кристалла		Зависимость от массы кристалла	
Интервал размеров, мм	Среднее значение трибозаряда, пКл	Интервал масс, карат	Среднее значение трибозаряда, пКл
1-2	45.0	0.151-0.25	72
2-3	81.6	0.251-0.35	107.3
3-4	63.1	0.351-0.50	90
4-5	110.4	0.501-0.70	82
5-6	88	0.701-0.90	102
6-7	119.8	0.901-1.10	113

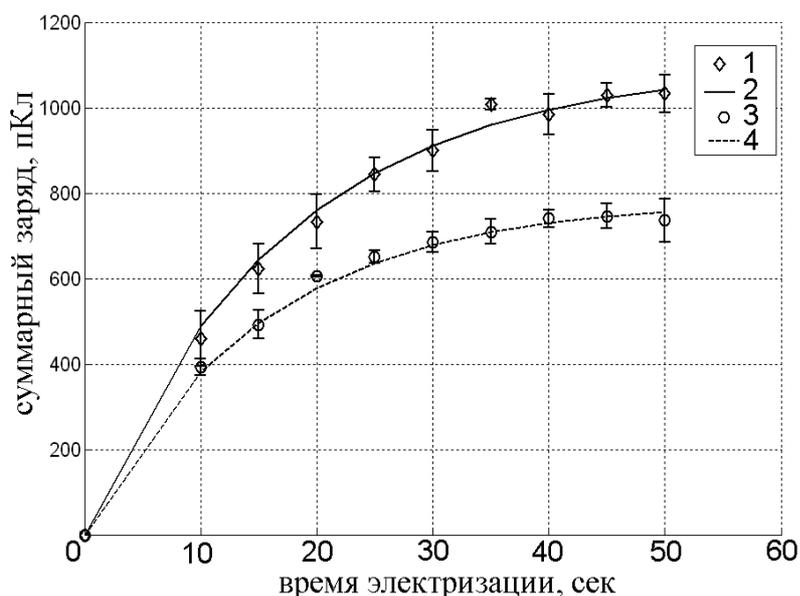
Приведенные в таблице данные были аппроксимированы функциями вида

$q(r) = ar^{s_r}$  и  $q(m) = bm^{s_m}$ . Методом наименьших квадратов определены значения  $a, b, s_r, s_m$ , соответствующие минимальной среднеквадратичной ошибке аппроксимации. В итоге получено:  $q(r) \sim r^{0.79}$  и  $q(m) \sim m^{0.37}$ . Таким образом, величина трибоэлектрического заряда кристалла алмаза увеличивается не быстрее, чем линейные размеры кристалла. Этот факт позволяет предположить, что процесс контактной электризации кристалла алмазов связан с запасанием заряда в приповерхностном слое, расположенном вблизи линейных структур поверхности, которые наиболее логично связать с ребрами кристалла.

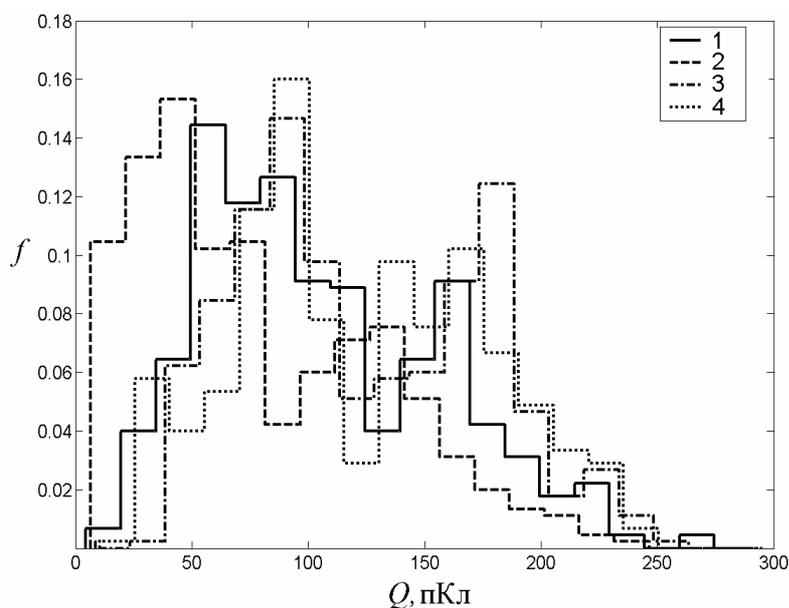
Исследована кинетика накопления трибоэлектрического заряда кристаллами алмаза при электризации на алюминиевом лотке при различных внешних воздействиях (рис. 1). С этой целью измерялся суммарный электрический заряд 10 кристаллов, выбранных по критерию наилучшей повторяемости результата. Экспериментальные зависимости суммарной величины трибоэлектрических зарядов кристаллов от времени электризации (рис. 1 кривые 1, 3) имеют характер насыщающегося процесса. Формально полученные зависимости были аппроксимированы экспоненциальным процессом  $Q = Q_{нас} e^{-t/\tau}$ . Методом наименьших квадратов определены значения  $Q_{нас}, \tau$ , соответствующие минимальной среднеквадратичной ошибке аппроксимации. В итоге получено:

1. Для зависимости 1:  $Q_{нас} = 1100$  пКл,  $\tau = 17.6$  с.
2. Для зависимости 2:  $Q_{нас} = 784$  пКл,  $\tau = 13.6$  с.

Исследовано влияние об-



**Рис. 1.** Кинетика накопления трибозаряда кристаллами алмаза при отсутствии внешних воздействий (1), и при облучении лампой дневного света (3). Кривые 2, 4 – аппроксимации экспериментальных данных экспонентой  $Q = Q_{нас} e^{-t/\tau}$ .



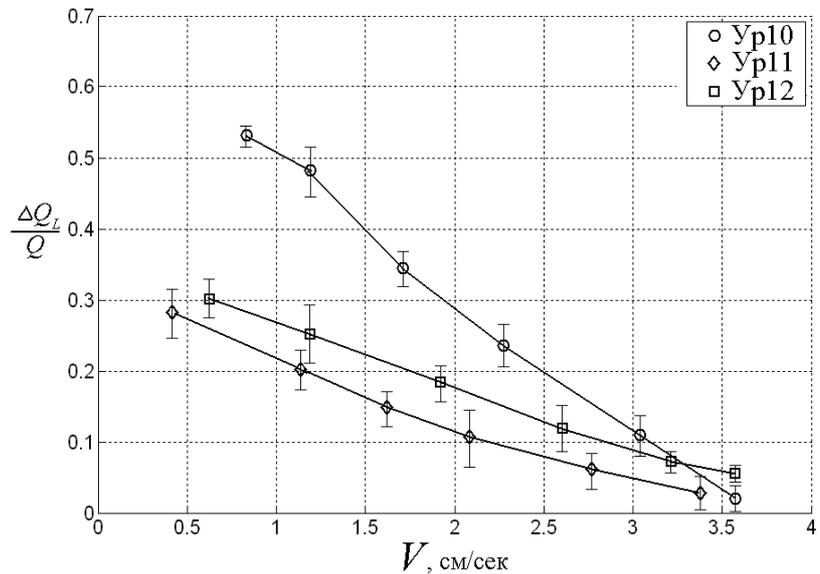
**Рис. 2.** Гистограммы распределения трибоэлектрического заряда кристаллов алмаза:  
 1- без внешних воздействий;  
 2- при облучении лампой дневного света;  
 3- во внешнем электрическом поле при отрицательном потенциале (-1500В) на внешнем электроде;  
 4- во внешнем электрическом поле и при облучении.

лучения (рис. 2) кристалла алмаза в процессе контактной электризации на величину накапливаемого трибоэлектрического заряда. Для облучения алмаза использована лампа дневного света, спектр излучения которой имел нескольких полос в интервале 400-700 нм. Установлено:

1. Облучение кристалла в процессе контактной электризации уменьшает накапливаемый трибоэлектрический заряд на величину  $\Delta Q_L / Q$  ( $Q$  - величина накапливаемого трибоэлектрического заряда без внешнего облучения) которая для исследованной коллекции находится пределах  $0.09 \leq \Delta Q_L / Q \leq 0.81$  (рис.2).

2. Величина  $\Delta Q_L / Q$  в первом приближении пропорциональна интенсивности облучения при  $\Delta Q_L / Q < 0.5$ .

3. Увеличение скорости перемещения облучаемого кристалла по вибрационному лотку в результате увеличения амплитуды колебаний электризующей поверхности приводит при прочих равных условиях к уменьшению величины  $\Delta Q_L / Q$  (рис.3).



