

УДК 535.6, 681.78

**ВОЗМОЖНОСТИ СОРТИРОВКИ АЛМАЗНОГО СЫРЬЯ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ МЕТОДАМИ**

Е.В. Горбунова, В.В. Коротаев, А.Н. Чертов

Рассмотрены существующие проблемы в области сортировки необработанного алмазного сырья в соответствии с классификационными признаками, определяющими рыночную стоимость алмазов. Предложено подойти к процессу качественной оценки и аттестации кристаллов алмаза с использованием элементов теории цветowych измерений и моделей описания цвета многопараметрического объекта, а также закономерностей формирования и роста кристаллов.

Ключевые слова: сырье алмазное, метод оптико-электронный, сортировка по цвету, форма кристалла.

Введение

В настоящее время все ключевые предприятия отечественной промышленности, специализирующиеся в области сортировки алмазного сырья, такие как Единая сбытовая организация Акционерной Компании (АК) «АЛРОСА» («ЕСО АЛРОСА») в г. Москве, Якутское предприятие по торговле алмазами АК «АЛРОСА» (ЯПТА) в г. Якутске, предприятие «Коммерал» в г. Мирном, вынуждены пересматривать подходы к организации технологического процесса сортировки и аттестации готовой продукции и заниматься техническим перевооружением производства.

Указанное обстоятельство обусловлено новыми требованиями изменившегося за последние годы мирового алмазного рынка, необходимостью сохранения высокого качества продукции и повышения конкурентоспособности.

Среди приоритетных задач, требующих скорейшего решения:

- повышение производительности труда и эффективности производства;
- получение стабильно высокого качества сортировки, не зависящего от человеческого фактора;
- расширение товарной номенклатуры продукции.

Наиболее перспективным и в то же время наиболее сложным и наукоемким направлением развития технологии сортировки является автоматизация производственного процесса качественной сортировки алмазного сырья.

Известны следующие сортировочные комплексы, используемые или имеющие перспективы использования в отечественной алмазной промышленности.

- Установки фирмы Sortex для разделения алмазов по цвету и вибростолы с наклонной декой для сортировки по форме, стоящие на вооружении АК «АЛРОСА» [1]. Первые широко используются для сепарации различных сельскохозяйственных культур и пригодны, главным образом, для разделения материалов по критерию «черное/белое», т.е. «темнее/светлее установленной границы»; вторые не позволяют производить точную сортировку и фактически осуществляют только обогащение материала той или иной формой алмазов. И в том, и в другом случае требуется этап окончательной, ручной до-сортировки.
- Сепаратор АРЦ-10 производства конструкторско-технологического института научного приборостроения Сибирского отделения РАН для сортировки алмазов размером 1,5–6 мм по цвету [2]. Одним из основных недостатков указанного оборудования является использование заложенной в основу алгоритма его работы стандартной для видеооборудования цветовой модели RGB, которая не является объективной с точки зрения анализа цвета [3]. Как следствие, невозможны оценки малых цветовых различий, установка точных цветовых порогов и допусков при осуществлении контроля качества продукции.
- Экспериментальный образец оптического узла и программное обеспечение для аппарата сортировки алмазов по форме Института менеджмента и информационных технологий (ИМИТ, г. Череповец) [4]. Особенностью предлагаемого решения является использование 9 каналов регистрации, синхронно формирующих 9 проекций кристалла для восстановления его формы. Такой подход сильно увеличивает стоимость всей системы за счет большого количества измерительных каналов, сложности синхронизации их работы и необходимости использования высокопроизводительных вычислительных систем для обработки массива полученных изображений, а также их «сшивания» в единый объект. Кроме того, по тем же самым причинам, он не позволяет обеспечить высокую производительность сортировочного аппарата.

Из всего сказанного следует заключить, что на настоящий момент актуальная задача автоматизации процесса качественной сортировки алмазного сырья в России остается нерешенной и требует принципиально нового, отличного от уже используемых, комплексного научно-методического подхода.

