

Обнаружение алмазов в кимберлите с помощью метода меченых нейтронов

Алексахин В.Ю., Быстрицкий В.М., Замятин Н.И., Зубарев Е.В., Красноперов А.В.,
Рапацкий В.Л.,
Рогов Ю.Н., Садовский А.Б., Саламатин А.В., Салмин Р.А., Сапожников М.Г., Слепнев В.М.,
Хабаров С.В.

*ООО «Нейтронные технологии», Дубна
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

Разинков Е.А., Тарасов О.Г.

ООО «Нейтронные технологии», Дубна

Никитин Г.М.

Институт “Якутнипроалмаз”, АК “АЛРОСА” (ОАО), Мирный

Аннотация

Предложена инновационная технология поиска алмазов в кимберлитовой породе на основе метода меченых нейтронов. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований по облучению образцов кимберлита быстрыми мечеными нейтронами с энергией 14.1 МэВ. Источником потока меченых нейтронов является портативный нейтронный генератор со встроенным 64-пиксельным кремниевым альфа – детектором с двухсторонним стриповым съемом. Регистрация характеристического гамма-излучения, возникающего в результате процесса неупругого рассеяния нейтронов на ядрах химических элементов, входящих в состав кимберлита, осуществляется с помощью шести гамма-детекторов на основе кристаллов BGO. Критерием обнаружения алмаза является наличие повышенной концентрации углерода в определенном объеме образца кимберлита.

1. Введение

В настоящее время в технологическом процессе обогащения алмазосодержащего кимберлита проводится дезинтеграция в дробилках или валковых прессах с последующим шадящим самоизмельчением руды в мельницах мокрого самоизмельчения до размера 0,2 мм и меньше. Обогащение руды производится рентгенолюминесцентным, гравитационным, флотационным методами [1].

Рентгенолюминесцентная сепарация использует свойство алмазов люминесцировать под воздействием рентгеновского излучения: рентгенолюминесцентный сепаратор автоматически отсекает тот необходимый объем концентрата руды, в котором находится раскрытый алмаз.

Основным недостатком существующего метода добычи алмазов является то, что при дроблении кусков кимберлита могут быть разрушены наиболее ценные крупные алмазы, массой от 5 каратов и выше.

ООО «Нейтронные технологии», по заказу АК «АЛРОСА», разработало инновационную методику обнаружения крупных алмазов в кимберлитовой породе без ее разрушения. Суть методики состоит в облучении крупных кусков кимберлита быстрыми нейтронами с энергией 14 МэВ, которые возникают в бинарной ядерной реакции



Направление вылета нейтрона определяется путем регистрации (мечения) α -частицы, сопутствующей нейтрону, специальным α -детектором. Меченые нейтроны, попадая в кимберлитовую породу, индуцируют реакции неупругого рассеяния



в результате которых возбуждение ядра снимается испусканием γ -квантов с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента составляющего объект досмотра. Регистрация характеристического γ -излучения осуществляется гамма – детекторами в совпадениях с сигналом от α -детектора. Измерение длительности временного интервала между сигналами с α - и γ -детекторов позволяет определить расстояние от источника нейтронов до точки, из которой был выпущен γ -квант, поскольку скорость нейтрона постоянна и равна 5 см/нсек. Таким образом, метод меченых нейтронов (ММН) дает возможность определить все три координаты области исследуемого образца, в которой определяется элементный состав.

Метод меченых нейтронов (ММН) получил в последнее время широкое распространение [2-12] при создании детекторов взрывчатых и наркотических веществ которые позволяют определить элементный состав вещества, скрытого в объектах досмотра разного уровня – от ручной клади до морских контейнеров.

Применение ММН для поиска алмазов сводится к обнаружению избытка углерода в образце кимберлита. Большая проникающая способность быстрых нейтронов дает возможность исследовать образцы кимберлита значительных размеров. Способность ММН определять трехмерное положение искомого вещества позволяет не только установить факт наличия крупного алмаза в куске породы, но и определить, в каком месте образца он расположен. Это позволяет осуществить селекцию кимберлитовой руды и определить куски породы, содержащие крупные алмазы до стадии мелкого дробления.

Нами был разработан метод автоматического обнаружения алмазов в кимберлитовой породе и создана экспериментальная установка по поиску алмазов, на которой были выполнены эксперименты по измерению крупности обнаруживаемого алмаза для различных фоновых условий.