**Рис. 3.** Зависимость  $\Delta Q_L / Q$  от скорости перемещения кристалла  $V$  по вибрационному лотку.

Исследовано влияние внешнего электрического поля (напряженностью до 1500 В/см) на процесс контактной электризации кристалла алмаза (рис. 2). Установлено, что при контактной электризации во внешнем электрическом поле в кристалле алмаза создается дополнительный заряд  $\Delta Q_E$  за счет переноса носителей в объем кристалла. Величина  $\Delta Q_E$  пропорциональна напряженности электрического поля и коррелирует с массой кристалла (коэффициент корреляции 0.81), что позволяет предположить об объемном распределении дополнительного заряда. Для части крупных кристаллов с малой темновой проводимостью ( $10^{-15} \div 10^{-16} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) было обнаружено увеличение  $\Delta Q_E$  в 1.5-2.3 раза при облучении кристалла в процессе электризации, что может быть объяснено достижением равновесного распределения заряду по объему кристалла за счет механизмов фотопроводимости.

Для определения возможных уровней накопления трибоэлектрического заряда в зонной структуре алмаза использованы методы теории термостимулированного тока (ТСТ) – измерение термостимулированной проводимости и тока термостимулированной деполяризации алмаза. Энергия активации уровней определялась методом начального подъема в тех случаях, когда на кривой ТСТ в координатах  $(\ln I, 1/T)$  выделялся линейный начальный участок:

$$E = 0.4 \cdot \frac{\Delta(\log_{10} I)}{\Delta(1000/T)} = 0.4 \cdot \frac{\Delta(\log_{10} I)}{\Delta(T_{обр})}$$

Во всех остальных случаях использовался менее точный метод температурного положения пика:

$$E = AkT .$$

Регистрация ТСТ проводилась при линейном нагреве образца ( $\beta = 0.6$  К/сек) на температурном интервале 300-700К. После нагрева образец охлаждался в естественных условиях до комнатной температуры.

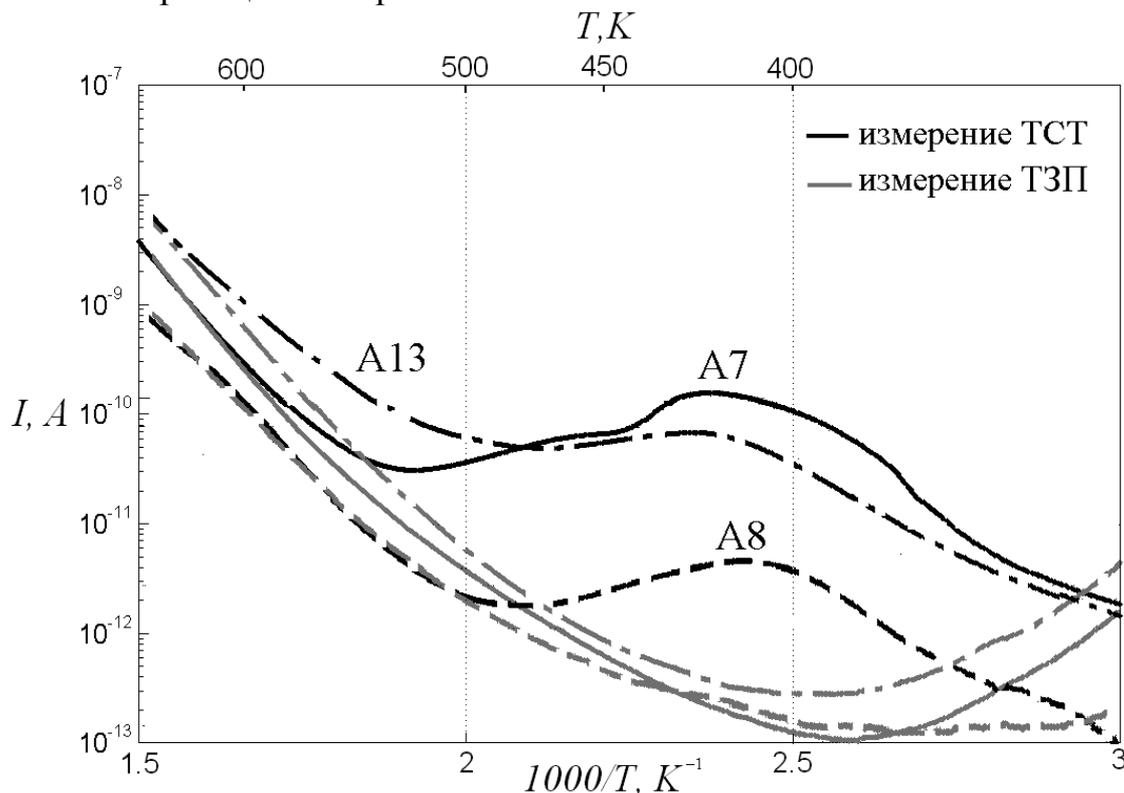
Для всех исследованных кристаллов после измерения ТСТ остаточный заряд кристалла не превышал 10% от первоначального.

Для предварительно заряженного в процессе контактной электризации кристалла алмаза кривые ТСТ (рис. 4, табл. 2) имеют пики, которые условно можно разделить на две группы:

1. Пики ТСТ с температурой максимума в интервале 408 - 428 К и энергией активации 0.95-2.17 эВ. Соответствующие им уровни проявляются у всех исследованных кристаллов.

2. Пики ТСТ с температурой максимума в интервале 452 – 495 К и энергией активации 1.90-2.14 эВ. Соответствующие им уровни проявляются только у ряда исследованных кристаллов (например, А7 (рис.4)).

При втором измерении кривые ТЗП имеют следующий характер: на участке  $T \leq 400$ К наблюдается спадающая при нагреве «повышенная» проводимость кристалла; на участке  $400\text{К} \leq T \leq 500\text{К}$  структура кривых ТЗП не имеет пиков; на участке  $T > 600$ К кривые линейно зависят от обратной температуры с энергией активации 3.1-3.4 эВ и совпадают с кривыми ТСТ для первого после контактной электризации измерения.



**Рис. 4.** Зависимость термостимулированного тока через кристаллы алмазов А7, А8, А13 от обратной температуры.

- 1 - ТСТ после процесса трибозарядки кристалла (первое измерение);
- 2 - ТЗП для предварительно отожженного кристалла (второе измерение).

Анализ результатов измерения ТСТ и ТЗП позволяет утверждать, что в процессе контактной электризации кристалла алмаза происходит заполнение носителями заряда уровней, имеющих энергию активации для различных кристаллов в пределах 0.95 -2.17 эВ. Сопоставление приведенных в таблице 2 значений с литературными данными позволяет предположить, что указанные уровни связаны с дислокационными состояниями в кристалле.

**Таблица 2**

Энергия активации уровней накопления трибоэлектрического заряда в алмазе

Кристалл	Структура пика	$T_{\max}, K(1000/T_{\max}, K^{-1})$	$E, \text{эВ}$
A3	Элементарный пик	425 (2.35)	1.1
A6	Элементарный пик	424 (235)	1.71
A7	Составной пик	1) 421 (2.37); 2) 455 (2.20)	1) 0.95; 2) 1.94
A8	Элементарный пик	411 (2.43)	1.67
A13	Элементарный пик	425 (2.35)	1.33
A15	Составной пик	1) 429 (2.33); 2) 452 (2.21)	1) 1.56; 2) 1.90
A16	Элементарный пик	416 (2.40)	1.71
A17	Составной пик	1) 408 (2.45); 2) 487 (2.05)	1) 1.66; 2) 2.10
A18	Составной пик	1) 421 (2.37); 2) 495 (2.02)	1) 2.17; 2) 2.14
A19	Элементарный пик	425 (2.35)	1.60