Современные требования к технологическим процессам сортировки и аттестации природных необработанных алмазов

Основные классификационные признаки кристаллов алмаза и требования к процессу их сортировки регламентируются государственными стандартами [5, 6]. Согласно указанным нормативным документам, кристаллы алмаза должны быть рассортированы на 13 классов по форме, 9 классов по дефектности (качеству) и 34 – по цвету. Объединенная классификация по совокупности всех перечисленных параметров включает 29 позиций.

В частности, по цветовым параметрам, в зависимости от интенсивности и оттенка, минералы (в особенности драгоценные и полудрагоценные камни) обычно подразделяют на следующие основные группы: бесцветные, с незначительным оттенком цвета, с небольшим оттенком цвета, с оттенком цвета, цветные (с выраженным оттенком в объеме камня), цветные (с ярко выраженным оттенком в объеме камня), цветные (с густой окраской в объеме камня). При этом некоторые камни имеют «комбинированный» цвет (например, желто-коричневые, коричнево-желтые, зеленовато-желтые и т.п.).

Как видно из [5], качественные характеристики групп часто близки друг другу и выражены в субъективной форме, поясняющей принципы сортировки алмазного сырья для опытного человека-сортировщика, но не для автоматизированного комплекса. Для примера: кристаллы «с видимым желтым, зеленым, аквамаринным, серым или незначительным коричневым оттенком» («цветовая» группа 411); «с ясно видимым желтым, зеленым, лимонным, аквамаринным или серым оттенком» («цветовая» группа 412); «желтые, с желтым, зеленым, лимонным нацветом во всем объеме» («цветовая» группа 414) и т.д. То же самое касается классификации кристаллов алмаза по форме и качеству.

Таким образом, для обеспечения автоматизации технологического процесса требуется строгая формализация всех классификационных признаков – их описание для автоматизированной опико-электронной системы контроля (ОЭСК).

**Исследование возможностей параметризации кристалла алмаза для ОЭСК.
Классификация по форме**

Согласно теории кристаллографии [7], все кристаллы могут быть сгруппированы в 7 главных кристаллографических систем (сингоний). Любой кристалл может быть отнесен к одной из 7 сингоний путем простого определения элементов его внешней симметрии. С учетом того, что не все кристаллы какой-либо сингонии имеют ее полную (нормальную) симметрию, выделяют дополнительные классы в пределах каждой сингонии. Всего существует 32 класса, совокупность которых описывает внешнюю симметрию всех кристаллов. Каждый кристаллический класс, в свою очередь, описывается классом арифметическим, представляющим собой конечную группу целочисленных матриц, определяющих возможные преобразования симметрии кристалла относительно некоторого «эталонного» его положения в пространстве, принятого за «точку отсчета» [8]. Таким образом, заранее можно описать и впоследствии, в процессе анализа, определить наклон и (или) поворот кристалла относительно канала регистрации автоматической системы контроля.

Для установления принадлежности анализируемого кристалла к определенному арифметическому, а значит, и кристаллическому классу, предлагается использовать стереографические проекции, дающие возможность математического описания проекций конкретного кристаллического образца. При этом применяется метод последовательных приближений для оценки степени соответствия каждой полученной стереографической проекции анализируемого кристалла стереографическим проекциям, описывающим кристаллы идеально правильной формы.