2. Описание установки

Экспериментальная установка по поиску алмазов в кимберлите состоит из портативного нейтронного генератора ИНГ-27 со встроенным 64 – пиксельным альфа-детектором, шести гамма - детекторов на основе кристаллов BGO, электроники системы сбора данных с альфа – и гамма – детекторов, блоков питания нейтронного генератора (НГ) и альфа – и гамма - детекторов. Общий вид установки приведен на Рис.1.

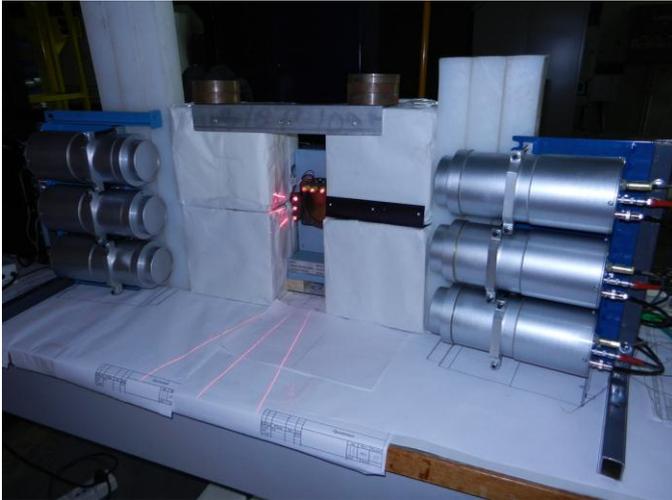


Рис 1 – Общий вид экспериментальной установки.

На переднем плане Рис.1 видны 6 гамма-детекторов, кристаллы ВГО которых защищены от прямого попадания нейтронов, испускаемых ИНГ-27, стальными блоками. Область меченых пучков нейтронов, попадающих на исследуемый объект, выделяется 6 генераторами лазерных линий, укрепленными на корпусе НГ. Имитатор алмаза располагался на подвеске, которая также могла держать несколько образцов кимберлита. Типичная постановка опыта – имитатор алмаза располагался за образцом кимберлита – показана на Рис. 2.



Рис 2 - Имитатор алмаза массой 1.78 г за образцом кимберлита.

В ряде случаев имитатор алмаза помещался между двумя образцами кимберлита или вводился в отверстие, просверленное в образце.

2.1 Нейтронный генератор

Нейтронный генератор ИНГ-27 разработан Всероссийским Институтом автоматики им. Н.Л.Духова (Москва) и имеет следующие характеристики:

| | |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Максимальная интенсивность | $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ |
| Энергия нейтронов | 14.1 МэВ |
| Режим нейтронного излучения | постоянный |
| Питание | $200 \pm 5 \text{ В}$ |
| Максимальная потребляемая мощность | 40 Вт |
| Размер нейтронного генератора | 130x279x227 мм |
| Вес | 8 кг |
| Время жизни | 800 часов |

Внутри НГ расположен 64-пиксельный кремниевый альфа-детектор, разработанный в ОИЯИ (г.Дубна), который обеспечивает формирование 64 пучков меченых нейтронов.

2.2 Альфа-детектор

Кремниевый α -детектор, встраиваемый в нейтронный генератор, представляет собой двухсторонний стриповый детектор, который содержит 8 взаимно перпендикулярных стрипов на каждой стороне, образующих матрицу 8×8 с размером каждого элемента $4 \times 4 \text{ мм}^2$. Полный размер чувствительной области 64 элементного α -детектора составляет $32 \times 32 \text{ мм}^2$. Альфа детектор расположен на расстоянии 62 мм от тритиевой мишени. Блок детекторной электроники альфа-детектора состоит из 16 независимых усилителей сигналов, поступающих с 16 стрипов альфа-детектора. Предусилители сигналов альфа-детектора монтируются в задней части НГ.

Для обнаружения алмазов важно точно знать пространственные распределения меченых пучков нейтронов, поскольку речь идет о детектировании объектов размерами порядка 10-20 мм. Пространственные характеристики 64 меченых пучков нейтронов, были измерены с помощью сцинтилляционного стрипового детектора (профилометра). Размер каждого стрипа, выполненного из пластического сцинтиллятора в виде прямоугольного параллелепипеда, составляет $150 \times 7 \times 5 \text{ мм}$ (толщина стрипа вдоль направления пучка меченых нейтронов 5 мм). Все 16 стрипов профилометра светоизолированы друг от друга. Светосбор с них на многоанодный фотоэлектронный умножитель осуществляется с помощью волокон.