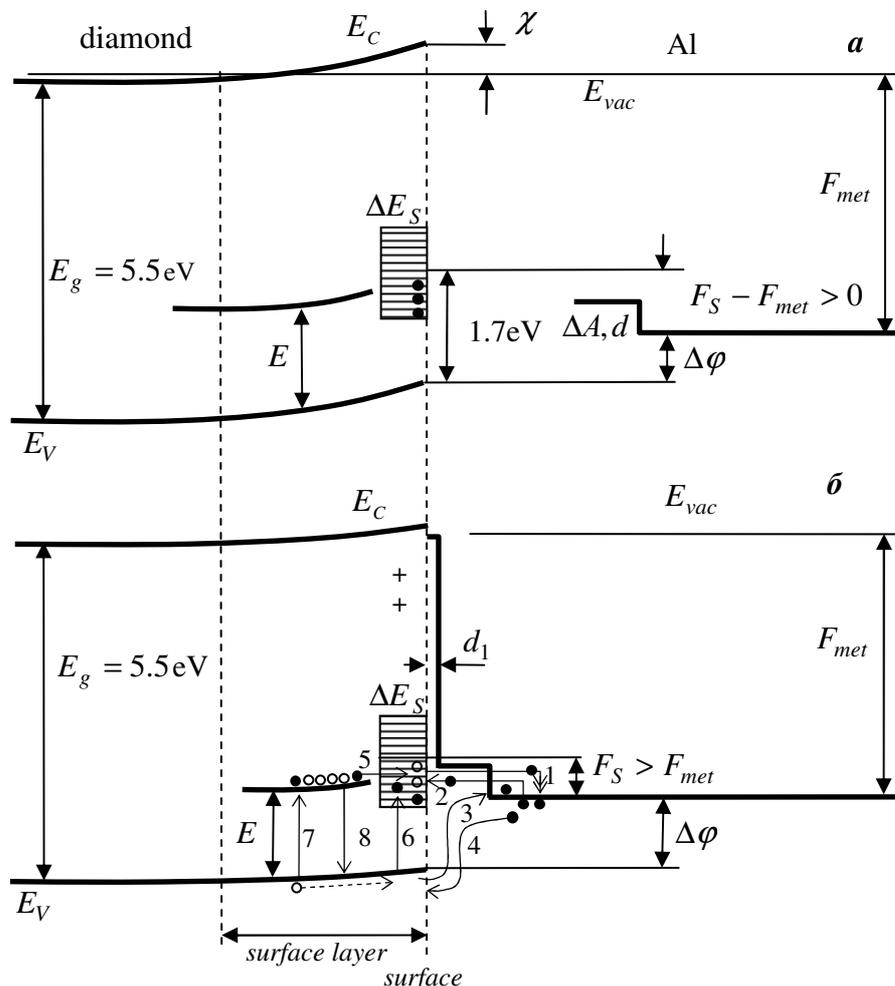
В диссертационной работе предложена следующая зонная модель процесса контактной электризации. Согласно существующим литературным данным полагаем, что структура энергетических состояний поверхности алмаза до контакта с металлом определяется наличием частично заполненных электронами поверхностных состояний, образующих зону шириной  $\Delta E_s$  (рис. 5, а). Уровень Ферми зоны поверхностных состояний кристалла алмаза лежит примерно посередине зоны поверхностных состояний и находится на 1.7 эВ выше потолка валентной зоны. Электронное сродство  $\chi$  для нереконструированной поверхности алмаза отрицательно. Считаем, что в приповерхностном слое кристалла существует уровень захвата дырок с энергией активации  $E$ , связанный с дислокационными состояниями. Контакт кристалла алмаза с металлом рассмотрен в предположении, что между поверхностью алмаза и поверхностью металла су-

существует воздушный зазор толщиной  $d_1$ . На энергетической диаграмме существование указанного зазора соответствует прямоугольному потенциальному барьеру высотой  $|F_{Al_2O_3}|$  и шириной  $d_1$  (рис. 5, б).

**Рис. 5.** Модель процесса контактной электризации кристалла алмаза.

а) энергетические состояния поверхности алмаза до контакта с металлом;

б) энергетические состояния поверхности алмаза при контакте с металлом.



При возникновении контакта, заполнение уровней накопления трибоэлектрического заряда возможно в результате следующих процессов:

1. Обмен носителями заряда между зоной поверхностных состояний и зоной проводимости металла (переходы 1 и 2) (рис. 5, б). На образованные в зоне поверхностных состояний в результате перехода 1 дырки осуществляется переход 5 электронов с уровня накопления трибозаряда  $E$ . Указанный переход может осуществляться либо за счет туннельного эффекта, когда уровень накопления находится близко от поверхности кристалла, либо за счет переноса заряда вдоль дислокаций, выходящих на поверхность кристалла и образующих дислокационные трубки.

2. Обмен носителями заряда между валентной зоной алмаза и зоной проводимости металла (переходы 3 и 4) (рис.5, б). Вероятность перехода 3 уменьшается с увеличением энергетического зазора  $\Delta\phi$ , что позволяет связать данный процесс с начальной стадией контакта, когда общий положительный заряд, накопленный в приповерхностной области кристалла мал. Наиболее вероятным является переход 4 электронов из зоны проводимости металла на свободные состояния в валентной зоне проводимости алмаза, приводящий к разрядке кристалла. Указанные состояния могут образовываться при переходе 7 электронов из ва-

лентной зоны на уровне накопления трибоэлектрического заряда в результате термической генерации или генерации за счет внешних источников с последующим переносом носителей заряда по валентной зоне в приконтактную область (рис. 5, б). Повторные захваты дырок на уровне в запрещенной зоне, в том числе и на уровне накопления трибоэлектрического заряда (переход 8) будут уменьшать скорость обмена носителями заряда между валентной зоной алмаза и зоной проводимости металла.

В процессе обмена носителями заряда в приповерхностной области алмаза формируется положительный электрический заряд, который смещает энергетическую структуру поверхности алмаза вниз до выравнивания уровней Ферми поверхности алмаза  $F_s$  и металла  $F_{met}$ . В установившемся равновесном состоянии вероятность зарядки кристалла в точке контакта с металлом прекращается.

При отсутствии контакта поверхности кристалла с проводящей поверхностью уменьшение концентрации дырок на уровне накопления трибоэлектрического заряда за счет перехода электронов из валентной зоны будет компенсироваться повторными захватами дырок на уровне в запрещенной зоне алмаза.

В дополнение к зонной модели контактной электризации предложена модель накопления и релаксации трибоэлектрического заряда. В данной модели предполагается, что трибоэлектрический заряд накапливается на линейных структурах поверхности кристалла, имеющих общую длину  $L = \sum_{i=1}^N \Delta l_i$ , где  $\Delta l_i$  -

равные по длине малые элементы поверхности кристалла, вероятность электризации которых одинакова и равна  $\Delta l_i / L$ . Для упрощения считалось, что линейная плотность приобретаемого трибоэлектрического заряда в момент разрыва контакта одинакова и равна  $\rho$ , а время полной зарядки элемента поверхности  $\Delta l_i$  намного меньше длительности контакта. Пусть в отсутствии контакта заряд участка поверхности  $\Delta l_i$  изменяется как  $\Delta l_i \rho \cdot f(t - t_i) \approx \Delta l_i \rho \cdot (1 - \alpha(t - t_i))$ , где  $t_i$  - момент контактной электризации участка поверхности (в случае повторного контакта участка поверхности под  $t_i$  понимаем момент времени, соответствующий повторному контакту),  $t$  - текущий момент времени. Тогда кинетика накопления трибоэлектрического заряда  $Q(t)$  определяется уравнением:

$$\Delta Q = \frac{\Delta t}{T(1 - \alpha T)} \{L\rho(1 - \alpha T) - Q\},$$

где  $T$  - время полной зарядки всех элементов поверхности кристалла.

Решением для  $Q(t)$  при  $\Delta t \rightarrow 0$  является:

$$Q(t) = L\rho(1 - \alpha T) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T(1 - \alpha T)}\right) \right].$$

Физическая модель контактной электризации, объединяющая зонную модель и модель накопления и релаксации трибоэлектрического заряда, хорошо согласуется с экспериментальными результатами диссертации в части исследования кинетики накопления трибоэлектрического заряда, ТСТ, а также зависимости процесса контактной электризации от облучения кристалла и скорости перемещения кристалла по электризующей поверхности.

В четвертой главе приводятся исследования процессов рассеяния рентгеновского излучения на кристалле алмаза и минералах сопутствующей породы. Для экспериментального измерения интенсивности рассеяния излучения на кристаллах алмаза и сопутствующей породы была выполнена измерительная установка, рентгенооптическая схема которой приведена на рис. 6. В рассматриваемой системе на выходах блоков обработки сигналов 4.1 и 4.2 формируются сигналы  $U_1(t) = s_1(t) + f_1(t) + n_1(t)$  и  $U_2(t) = s_2(t) + f_2(t) + n_2(t)$ , содержащие сигнал от полезного минерала  $s_{1,2}(t)$ , фоновый сигнал от пустой породы  $f_{1,2}(t)$  и шум канала обнаружения  $n_{1,2}(t)$ .