Помимо матричного описания [7, 8] возможно описание классификационных признаков эталонных видов кристаллов посредством задания количества и пространственного взаимного положения их граней или ребер. Такие математические модели могут быть описаны в декартовой или сферической системах координат. Например, в декартовой системе координат математическая модель правильного кристалла алмаза (октаэдра) может выглядеть следующей совокупностью поверхностей, описывающих взаимное расположение граней кристалла (модель соответствует единичному кристаллу):

$$oct(x, y) = \begin{cases} 0,5 - x - y & \text{при } (x + y) < 0,5 \\ x + y - 0,5 & \text{при } (x + y) \leq 0,5 \\ -0,5 - x + y & \text{при } (x - y) > -0,5 \\ x - y + 0,5 & \text{при } (x - y) \geq -0,5 \\ -x - y - 0,5 & \text{при } (x + y) > -0,5 \\ x + y + 0,5 & \text{при } (x + y) \geq -0,5 \\ -x + y + 0,5 & \text{при } (x - y) < 0,5 \\ x - y - 0,5 & \text{при } (x - y) \leq 0,5 \end{cases}$$

Используя подобное описание и зная пространственное расположение элементов освещения объекта и примерные данные о показателе преломления исследуемых образцов кристаллов, можно построить трехмерные модели реальных кристаллов алмазов (рис. 1).

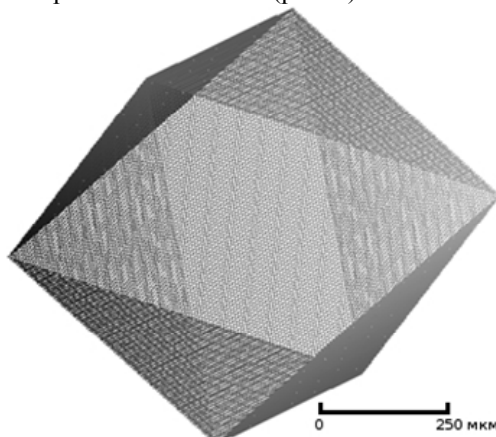


Рис. 1. Трехмерная модель кристалла алмаза в декартовой системе координат

Собственно алгоритм определения формы кристаллов в автоматическом режиме предлагается реализовывать в трех частях.

Первая часть алгоритма включает в себя следующие этапы:

- предположение о соответствии между набором характерных элементов изображения и набором характерных элементов объекта; выработка гипотезы о положении и ориентации объекта;
- восстановление сцены или формирование математической модели описания проекции объекта;
- сравнение восстановленной сцены с реальным изображением и, при достаточном сходстве, принятие гипотезы.

Вторая часть алгоритма предназначена для восстановления 3D-формы объекта или формирования его математического описания.

Третья часть алгоритма необходима для того, чтобы найти оси симметрии объекта на основании анализа его математической модели и определить степень искажения анализируемого кристалла.

Использование предложенного подхода позволит не только обеспечить необходимое значение вероятности правильной классификации, но и реализовать гибкий алгоритм настройки и обучения ОЭСК (в ручном или автоматическом режиме) при изменении требований к различаемым градациям формы алмазов.

Классификация по цвету

При разработке современных ОЭСК цветовых параметров движущихся объектов большое внимание, как правило, уделяется алгоритмической составляющей сегментации изображения и коррекции его смаза, количеству различаемых градаций цвета, однако практически не упоминается о проблемах, связанных с описанием цветовых параметров объекта регистрации для самой ОЭСК. В то же время правильное представление цвета объекта регистрации определяет динамический диапазон (количество определяемых ОЭСК цветовых параметров объекта) и точность работы системы.

Для того чтобы результаты анализа цвета не зависели от свойств поверхности, формы и положения кристаллов алмаза в пространстве относительно ОЭСК, наличия различного рода поверхностных дефектов, а также от изменения параметров освещения и расположения источников освещения, необходимо привязать цвет кристалла алмаза к его объективным параметрам. Такими параметрами для любого объекта при анализе цвета как раз и являются его форма и ориентация в пространстве, а также спектральный коэффициент отражения каждого элемента поверхности, зависящий от особенностей ее структуры и свойств самого объекта. Осуществлять привязку цветовых параметров кристалла алмаза к цветовым координатам изображений его проекций предлагается с использованием «цветового образа» [9] – комплексной характеристики объекта, определяемой совокупностью описывающих его свойства функций. При этом компоненты цветового образа являются тождественно связанными с координатами цветового пространства HLS, лишенного недостатков, присущих модели RGB –неравномерности отображения цветов и взаимозависимости отдельных координат.