На Рис.3 приведены пространственные распределения меченых пучков нейтронов в плоскости, перпендикулярной к их направлению. В качестве примера построены пространственные распределения зарегистрированных событий, соответствующие совпадениям сигнала с Y-стрипа с сигналом с каждого из восьми X-стрипов.

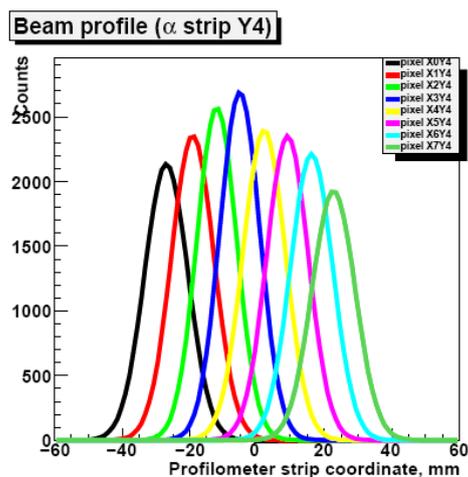


Рис. 3 - Пространственные распределения нейтронов в меченых пучках.

Распределения, приведенные на Рис.3, получены путем аппроксимации чисел событий, зарегистрированных стрипами профилометра, функцией Гаусса с целью определения положения центров меченых пучков и их ширин. Ширины меченых пучков и положения центров полученных пиков хорошо совпадают со значениями, ожидаемыми для точечного дейтронного пучка на мишени.

На расстоянии 20 см от мишени НГ размер меченого пучка в плоскости, перпендикулярной направлению меченого пучка, составлял 13x13 мм.

2.3 Гамма-детектор

Для регистрации гамма-квантов от облучения объектов досмотра использовались шесть гамма-детекторов на основе кристаллов BGO диаметром 76 мм и толщиной 65 мм.

Детекторы гамма-квантов на основе кристаллов BGO обладают следующими свойствами:

1) Хорошим энергетическим разрешением (8-2,5%) в диапазоне энергий 1-12 МэВ. Следует отметить, что на гамма-линии углерода ($E_\gamma = 4.44$ МэВ) энергетическое разрешение гамма-детектора в среднем составляло 4.4%.

2) Высокой эффективностью регистрации гамма-квантов в указанном интервале энергий.

3) Низкой чувствительностью по отношению к регистрации фоновых нейтронов.

Временное разрешение системы (α - γ)-совпадений, усредненное по всей совокупности гамма-детекторов, составляет 3.3 нс.

2.4 Система сбора данных

Конструктивно регистрирующая электроника системы сбора данных с альфа- и гамма-детекторов выполнена в виде одной платы на 32 входа, которая имеет размер стандартной PCI-карты с возможностью установки их в PCI-E слот персонального компьютера (ПК). Обмен информацией с ПК осуществляется через PCI-E шину. В основу системы регистрации сигналов с альфа и гамма-детекторов положен принцип оцифровки их с последующим восстановлением временных и амплитудных характеристик импульсов. Для обеспечения требуемой скорости передачи данных по PCI шине интерфейс работает в режиме прямого доступа к памяти ПК.

В состав системы сбора данных входило также соответствующее программное обеспечение, которое включает в себя основной модуль (драйвер), программу управления и программу реконструкции. Плата сбора информации обеспечивает прямое цифровое преобразование импульсов сигналов, приходящих от альфа- и гамма- детекторов. Она имеет встроенные триггерные схемы для работы в трёх режимах: временном, энергетическом одноканальном и в режиме альфа-гамма совпадений. Используя программное обеспечение, можно точно восстановить амплитудные и временные характеристики сигнала. Все программное обеспечение работает под управлением операционной системы Linux.