Методом корреляционного анализа установлена статистическая независимость процессов  $n_1(t)$  и  $n_2(t)$ .

Экспериментально обнаружено существование временного сдвига импульсов фонового сигнала  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  в двух каналах измерения, среднее значение которого возрастает с увеличением углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (рис. 6) и размеров частиц и лежит в пределах 0.7-3 мс. При этом импульсы сигнала от кристаллов алмаза имеют временной сдвиг, не превышающий 0.4 мс. Более корректно указанная особенность сигналов была обоснована анализом характеристик

$\{K = \sqrt{\max K_{12}(\tau)}, \tau_{\max}\}$  корреляционной функции  $K_{12}(\tau) = \int_0^{\infty} U_1(t)U_2(t+\tau)dt$  ( $\tau_{\max}$  -

сдвиг абсциссы максимума корреляционной функции относительно 0).

Для сопутствующей породы (преимущественно минералы кальцитов и доломитов) значения  $\tau_{\max}$  лежат левее

$\tau_{\max} = -0.9$  (сигнал нижнего детектора опережает сигнал верхнего) (рис.7). Кри-

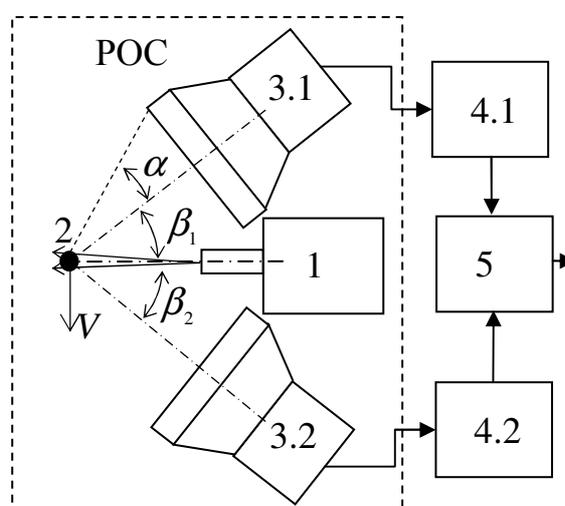


Рис.6. Измерительная установка.

1-источник рентгеновского излучения; 2- минерал; 3.1, 3.2- сцинтилляционные блоки детектирования; 4.1, 4.2 – блоки обработки сигнала; 5-интерфейсный блок.

Рис. 7. Распределение характеристик  $\{K = \sqrt{\max K_{12}(\tau)}, \tau_{\max}\}$

1 – для сигнала от пустой породы;

2 –для шума системы измерения;

3 - для сигнала от алмаза.

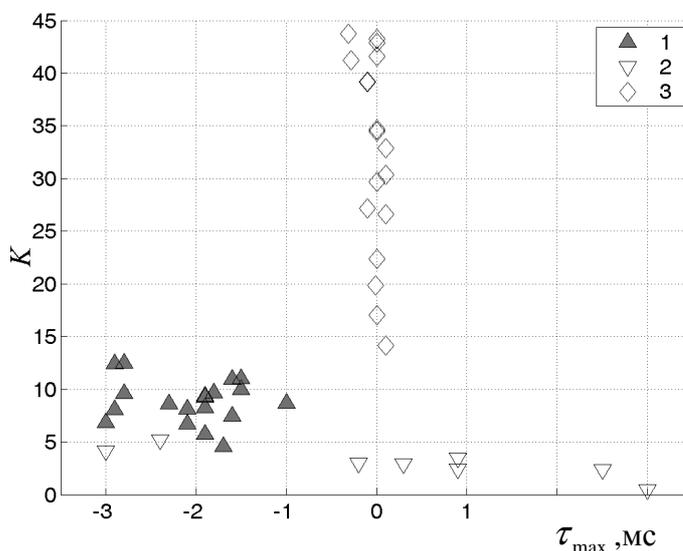
Параметры РОС:

- напряжение на аноде рентгеновской трубки 30 кэВ;

-  $\beta_1 = -\beta_2 = \beta = \pi/4$ ,  $2\alpha = \pi/6$

- высота коллимированного пучка первичного излучения – 2мм.

Размер частиц: 2÷7 мм.



сталлам алмазов с размерами до 3 мм соответствуют значения сдвига  $|\tau_{\max}| < 0.2$  мс и  $K < 30$  отн. ед. Для крупных кристаллов (3 - 6 мм)  $\tau_{\max}$  сдвигаются в область отрицательных значений ( $\tau_{\max} < -0.4$  мс), а величина  $30 \leq K \leq 50$  отн. ед.

Для обоснования установленных закономерностей была разработана модель для расчета углового распределения интенсивности рассеянного излучения. Рассмотрим процесс рассеяния плоскопараллельного пучка рентгеновского излучения с энергией квантов  $\varepsilon$  на частице (рис. 8). Первичный пучок излучения считается узким с высотой  $h$ , намного меньшей размеров частицы. Ширина пучка  $D$  превышает размер  $d$  облучаемой частицы в плоскости, перпендикулярной плоскости  $xOy$  (рис. 8). В приближении однократного рассеяния первичного излучения в объеме частицы с параметрически заданной формой поперечного сечения  $S = \{x(i), y(i)\}$ , энергия излучения рассеянного на угол  $\theta = \pi - \varphi$  в элемент телесного угла  $d\Omega$  в слое вещества  $(X; X + dx)$  будет определяться выражением:

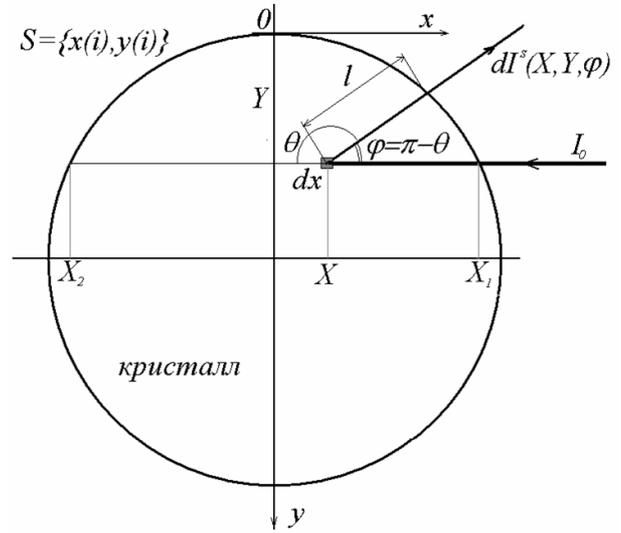


Рис. 8. Модель для расчета рассеяния рентгеновского излучения.

$$dE_{\varepsilon}^s(X, Y, \theta) = h d I_0 d\Omega \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \rho \exp(-\mu(X_1 - X)) \cdot \exp(-\mu^s l) dx, \quad (1)$$

где  $\mu, \mu^s$  - линейные коэффициенты ослабления пучка первичного излучения и пучка рассеянного излучения веществом частицы с удельной плотностью  $\rho$ ,  $\frac{d\sigma(\Omega)}{d\Omega}$  - дифференциальный массовый коэффициент рассеяния, равный сумме когерентной и некогерентной составляющих.  $I_0$  - интенсивность первичного пучка рентгеновского излучения,  $(X_1, Y)$  - координата входа первичного пучка излучения в частицу (рис. 8).