После пересчета из RGB в HLS (рис. 2) выполняется выделение областей заданной (требуемой) цветности, а затем процесс сегментации изображения. После этого определяется энергетический центр приоритетной области цвета на изображении объекта исследования и вычисляются координаты ее энер-

гетического центра на матрице. Результатами вычислений являются наличие тех или иных областей цветности на изображении объекта, их размеры и координаты энергетических центров областей на матрице.

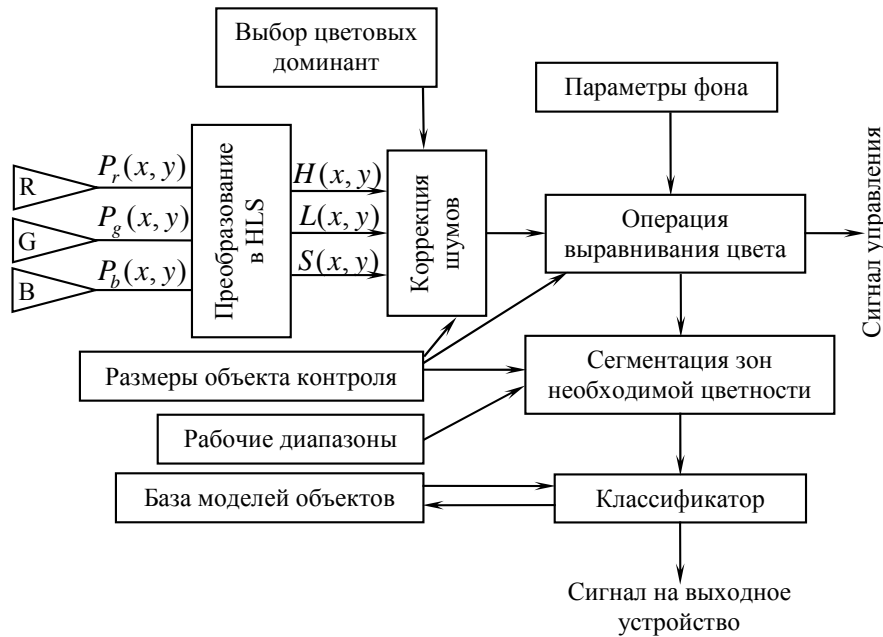


Рис. 2. Структура алгоритма обработки изображения кристаллов алмаза при их классификации по цвету

Предложенный подход к описанию цвета кристаллов алмаза с помощью цветового образа и реализация алгоритма их классификации, с учетом необходимости пересчета цветовых координат изображений в более подходящую для анализа цвета модель HLS, позволяет добиться снижения погрешности определения цветов, особенно близких цветовых оттенков, и, как следствие, увеличения количества определяемых цветовых классов.

Схема построения автоматизированной ОЭСК

На основании проведенных исследований предложена следующая универсальная схема построения ОЭСК кристаллов алмаза для их классификации по цвету, форме и качеству.

ОЭСК должна содержать 3–4 цветные камеры, пространственно разнесенные друг относительно друга на 120° для трех камер и 109°27'50" – для четырех камер. Процесс съема информации с камер синхронизируется с моментом входа кристалла алмаза в зону анализа, что позволит сократить объем обрабатываемой информации и снизить требования к используемым камерам по скорости работы. Время экспозиции выбирается из условий достаточной для анализа формы освещенности кристалла алмаза и минимизации смаза изображения.

В качестве источников излучения узла освещения, обеспечивающего равномерное освещение зоны анализа, рационально использовать светодиодные источники, которые, в том числе, позволят обеспечить регулировку уровня освещенности поля анализа в широких пределах и необходимую подстройку под выбранное значение экспозиции. Оптимальный с точки зрения авторов работы вариант схемы построения ОЭСК представлен на рис. 3.