3. Исследуемые образцы

Для выполнения работы АК «АЛРОСА» (ОАО) передала различные образцы имитаторов алмазов, кимберлитовой породы, кернов из геологоразведочных скважин. На первом этапе создания и отработки методики были переданы 5 имитаторов алмазов, выполненных из алмазного порошка, 6 образцов кимберлитовой породы и 3 образца кернов. На втором этапе для проверки методики было выслано 55 кг кимберлитовой породы со склада рудника «Мир» в виде 33 образцов. Кроме этого, мы использовали образцы углерода. Вес и размеры образцов углерода и имитаторов алмазов приведены в Таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 - Вес и размеры образцов углерода и имитаторов алмазов.

| № | Тип образца | Вес (г) | Габаритные размеры (мм) |
|----|------------------|---------|-------------------------|
| 1 | углерод | 4.4 | 19.2 × 19.2 × 7.8 |
| 2 | имитатор алмазов | 0.3 | ∅5 × 6 |
| 3 | имитатор алмазов | 1.15 | ∅8.14 × 8.6 |
| 4 | имитатор алмазов | 1.78 | ∅10 × 9 |
| 5 | имитатор алмазов | 5.2 | ∅15 × 11.7 |
| 6 | имитатор алмазов | 11.2 | ∅20.15 × 14 |
| 7 | углерод | 1.93 | 10.5 × 10.7 × 10.2 |
| 8 | углерод | 1.92 | 10.5 × 10.6 × 10.15 |
| 9 | углерод | 5.8 | 19.5 × 18.8 × 10 |
| 10 | углерод | 10.91 | 19.6 × 18.6 × 17.8 |
| 11 | углерод | 48.5 | 32 × 30.1 × 30.1 |
| 12 | углерод | 50.17 | 32.5 × 30.5 × 30.2 |

В Таблице 2 приведены размеры образцов кимберлита, полученных на первом этапе работы.

ТАБЛИЦА 2 - Размеры образцов кимберлита на первом этапе работы.

| № п/п | Надпись на образце | Размеры (Ш×В×Т), см. Для образцов неправильной формы размеры характерные |
|-------|--------------------|---|
| 1 | нет | 15×16×2 |
| 2 | КСМ | 13×8×3 |
| 3 | ЗМ С-127/5 197,5 | 8,5×7,5×2,5 |

| | | |
|---|-------------------|-------|
| 4 | Н-9 24/24 Гл 129м | 6×8×3 |
| 5 | Н-9 24/24 Гл 147м | 8×3×4 |
| 6 | Н-9 24/24 Гл 175м | 8×6×3 |

Образцы кимберлита, переданные нам на втором этапе работы, представляли собой камни неправильной формы, с типичными линейными размерами 10-20 см и толщиной 4-10 см.

4. Методика измерений

Поскольку алмазы практически полностью состоят из углерода, то методика их обнаружения заключалась в нахождении избытка углерода в какой-либо области образца кимберлита. Энергетический спектр характеристического излучения углерода в реакции (2) приведен на Рис.4.

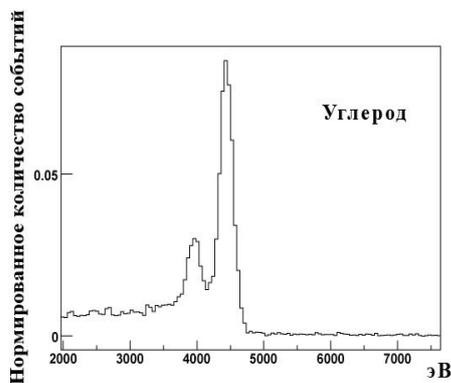


Рис.4 - Энергетический спектр гамма-квантов для графита (углерода).

Как видно из Рис. 4, спектр углерода характеризуется линией излучения гамма – квантов с энергией 4.44 МэВ. Кроме этого, четко виден пик одиночной утечки из кристалла ВГО гамма – кванта с энергией 0.511 МэВ, соответствующий энергии 3.93 МэВ. Столь простая форма гамма – спектра углерода существенно упрощает задачу его распознавания в кимберлите.

Энергетический спектр гамма-квантов от кимберлита показан на Рис.5. Хорошо видны кислородные линии при энергиях 6.13 МэВ и 3.8 МэВ. В тоже время углеродный пик при 4.44 МэВ отсутствует. Это облегчает задачу идентификации алмазов.

Для имитации спектра кимберлита с наличием в нем алмаза к образцу кимберлита был прикреплен графитовый кубик с гранью 25 мм. Просуммированный по всем меченым пучкам спектр от такой сборки показан на Рис. 5 (красная линия).