Общая энергия рассеянного излучения в объеме вещества  $(X_1 - X_2) \cdot h d$  при численном расчете определялась как:

$$\begin{aligned} E_{\varepsilon}^s(Y, \theta) &= \sum_{X_1 \geq X_k \geq X_2} \Delta E_{\varepsilon}^s(X_k, Y, \theta) = \\ &= \sum_{X_1 \geq X_k \geq X_2} h d I_0 d\Omega \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \rho \exp(-\mu(X_1 - X_k)) \cdot \exp(-\mu^s l_k) \Delta x \end{aligned} \quad (2)$$

Далее, изменяя с шагом  $\Delta Y = h$  ординату  $Y$  входа первичного пучка излучения в кристалл, вычислялась матрица  $E_{\varepsilon}^s$ , в которой элемент  $E_{\varepsilon}^s(i, j)$  соответствует энергии рассеянного на угол  $\theta_j = j \cdot \Delta\theta$  излучения при прохождении первичного пучка излучения в частице вдоль линии  $Y_i = i \cdot \Delta Y = \text{const}$  (рис. 8).

$$E_{\varepsilon}^s(i, j) = E_{\varepsilon}^s(Y_i = i \cdot \Delta Y, \theta_j = j \cdot \Delta \theta) = \sum_{X_1 \geq X_k \geq X_2} \Delta E_{\varepsilon}^s(X_k, Y_i, \theta_j). \quad (3)$$

При непрерывном спектре рентгеновского излучения матрица может быть вычислена как:

$$E^s(i, j) = \int_0^{\varepsilon_{\max}} E_{\varepsilon}^s(i, j) f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (4)$$

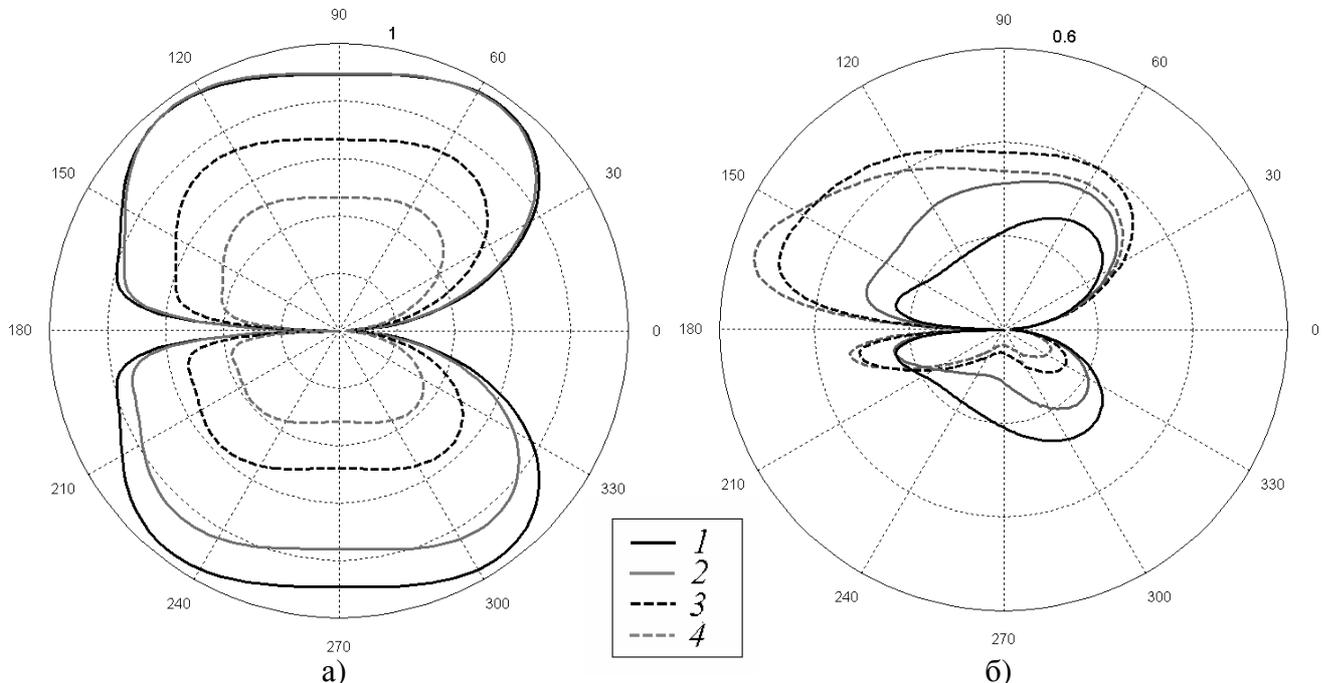
где  $f(\varepsilon)$  - функция плотности распределения энергии рассеянного излучения по длинам волн, совпадающая со спектральной характеристикой первичного излучения, если пренебречь изменением энергии некогерентно рассеянного излучения.

Энергия рассеянного излучения, регистрируемая детектором, который характеризуется углом направления детектора  $\beta$ , и углом облучения детектора  $2\alpha$  (рис. 8) определялось как:

$$E_{\text{det}}^s(i) = E_{\text{det}}^s(Y = i \cdot \Delta Y) = \sum_{\beta + \alpha \geq j \Delta \varphi \geq \beta - \alpha} E^s(i, j).$$

При высоте луча  $H = nh$  энергия рассеянного излучения, регистрируемая детектором, будет определяться как:  $E_{\text{det}H}^s(Y) = \sum_{k=1}^n E_{\text{det}}^s(Y + k \cdot h)$ ,  $n = H/h$ .

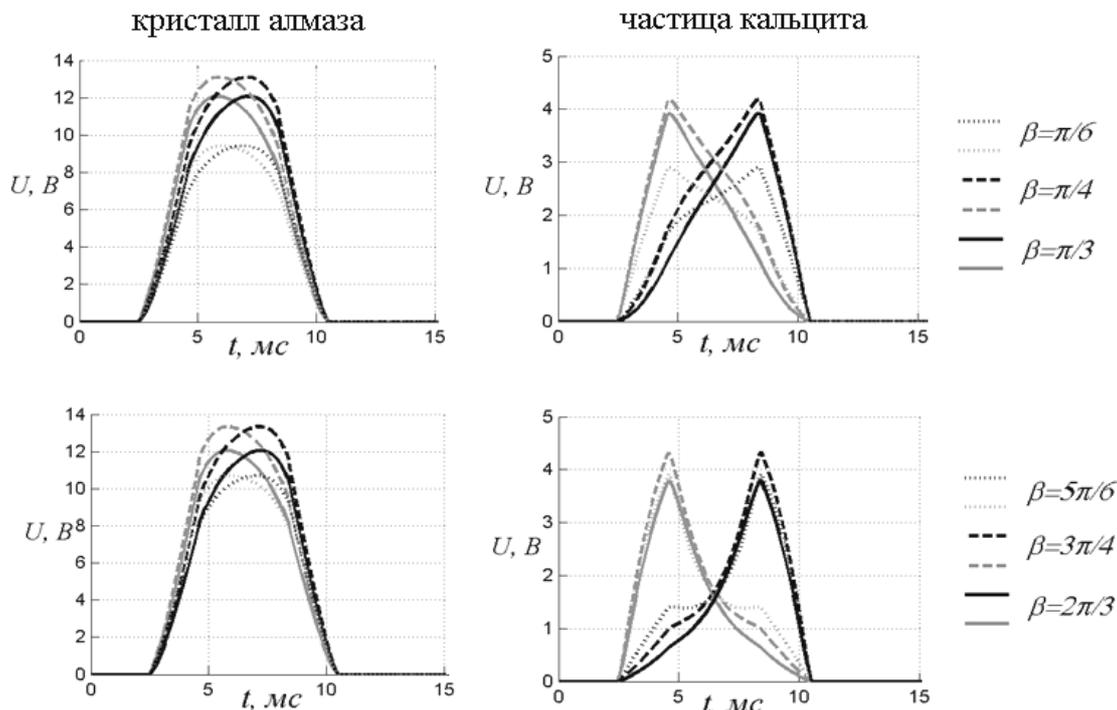
В работе проведен сравнительный анализ углового распределения энергии рассеянного излучения для ряда форм кристаллов алмаза и кальцита при различной энергии квантов первичного излучения  $\varepsilon$ . Размеры частиц варьировались в пределах от 2 мм до 8 мм. Установлено, что при  $20 \text{кэВ} \leq \varepsilon \leq 30 \text{кэВ}$  основным отличием является значительная асимметрия углового распределения энергии рассеянного излучения на частице кальцита относительно направления распространения первичного пучка излучения (рис. 9).



**Рис. 9.** Угловое распределение энергии рассеянного на алмазе (а) и кальците  $\text{CaCO}_3$  (б) рентгеновского излучения с энергией квантов  $\varepsilon = 30 \text{кэВ}$ . Угол, указанный на графиках соответствует величине  $\varphi = \pi - \theta$ , где  $\theta$  – угол рассеяния. Поперечное сечение частицы – круг, диаметром  $2r = 5 \text{мм}$ . Линии соответствуют следующим ординатам  $Y$  входа пучка в частицу: 1 -  $Y = r$ ; 2 -  $Y = 0.6r$ ; 3 -  $Y = 0.2r$ ; 4-  $Y = 0.08r$ .

