

УДК 539.12.04:622.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ СУХОГО ОБОГАЩЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВОЙ РУДЫ

Ю. Н. РОГОВ¹, начальник отдела программистов, yury.rogov@cern.ch
М. Г. САПОЖНИКОВ¹, научный руководитель, проф., д-р физ.-мат. наук
Г. М. НИКИТИН², руководитель Центра инноваций и технологий
А. В. ЯМОВ³, зам. начальника Производственно-технического управления

¹ ООО «Диамант», Дубна, Россия

² Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

³ ПАО «Севералмаз», Архангельск, Россия

Введение

В настоящее время в технологическом процессе обогащения алмазосодержащего кимберлита применяют первичное дробление с последующим измельчением руды в мельницах мокрого самоизмельчения. Основным недостатком существующего метода добычи алмазов является разрушение наиболее ценных крупных алмазов массой от 1–5 карат и выше при дезинтеграции кусков кимберлита [1–7].

При существующей технологии переработки алмазосодержащих руд из коренных месторождений АК «АЛРОСА» (ПАО) повреждаемость ценных кристаллов составляет от 25 до 75 %, что приводит к потере их массы в среднем до 12 %. Основным источником повреждения алмазов является процесс измельчения кимберлитов, при этом чем крупнее кристалл, тем больше процент повреждаемости этого класса [4, 6]. Так, на месторождении им. М. В. Ломоносова в Архангельской области только 40–45 % алмазов без трещин или содержат единичные трещины [5].

Метод меченых нейтронов (ММН) [8–16] позволяет обнаружить алмаз внутри кимберлитовой породы без ее разрушения.

Суть метода 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 объект исследования, индуцируют реакции неупругого рассеяния



в результате которых возбуждение ядра снимается испусканием γ -квантов с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента. Регистрация характеристического γ -излучения осуществляется γ -детекторами в совпадениях с сигналом от α -детектора, выполненного в виде матрицы, каждый элемент которой отвечает за отдельный меченый пучок нейтронов. В результате вся область досмотра (например, конвейера с породой) разбивается на отдельные ячейки (воксели), в которых происхо-

Представлены результаты испытаний прототипа опытной установки по обнаружению алмазов в кимберлитовой руде методом меченых нейтронов на обогатительном комплексе Поморской ГРЭ ПАО «Севералмаз». Кимберлитовая руда облучалась быстрыми нейтронами с энергией 14,1 МэВ. Критерием обнаружения алмаза являлось наличие повышенной концентрации углерода в определенном объеме образца кимберлита.

Ключевые слова: метод меченых нейтронов, сухое обогащение, кимберлит, обнаружение алмазов, портативный нейтронный генератор, альфа-детектор, гамма-детекторы.

DOI: 10.17580/gzh.2018.05.08

дит определение элементного состава. В этом и состоит важное отличие ММН от хорошо известных методов нейтронно-активационного анализа: он не просто определяет энергетический спектр со всей области досмотра, а дифференцирует эту информацию по отдельным элементам внутри области досмотра. Кроме того, ММН дает возможность определить все три координаты ячейки, в которой определяется элементный состав. Это достигается измерением длительности временного интервала между сигналами α - и γ -детекторов, которое позволяет определить расстояние от источника нейтронов до точки, из которой был выпущен γ -квант, зная, что скорость нейтрона постоянна и равна 5 см/нс.

Экспериментальная демонстрация возможностей ММН по обнаружению алмазов в кимберлите была выполнена в работе [14]. Облучение мечеными нейтронами 33 образцов кимберлита линейными размерами 15–20 см и массой 1–2 кг выявило наличие локального превышения концентрации углерода в одном из образцов. Последующее обследование данного образца выявило наличие в нем двух неоднородных алмазных включений диаметром до 7 мм, состоящих из мелких частиц размером от 1 до 2 мм.