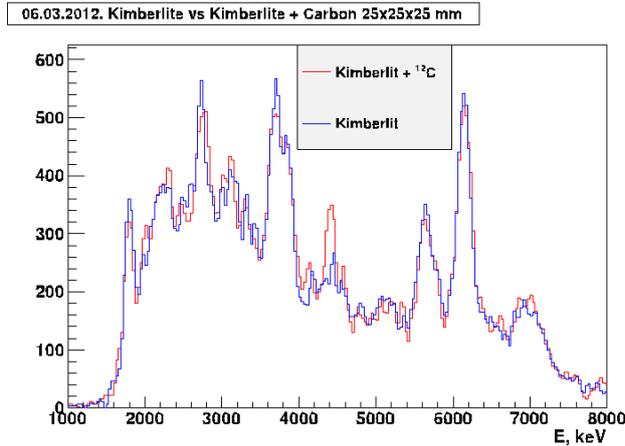


Рис.5 - Энергетические спектры гамма-квантов от образца кимберлита (синяя линия) и от сборки кимберлит+графитовый кубик (красная линия).

Хорошо видно, что наличие углерода проявляет себя пиком при энергии 4.44 МэВ, который отсутствует в чистом кимберлите.

Типичная постановка опытов с имитаторами алмазов состояла в облучении сборки кимберлит+имитатор (см. Рис.2). Сборка располагалась на расстоянии 14 см от нейтронного генератора. Расстояние от сборки до гамма-детекторов составляло 30 см. Интенсивность нейтронного генератора была $I=5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$. Типичное время набора статистики составляло 30 мин. Хотелось бы подчеркнуть, что такое время набора выбиралось только из соображений получить заведомо хорошую статистику для того, чтобы проверить процедуру нахождения алмазов.

При облучении мечеными нейтронами образец разбивался на 64 области, в каждой из которых происходило определение элементного состава. Типичный спектр полученный при облучении образца кимберлита №2 и имитатора алмаза массой 11 г приведен на Рис.6.

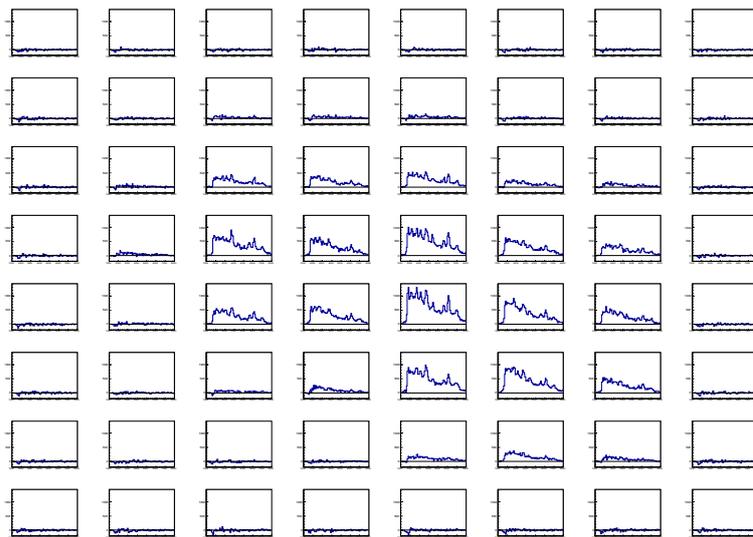


Рис. 6 - Энергетические спектры гамма-квантов, полученные при облучении образца кимберлита №2 и имитатора алмаза (11 г).

Видно, что в разных ячейках спектры гамма-квантов могут быть разными, но это неважно, так как для дальнейшего анализа отбираются только события, в интервале 4.2-4.6 МэВ, соответствующему линии углерода.

Для удобства обработки и восприятия получаемой информации мы ввели цветовую схему со следующими обозначениями.

В каждой ячейке с номером i вычислялась величина $\Delta_i = N - N_i$, где N – среднее число событий в области углеродного пика по всему образцу. Ячейки, в которых отклонение от среднего Δ_i не превышало 3σ , где σ – статистическая ошибка данного измерения, заштриховывались звездочками, а равномерным серым цветом показаны ячейки, где отклонение более, чем 3σ . Поскольку образец зачастую оказывался меньше зоны досмотра, то в некоторых ячейках набиралась недостаточная статистика, такие области не штрихуются, а выделяются пустыми прямоугольниками. Есть ячейки, в которых разность $\Delta_i = N - N_i$ – отрицательная, что указывает на то, что в них нет превышения событий в области линии углерода. Такие области заштриховывались простой наклонной штриховкой.