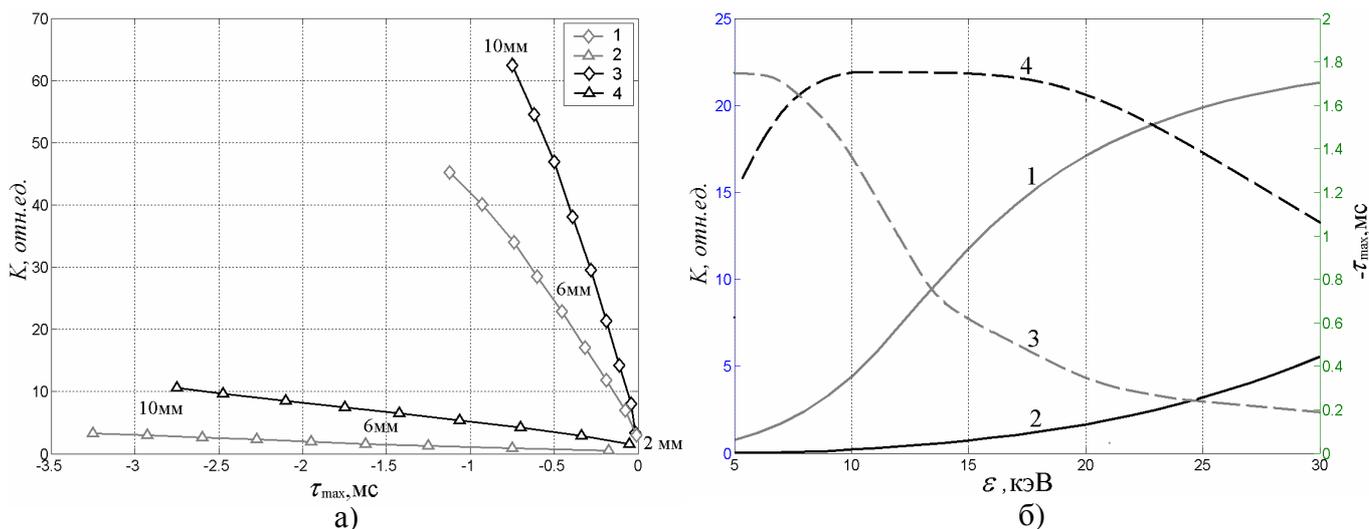
Кроме того, наблюдается сильная зависимость распределения от формы части-

цы кальцита. При энергии квантов  $\varepsilon \leq 20$  кэВ рассеяние на кальците происходит преимущественно в область геометрической видимости облучаемого участка.



**Рис. 10.** Энергия рассеянного рентгеновского излучения, регистрируемая детекторами в двухдетекторной РОС. Энергии квантов первичного пучка  $\varepsilon = 30$  кэВ. Линия серого цвета – сигнал детектора 2. Линия черного цвета – сигнал детектора 1. Углы направления детекторов  $\beta_1 = -\beta_2 = \beta$ . Сечение частицы – круг диаметром 6 мм. Скорость движения 1 м/с.

Расчет зависимости энергии рассеянного рентгеновского излучения от времени, регистрируемого в двухдетекторной РОС при свободном движении облучаемой частицы вдоль оси  $Ox$ , обосновывает возможность разделения сигналов от кристаллов алмаза и кальцита по величине временного сдвига между импульсами сигналов детекторов (рис. 10).



**Рис. 11.** Зависимости совокупности характеристик сигналов  $\{K = \sqrt{\max K_{12}(\tau)}, \tau_{\max}\}$  от а - размеров частиц: 1, 2 – алмаз и  $\text{CaCO}_3$  при  $\varepsilon = 20$  кэВ; 3, 4 - алмаз и  $\text{CaCO}_3$  при  $\varepsilon = 30$  кэВ. б - жесткости первичного излучения (для круглого сечения частицы диаметром 5 мм): 1, 2- зависимости  $K(\varepsilon)$  для алмаза и  $\text{CaCO}_3$  соответственно; 3, 4 - зависимости  $\tau_{\max}(\varepsilon)$  для алмаза и  $\text{CaCO}_3$  соответственно. Высота коллимированного пучка РИ 2мм, угол направления детекторов  $\beta_1 = -\beta_2 = \pi/4$ , угол облучения детекторов  $2\alpha = \pi/6$ .

Распределение характеристик сигналов  $\{K = \sqrt{\max K_{12}(\tau)}, \tau_{\max}\}$ , рассчитанных при изменении диаметра частицы в пределах 2÷10 мм (рис.11, а) хорошо согласуется с экспериментально полученными результатами (рис. 7). Анализ спектральной зависимости амплитудно-временной совокупности признаков разделения сигналов (рис. 11, б) указывает на существование оптимальной жесткости первичного излучения для наилучшего разделения частиц определенного класса крупности. При использовании в качестве критерия величины  $(K_{алмаз} / K_{CaCO_3}) \cdot (\tau_{\max}^{CaCO_3} / \tau_{\max}^{алмаз})$  оптимальное значение энергии квантов первичного излучения составляет 18÷20 кэВ (для размера частицы 5 мм). Таким образом, проведенные в работе исследования обосновывают принципиальную возможность селективного обнаружения алмазов на основе амплитудно-временной совокупности признаков разделения сигналов, формируемых при рассеянии рентгеновского излучения в двухдетекторной РОС.

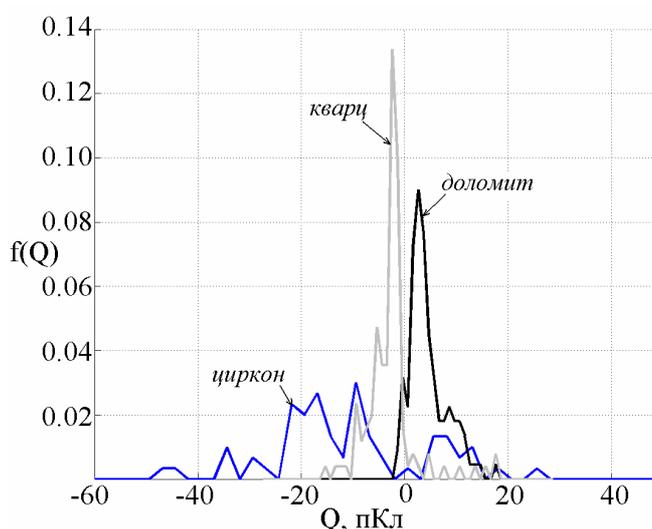
В пятой главе рассмотрены принципы построения и функционирования систем обнаружения природных алмазов в трибоэлектрометрическом и рентгенорадиометрическом методах сепарации руд.

Сопоставление распределений трибозарядов алмаза (рис. 2, гистограмма 1) и сопутствующих минералов (рис. 12) указывает на возможность использования в качестве признака разделения в системах обнаружения природных алмазов величины трибозаряда минерала.

Для технической реализации трибоэлектрометрического метода обнаружения природных алмазов произведена оптимизация датчика трибоэлектрического заряда, разработано аппаратное обеспечение тракта регистрации и систем автоматики.

В разработанной системе обнаружения рентгенорадиометрического сепаратора (РРС) алмазов использована система обнаружения с двухдетекторной РОС и регистрацией рассеянного излучения с облучаемой стороны (регистрация в обратном направлении, угол направления детекторов  $\beta_1 = -\beta_2 = \beta = \pi/4$ ). Установлено, что наиболее эффективными являются следующие алгоритмы принятия решения на основе амплитудно-временной совокупности признаков разделения сигналов.

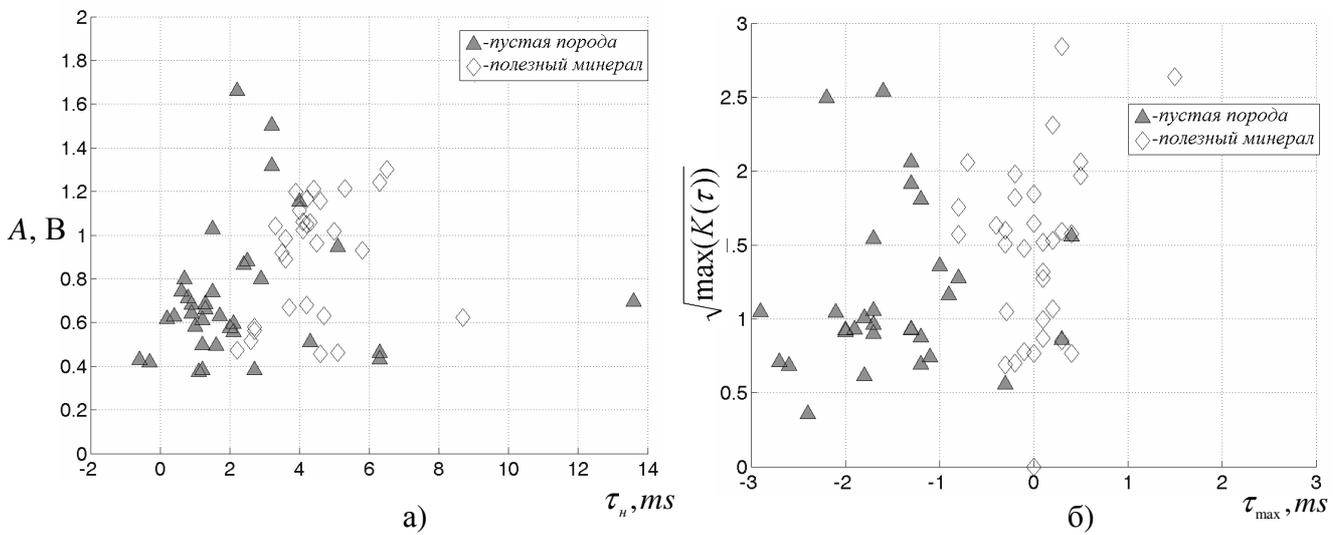
1. Сравнение с порогом каждого из сигналов  $U_1(t), U_2(t)$  отдельно, формирование логического сигнала, соответствующего наложению импульсов, и временное разделение указанных логических сигналов. Используемая совокупность признаков разделения  $\{A_1, A_2, \tau_n\}$ , где  $A_1, A_2$ -амплитуды сигналов  $U_1(t), U_2(t)$ , а  $\tau_n$ -длительность наложения импульсов на уровне порога разделе-