По результатам проведенных исследований и расчетов приблизительная раскладка по временному циклу процесса классификации (всего 35–40 мс) составила:

- время экспозиции – 5–10 мкс;
- время передачи изображения – 5 мс (возможно уменьшить до 300 мкс);
- предварительная обработка (пространственная фильтрация полноцветного изображения) одного канала цветности – 300 мкс;
- выделение вспомогательных параметров – 20 мс;
- определение признаков класса – 10 мс;
- классификатор – 40–80 мкс (в зависимости от количества классов).

Таким образом, можно обеспечить сортировку кристаллов алмаза по цвету и форме с производительностью от 20 шт./с.

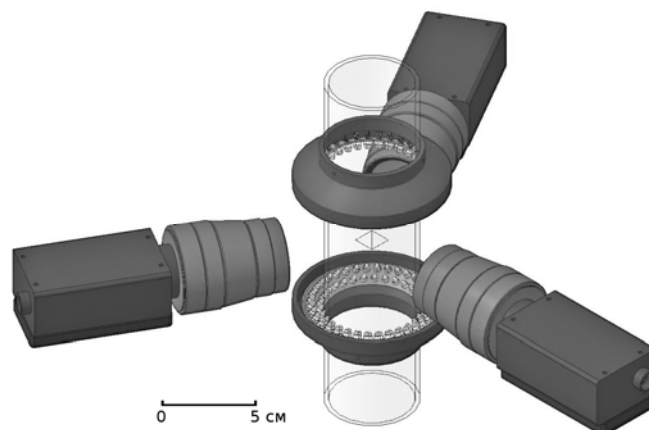


Рис. 3. Вариант расположения концентрических источников узла освещения сверху и снизу от узла регистрации

Заключение

В рамках настоящей работы впервые предложено подойти к процессу качественной оценки и аттестации кристаллов алмаза с использованием элементов теории цветовых измерений и моделей описания цвета многопараметрического объекта, а также теории кристаллографии, т.е. данных о закономерностях формирования и роста кристаллов. Указанный подход позволит расширить диапазон крупности кристаллов, которые могут оцениваться в автоматическом режиме, повысить скорость и качество их сортировки и, как следствие, сделать значительный шаг в развитии технологии аттестации алмазного сырья, отвечающей требованиям современного рынка.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

Литература

1. Росэмтент. Актив России: ЗАО «АЛРОСА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hauleymurphyphotography.com/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.05.2012).
2. Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения РАН. Разработки: РЛЦ-С [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tdisie.nsc.ru/Rus/arc_rus.html/, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.05.2012).
3. Вакуленко А.Д., Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Критерии применимости цветовых пространств в оптико-электронных системах цветового анализа минералов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 156–157.
4. Научно-производственная компания «Малленом»: технология стереозрения и ее приложения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mallenom.ru/form2.php/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.05.2012).
5. ГОСТ Р 51519.1-99. Алмазы природные необработанные. Классификация. Основные признаки. – Введ. 28.12.1999. – М.: Госстандарт России, 2000. – 15 с.
6. ГОСТ Р 51519.2-99. Алмазы природные необработанные. Сортировка алмазов. Основные положения. – Введ. 28.12.1999. – М.: Госстандарт России, 2000. – 8 с.
7. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фаддеев М.А. Основы кристаллографии: Учебник для вузов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2006. – 500 с.
8. Галиулин Р.В. Кристаллографическая геометрия. – 2-е изд. – М.: КомКнига, 2005. – 136 с.
9. Горбунова Е.В. Исследование и разработка оптико-электронных систем цветового анализа минерального сырья: Дис. ... канд. тех. наук. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 157 с.

- Горбунова Елена Васильевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, vredina_ia@mail.ru
- Коротаев Валерий Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, korotaev@grv.ifmo.ru
- Чертов Александр Николаевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a.n.chertov@mail.ru