В качестве критерия нахождения алмаза было принято стандартное статистическое условие

$$\Delta_i > 3\sigma \quad (3)$$

5. Результаты измерений

Первой проверкой справедливости критерия (3) стали результаты обработки спектров для образцов кимберлита и кернов. На Рис. 7 показано распределение величин $\Delta_i = N - N_i$ для образца кимберлита №3.

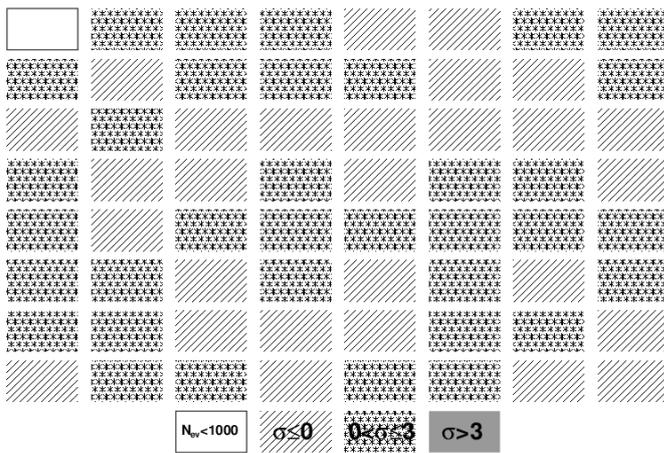


Рис. 7 - Распределение $\Delta_i = N - N_i$ для образца кимберлита №3.

Видно, что, действительно, по всей области образца отклонения от среднего не превышает 3σ . Именно такая картина ожидается для однородного образца – отклонение от среднего за счет только статистических флуктуаций с большой долей вероятности не превышают 3σ .

Результаты измерений всех образцов кимберлита, приведенных в Табл.2, и трех образцов кернов свидетельствовали об отсутствии в них алмазов на статистически значимом уровне. Последнее обстоятельство особенно примечательно, поскольку сам по себе углерод в составе вещества кернов имелся, что видно на их энергетических спектрах (см. Рис.8).

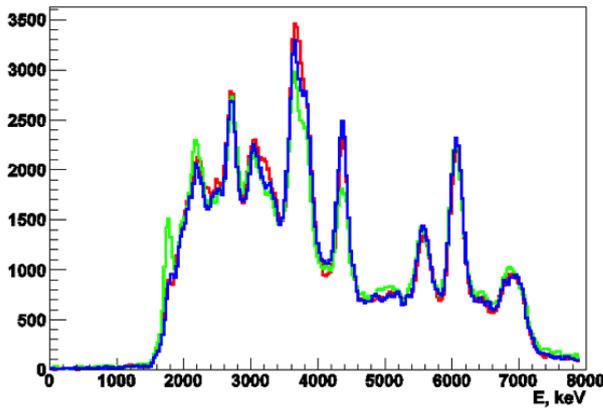


Рис. 8 - Энергетические спектры гамма-квантов, полученные при облучении образцов кернов (показаны разными цветами).

На Рис.8 отчетливо виден углеродный пик при 4.44 МэВ. Однако само по себе наличие углерода в элементном составе вещества кернов не привело к изменению *локальной* концентрации углерода какой-либо пространственной области.

На Рис. 9 приведены результаты обработки данных облучения сборки кимберлит №1 (толщина 2 см) и имитатор алмаза №6 (масса 11.2 г). Имитатор был расположен в центре зоны досмотра, в районе ячейки, помеченной на Рис.9 серым цветом. Линейный размер имитатора составлял 20 мм, в то время как размер одного меченого пучка на данном расстоянии составлял 11 мм. То есть сигнал (избыток углерода) должен был бы виден в нескольких ячейках.