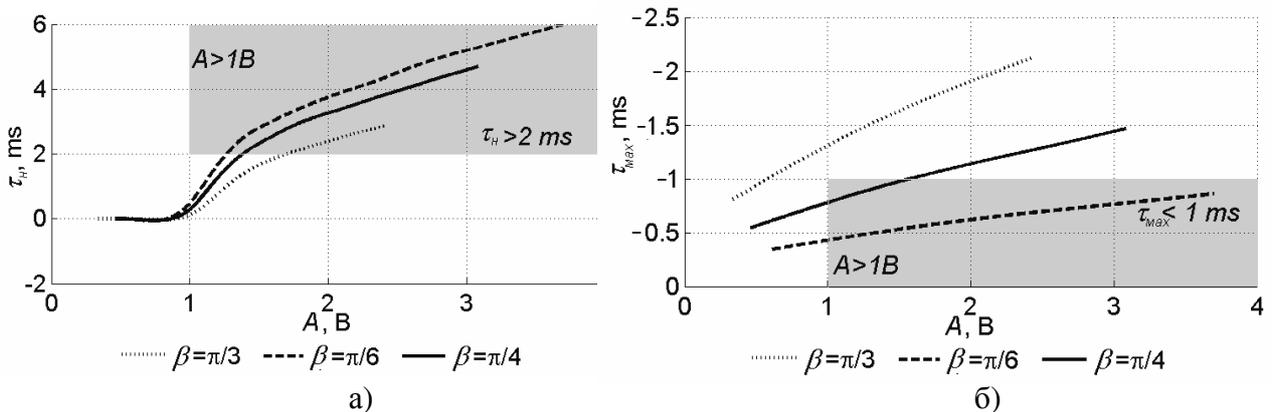
**Рис. 12.** Плотность распределения величины трибозарядов минералов сопутствующей породы.

ния.

2. Сравнение с порогом каждого из сигналов  $U_1(t), U_2(t)$ , формирование сигнала «превышение порога» по схеме «И» или «ИЛИ», вычисление корреляционной свертки сигналов вида  $K_{12}(\tau) = \int_{T_1}^{T_2} U_1(t)U_2(t+\tau)dt$  и принятие решения на основе совокупности признаков разделения  $\{A_1, A_2, \tau_{\max}\}$  или  $\{K = \sqrt{\max K_{12}(\tau)}, \tau_{\max}\}$ , где  $T_1$  - момент формирования сигнала «превышение порога»,  $T_2 = T_1 + \Delta T$ ,  $\tau_{\max}$  - сдвиг максимума  $K_{12}(\tau)$  относительно  $\tau = 0$ . Для сравнительного анализа алгоритмов 1 и 2 использована разработанная в главе 4 математическая модель формирования сигнала в двухдетекторной рентгенооптической схеме и применено моделирование процесса принятия решения для экспериментально измеренных сигналов в тракте регистрации РРС (рис. 13, 14).



**Рис.13.** Экспериментально измеренное распределение признаков разделения сигналов для алгоритмов принятия решения 1 (а) и 2 (б) при  $\beta_1 = \beta_2 = \pi/4$  (класс крупности руды +2-6 мм, напряжение на аноде РТ 30 кВ).



**Рис.14.** Рассчитанное распределение признаков  $\{K = \sqrt{\max K_{12}(\tau)}, \tau_{\max}\}$  разделения сигналов от  $CaCO_3$  и область обнаружения для алгоритмов принятия решения 1 (а) и 2 (б) для энергии квантов  $\mathcal{E} = 20 \text{кэВ}$ .

В результате установлено:

1. Алгоритмы 1 и 2 позволяют увеличить чувствительность и селективность автоматической системы обнаружения алмазов с двухдетекторной рент-

генооптической схемой по сравнению с алгоритмами принятия решения в системе обнаружения с одним детектором.

2. Алгоритмы 1 и 2 обеспечивают достаточную помехоустойчивость системы обнаружения к некоррелированным по каналам измерения импульсам шума.

3. Совокупность признаков разделения  $\{A_1, A_2, \tau_n\}$  для сигналов от пустой породы в алгоритме 1 входит в область обнаружения алмазов  $\{A_1 \geq p, A_2 \geq p, \tau_n \geq \tau_n^p\}$  при увеличении амплитуды сигналов  $A_1, A_2$ , что приводит к снижению селективности процесса сепарации при увеличении крупности материала (рис.14, а).

4. Совокупность признаков разделения  $\{A_1, A_2, \tau_{\max}\}$  или  $\{K = \sqrt{\max K_{12}(\tau)}, \tau_{\max}\}$  для сигналов от пустой породы в алгоритме 2 удаляется от области обнаружения алмазов  $\{A_1 \geq p, A_2 \geq p, \tau_{\max} \leq \tau_{\max}^p\}$  при увеличении амплитуды сигналов  $A_1, A_2$ , что обуславливает эффективное разделение сигналов со значительными амплитудами (рис.14, б).

5. Эффективность разделения сигналов по временному признаку в алгоритмах 1 и 2 возрастает при увеличении углов направления детекторов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (рис. 14).

6. При следовании сигналов от алмаза и сопутствующего минерала со сравнимыми амплитудами через интервал времени, превышающий среднюю длительность импульса полезного сигнала (примерно 8-10 мс), исключается искажение временного признака разделения сигналов  $\tau_{\max}$ .

В **заключении** представлены основные результаты работы, вытекающие из совокупности выполненных исследований, и сформулированы возможные направления дальнейших исследований.

## Основные результаты

1. Разработаны математическая модель и способы расчета датчиков для метода бесконтактного (индукционного) измерения электрических зарядов твердых частиц диэлектрика.

2. Экспериментально установлено, что в процессе контактной электризации кристалла алмаза на поверхности алюминиевого вибрлотка происходит накопление избыточного положительного заряда. При прочих равных условиях среднее значение накапливаемого трибоэлектрического заряда возрастает при увеличении амплитуды колебаний электризующей поверхности (вибрационного лотка), причем относительное изменение накапливаемого заряда приблизительно пропорционально относительному изменению амплитуды колебаний с коэффициентом (0.2÷1).

3. Установлено, что при облучении в процессе электризации кристалла алмаза светом в спектральном интервале 400-700 нм наблюдается эффект уменьшения накапливаемого трибоэлектрического заряда, относительное значение которого снижается при увеличении амплитуды колебаний электризующей поверхности.

4. Установлено, что при контактной электризации во внешнем электрическом поле в кристалле алмаза создается дополнительный объемный заряд  $\Delta Q_E$ . Для части крупных кристаллов с малой темновой проводимостью ( $10^{-15} \div 10^{-16} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ )  $\Delta Q_E$  возрастает в 1.5-2.3 раза при облучении кристалла ( $400 < \lambda < 700$  нм) в процессе электризации, что может быть объяснено достижением равновесного распределения заряду по объему кристалла за счет механизмов фотопроводимости.

5. Методом ТСТ установлено, что в процессе накопления трибоэлектрического заряда кристаллами алмаза участвуют центры захвата дырок экспериментально проявляющиеся на кривой ТСТ в виде пиков, которые условно можно разделить на две группы:

- Пики ТСТ с температурой максимума в интервале 408 – 428 К и энергией активации 1.1-2.17 эВ. Соответствующие им уровни проявляются у всех исследованных кристаллов.

- Пики ТСТ с температурой максимума в интервале 452 – 495 К и энергией активации 1.90-2.14 эВ. Соответствующие им уровни проявляются только у ряда исследованных кристаллов.

6. Предложена зонная модель формирования трибоэлектрического заряда в кристаллах природного алмаза в процессе контактной электризации при движении по металлической поверхности вибрационного лотка, согласно которой положительный трибоэлектрический заряд алмаза формируется вследствие туннельных переходов электронов с поверхностных уровней алмаза в зону проводимости металла с последующим переходом неравновесных дырок на энергетические уровни с энергией активации, лежащей в пределах 0.95-2.17 эВ. Общий положительный заряд, формируемый в приповерхностной области кристалла, смещает энергетическую структуру поверхности алмаза вниз до выравнивания уровней Ферми поверхности кристалла и металла.

7. Предложена модель накопления и релаксации трибоэлектрического заряда.

8. Разработан алгоритм численного расчета углового распределения интенсивности рассеянного на частице минерала рентгеновского излучения.

9. Установлено, что при энергии квантов первичного излучения  $20 \text{ кэВ} \leq \varepsilon \leq 30 \text{ кэВ}$  наблюдается значительная асимметрия углового распределения интенсивности рассеянного излучения на частице кальцита относительно направления распространения первичного пучка излучения.

10. Экспериментально установлена и теоретически обоснована возможность селективного выделения кристаллов природного алмаза из смеси сопутствующих минералов на основе анализа углового распределения интенсивности рассеянного рентгеновского излучения.

11. Разработана система обнаружения трибоэлектрометрического сепаратора, использующая в качестве признака разделения сигналов величину трибоэлектрического заряда минерала, накопленного в процессе контактной электризации на металлической поверхности вибрационного лотка.

12. Экспериментально установлена и теоретически обоснована эффективность использования следующих совокупностей признаков разделения сигнала

лов в системе обнаружения РРС с двухдетекторной рентгенооптической схемой:

-  $\{A_1, A_2, \tau_n\}$ , где  $A_1, A_2$  - амплитуды сигналов на выходах блоков обработки сигналов,  $\tau_n$  - длительность наложения импульсов на уровне порога амплитудного разделения;

-  $\{A_1, A_2, \tau_{\max}\}$ , где  $\tau_{\max}$  - сдвиг максимума корреляционной функции сигналов относительно 0.

### Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. **Рябов Е. В.** Мухачёв Ю.С. Контактная электризация кристаллов природного алмаза // Письма в ЖТФ, 2010. Т. 36, № 4. С. 32-40.

2. **Ryabov E.V.**, Mukhachev U.S., Mironenko S.N., Sinitsky V.V., Borzenko S.U., Sadovskaya O.V. Complex registration method of dim light flows for thermoluminescent dozimetry // Изв. Вузов. Физика, 2006. № 4. С.140-145.

3. **Ryabov E.V.**, Mukhachev U.S., Mironenko S.N., Sinitsky V.V., Borzenko S.U., Sadovskaya O.V. Mathematical analysis of the results of registration complex method of dim light flows for thermoluminescent dozimetry in the field of matlab 6.5 programming // Изв. Вузов. Физика, 2006. № 4. С.145-151.

4. **Рябов Е.В.**, Китов Б.И., Мухачев Ю.С. Автоматизация рентгеноабсорбционного процесса доводки концентратов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2007. №1 (13). С.127-131.

5. Мухачёв Ю.С., Б.И. Китов Б.И., Борзенко С.Ю., **Рябов Е.В.** Создание теоретических основ нефело- и электрических методов диагностики природных алмазов //Отчет о НИР. № ГР 01200307082, Инв. № 02200801588. Иркутск, 2007. 120 с.

6. Kitov B.I., Mukhachyov Y.S., **Ryabov E.V.**, Shlufman E.M., Borzenko S.Y. Using small section X-ray radiation in roentgen - radiometric separation of ores // Proceedings of SPIE, 2005. V.5943. P.127-131.

7. **Рябов Е.В.**, Мухачев Ю.С., Китов Б.И. Способ сепарации алмазосодержащих руд и устройство для его осуществления Патент РФ № 2366519 // Бюл.изобр., 2009. № 25.

8. Мухачев Ю.С., **Рябов Е.В.**, Борзенко С.Ю. Способ сепарации алмазосодержащих руд и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2353439// Бюл.изобр., 2009. № 12.

9. Мухачев Ю.С., Рябов Е.В., Борзенко С.Ю. Программа цифровой обработки сигнала в масштабе реального времени, предназначенная для выделения постоянной и импульсной составляющих сигнала. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009610813 от 6.02.2009.

10. Мухачев Ю.С., Китов Б.И., **Рябов Е.В.** Способ сепарации алмазосодержащих руд и устройство для его осуществления. Решение о выдаче патента РФ от 19.03.2010. Заявка на изобретение 2009103793/12 от 04.02.2009.

11. Мухачев Ю.С., **Рябов Е.В.**, Борзенко С.Ю. Способ сепарации алмазосодержащих руд и устройство для его осуществления: Решение о выдаче патента РФ от 02.04.2010. Заявка на изобретение 2009118102/28 от 12.05.2009.

12. **Рябов Е.В.** Экспериментальная установка для исследования электриче-

ских и люминесцентных свойств кристаллов // Вестник Иркутского университета. Специальный выпуск: Материалы научно-теоретической конференции молодых ученых, посвященной 85-летию ИГУ. – 2003, Иркутск - С. 176.

13. Кулебякин Н.М., Кононко Р.В., Мухачев Ю.С., Китов Б.И., Борзенко С.Ю., **Рябов Е.В.** Электрометрический сепаратор для доводки алмазосодержащих концентратов// Обогащение руд: Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Современные методы переработки минерального сырья». – 2004, Иркутск. С. 19-25.

14. **Рябов Е.В.**, Мухачев Ю.С., Китов Б.И., Борзенко С.Ю. Бесконтактное измерение трибоэлектрического заряда твердых частиц// В кн.: Труды V международного симпозиума по трибофатике.- 2005, Иркутск. Т.2. С.315–320.

15. **Ryabov E.V.**, Mukhachev U.S., Mironenko S.N., Sinitsky V.V., Borzenko S.U., Sadovskaya O.V. Complex registration method of dim light flows for thermoluminescent dozimetry// In Abstracts Inter. conf. VUVS 2005 (vacuum ultraviolet spectroscopy and radiation interaction with condensed matter). – 2005, Иркутск. P.44.

16. Мухачев Ю.С., Борзенко С.Ю., **Рябов Е.В.** Электрометрические методы сепарации алмазов //В кн.: Тезисы Научно-практической конференции, посвященной 50-летию алмазодобывающей промышленности и г.Мирного – 2005, Мирный – С. 57.

17. **Ryabov E.V.**, Mukhachev U.S., Mironenko S.N., Sinitsky V.V., Borzenko S.U., Sadovskaya O.V. Mathematical analysis of the results of registration complex method of dim light flows for thermoluminescent dozimetry in the field of matlab 6.5 programming // In Abstracts Inter. conf. VUVS 2005 (vacuum ultraviolet spectroscopy and radiation interaction with condensed matter). – 2005, Иркутск. P.45.

18. B.I. Kitov, Mukhachev U.S, **Ryabov E.V.**. The use of diffusely scattered X-ray radiation for the separation of ores // Abstract of Conference on X-ray Analysis September 29-30.- 2006, Ulaanbaator. P.17.

19. Kitov B.I., Mukhachyov Yu.S., **Ryabov E.V.**, Borzenko S.Yu The Use of Small Diameter X-Ray Radiation for the X-Ray Separation of Ores//Abstract of Second International Conference on X-Ray and Neutron Capillary Optics. – 2007, Zvenigorod. P.27.

20. Мухачев Ю.С., Б.И. Китов, **Рябов Е.В.**, Борзенко С.Ю. Датчик для бесконтактного измерения электрического заряда твердых частиц диэлектрика // Научные труды X Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Доп. Сборник Кн. «Приборостроение».-2007, Москва – С. 196-202.

21. Китов Б.И, Мухачев Ю.С., **Рябов Е.В.** Двухдетекторный датчик диффузно рассеянного рентгеновского излучения// Научные труды X Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»: Доп. Сборник Кн. «Приборостроение».-2007, Москва. С. 115-120.