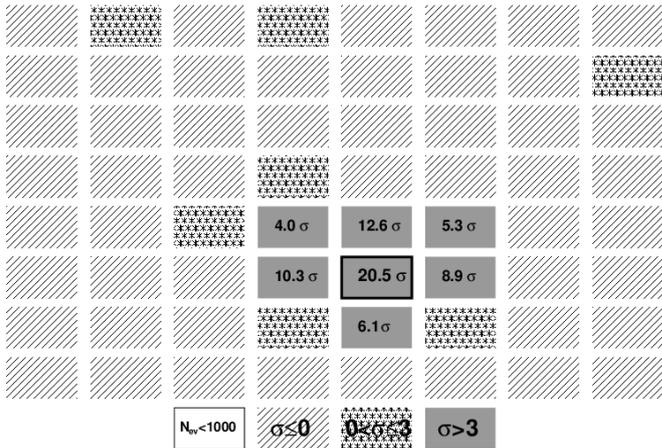


Рис. 9 - Распределение $\Delta_i = N - N_i$ отклонения от среднего для облучения сборки кимберлит №1 (толщина 2 см) и имитатор алмаза №6 (масса 11.2 г).

Действительно, хорошо видно, как в группе нескольких центральных ячеек наблюдается превышение над границей статистических флуктуаций в 3 σ. В реальности величина превышения числа зарегистрированных событий в углеродной линии над средним по образцу достигает 20.5 σ. То есть, сигнал очень четкий и однозначно связанный с присутствием имитатора алмаза.

В Таблице 3 дается полное описание проведенных опытов и полученных результатов.

ТАБЛИЦА 3 - Результаты проведенных опытов по обнаружению имитаторов-алмазов в различных условиях.

| № п/п | Описание | Имитатор, масса | Превышение, σ |
|-------|---|-----------------|----------------------|
| 1 | Кимберлит №1 на 14 см от НГ. За кимберлитом в центре меченого пятна имитатор алмаза №6. | №6, 11.2 г | 20,5 |
| 2 | Кимберлит №1 на 14 см от НГ. За кимберлитом в центре меченого пятна имитатор алмаза №5. | №5, 5.2 г | 9,8 |
| 3 | Кимберлит №1 на 14 см от НГ. За кимберлитом в центре меченого пятна имитатор алмаза №5. За имитатором алмаза стоит образец кимберлита №2. | №5, 5.2 г | 6,8 |
| 4 | Кимберлит №1 на 14 см от НГ. За кимберлитом в центре меченого пятна имитатор алмаза №4. | №4, 1.78г | 6,2 |
| 5 | Кимберлит №1 на 14 см от НГ. За кимберлитом в центре меченого пятна имитатор алмаза №3. | №3, 1.15г | 2,5 |
| 6 | Кимберлит №1 на 14 см от НГ. За кимберлитом в центре меченого пятна имитатор алмаза №4. За имитатором алмаза стоит образец кимберлита №2. | №4, 1.78г | 4,2 |
| 7 | Кимберлит №2 на 14 см от НГ. В кимберлите высверлено отверстие диаметром, соответствующим образцу имитатора алмаза №4. В отверстие вставлен имитатор алмаза №4. Толщина кимберлита по нейтронам около 1 см. | №4, 1.78г | 3,9 |
| 8 | Кимберлит №4 на 14 см от НГ. В кимберлите высверлено отверстие диаметром, соответствующим образцу имитатора алмаза №4. В отверстие вставлен имитатор алмаза №4. Толщина кимберлита по нейтронам около 4 см. | №4, 1.78г | 1,7 |
| 9 | Кимберлит №2 на 14 см от НГ. В кимберлите высверлено отверстие диаметром, соответствующим образцу имитатора алмаза №3. В отверстие вставлен имитатор алмаза №3. Толщина кимберлита по нейтронам около 1 см. | №4, 1.15г | 3,3 |

Результаты проведенных опытов свидетельствуют о том, что задача автоматического обнаружения имитатора-алмаза, расположенного внутри кусков кимберлита успешно решена. Разработанный алгоритм правильно идентифицирует положение имитатора алмаза. Минимально обнаруживаемая масса имитатора алмаза составила 1.15 г за толщиной кимберлита 1 см. Специальное исследование проведено для оценки минимального времени, требуемого для обнаружения превышения на уровне 3 σ . Для условия опыта №6 это время составило 16 мин.

После окончания первого этапа работ, АК «АЛРОСА» (ОАО) передала 33 образца кимберлита общим весом 55 кг для отработки методики обнаружения алмазов. Характерный линейный размер образца составлял 15-20 см, с массой 1-2 кг.



Рис. 10 Образцы кимберлитовой руды, полученной на втором этапе работы.

При обследовании образцов кимберлита по приведенной выше процедуре в 32 образцах не было отмечено статистически значимого превышения локального содержания углерода над средним. Наблюдаемое отклонение от среднего по всем образцам не превышало 2.5σ . Это дает указание на то, что предлагаемая методика приводит к небольшому проценту ложных положительных тревог (хотя статистика для подтверждения этого утверждения пока недостаточна).

В одном из образцов, в образце №17, было обнаружено существенное локальное превышение углерода над средним уровнем. Величина превышения локального содержания углерода над средним составило от 3.3 до 5.8σ , в зависимости от ракурса, под которым облучался образец.

После возвращения образцов в г.Мирный был проведен анализ образца №17 с превышением углерода. В нем обнаружили два неоднородных алмазных включения, диаметром до 7 мм, состоящих из мелких частиц размером от 1 до 2 мм. Фотография алмазных включений приведена ниже.



Рис. 11 Два алмазных включения в кимберлите на фоне линейки.

Таким образом, экспериментально была продемонстрирована способность метода меченых нейтронов для обнаружения алмазов в кимберлите.

6. Выводы

Разработана методика и технология обнаружения алмазов в кимберлитовой породе на основе использования метода меченых нейтронов. Создана экспериментальная установка, основу которой составляет портативный нейтронный генератор со встроенным 64-пиксельным кремниевым альфа – детектором. Идентификация алмазов производилась по наличию локального избытка углерода в исследуемом образце. Энергетические спектры гамма-квантов от кимберлита измерялись с помощью 6 гамма-детекторов на основе кристаллов ВГО.

Результаты измерений с имитаторами алмазов в совокупности с образцами кимберлита, разных по размеру и массе, свидетельствуют о том, что задача автоматического обнаружения алмаза успешно решена. С помощью разработанного алгоритма на высоком уровне достоверности осуществляется обнаружение алмаза в куске кимберлита произвольной формы. На существующем экспериментальном стенде минимально обнаруживаемая масса имитатора алмаза составляет 1.15 г при толщине экранирующего слоя кимберлита расположенного перед имитатором 1 см.

Последующая проверка алгоритма распознавания на 33 образцах кимберлита общим весом 55 кг подтвердила потенциал использования технологии ММН для реализации этой цели: ложных тревог обнаружено не было, а в образце, где локальное превышение содержания углерода составило от 3.3 до 5.8 σ , было действительно обнаружено два неоднородных алмазных включения, диаметром до 7 мм, состоящих из мелких частиц размером от 1 до 2 мм.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ВНИИА им. Н.Л.Духова (Москва) Е.П.Боголюбову, Ю.К.Преснякову, В.И.Рыжкову, Т.О.Хасаеву, А.С.Чуприкову, Д.И.Юркову за создание нейтронного генератора с уникальными параметрами, а также сотрудникам АК «АЛРОСА» (ОАО) А.С.Чаадаеву и О.Е.Ковальчуку за ценные замечания.

Литература

1. **Ю.П. Солодова, М.В. Николаев, К.К. Курбатов** и др., Геммология алмаза, Москва, 2008. - 416с.
2. **P.O. Hawkins, R.W. Sutton**, Rev. Sci. Instr. 31 (1960) 241.
3. **L.I.Ussery et al.**, Los Alamos Nat. Lab report LA12847-MS (October 1994).
4. **E.Rhodes et al.**, SPIE, v. 2092, p. 288 (1993); E.Rodes et al., IEEE Trans. Nucl. Science, 39 (1992) 1041-1045.
5. **A.Beyerle, J.P.Hurley, L.Tunnell**, Nucl.Instr.Meth. A299 (1990) 458.
6. **S.Pesenti et al.**, Nucl. Instr. Meth., A531 (2004) 657.
7. **V.M.Bystritsky et al.**, Proceedings of the 4th International Symposium on Technology and Mine Problem, Naval Postgraduate School, March 13-16, Monterey, California, 2000.
8. **V.M.Bystritsky et al.**, Proceedings of the International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, 15-18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 2003, v 1,2.
9. **V.M.Bystritsky et al.**, Proc. Conference "Portable neutron generators and technologies on their basis", Moscow, 2004, p.283.
10. **V.M.Bystritsky et al.**, JINR Communications, E13-2006-36, 2006.
11. **V.M.Bystritsky et al.**, Physics of Particles and Nuclei Letters, 5 (2008) 441.
12. **V.M.Bystritsky et al.**, Physics of Particles and Nuclei Letters, 5 (2013) 722.