В данной работе представлены результаты испытаний прототипа опытной установки по обнаружению алмазов в кимберлитовой руде методом меченых нейтронов, которые проходили на обогатительном комплексе Поморской ГРЭ ПАО «Севералмаз» АК АЛРОСА (ПАО) в июле – сентябре 2015 г.

Описание установки

Установка состоит из системы подачи руды и нейтронного модуля, размещенных в 20-футовом транспортном контейнере. Управление осуществляется с выносного пульта оператора. Общая схема установки показана на **рис. 1**. Кимберлитовая руда поступает в загрузочный бункер. Дозатор породы подает руду из загрузочного бункера на систему подачи руды (СПР), которая фор-

мирует и подает насыпные образцы в лоток, который затем подается в нейтронный модуль для анализа.

В нейтронном модуле руда облучается пучками быстрых меченых нейтронов. С помощью системы γ -детекторов, расположенных над лотком с рудой, происходит регистрация характеристического γ -излучения в совпадениях с сигналом от α -детектора, расположенного внутри нейтронного генератора. Информация от γ - и α -детекторов поступает на блок приема и анализа информации. По итогам анализа выдается сигнал на перемещение данного лотка породы либо в бункер для алмазосодержащей руды, либо в бункер с пустой породой.

Источником быстрых нейтронов с энергией 14,1 МэВ является портативный нейтронный генератор (НГ) [17], разработанный Всероссийским институтом автоматики им. Н. Л. Духова (ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова, Москва) специально для данного проекта. Он создает постоянный поток нейтронов с интенсивностью $I = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Габаритные размеры НГ составляют $292 \times 199 \times 279 \text{ мм}$, масса — 8,8 кг. Максимальная потребляемая мощность 40 Вт.

Уникальность данной разработки заключается в том, что НГ создает 192 пучка меченых нейтронов и имеет в 3,5 раза большую зону досмотра по сравнению с обычными генераторами ИНГ-27 на 9 или 64 меченых пучка, выпускаемыми ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова. Созданный генератор является первой разработкой с таким большим числом меченых пучков. Необходимость создания НГ с повышенной гранулярностью α -детектора продиктована требованием достоверного обнаружения алмазов, которые имеют малые пространственные размеры. Размеры каждой ячейки α -детектора $6 \times 6 \text{ мм}$; они организованы в матрицу 12×16 . Расстояние между центрами соседних ячеек в каждой строке и в каждом столбце матрицы 7 мм. Размеры всего α -детектора $72 \times 96 \text{ мм}$. Он располагается на расстоянии 100 мм от тритиевой мишени НГ.

Для регистрации γ -квантов, возникающих при облучении кимберлитовой руды пучком быстрых меченых нейтронов, использовали 14 γ -детекторов на основе кристаллов BGO диаметром 76 мм и толщиной 65 мм. Такие детекторы имеют оптимальное соотношение по стоимости и качеству работ и хорошо зарекомендовали себя при использовании в установках ММН. Энергетическое разрешение всей системы детекторов составило $\Gamma_E = 4,42 \pm 0,14 \%$ на линии 4,44 МэВ. Временное разрешение системы (α - γ)-совпадений, усредненное по всей совокупности γ -детекторов, составило $\Gamma_t = 4,82 \pm 0,12 \text{ нс}$.

Важным аспектом работы установки была проверка обеспечения радиационной безопасности. Измерения радиационного фона проводили ежедневно. Они показали, что на пульте оператора во время работы установки радиационный фон не превышал $0,11 \text{ мкЗв/ч}$, фон образца керна после окончания облучения составил $0,17 \text{ мкЗв/ч}$, фон в транспортном контейнере при выключенном НГ $0,11$ – $0,17 \text{ мкЗв/ч}$. Естественный радиационный фон в местоположении Поморской ГРЗ составлял $0,11 \text{ мкЗв/ч}$.

Таким образом, работа установки не приводит к возникновению наведенной активности в кимберлитовой породе, превышаю-



Рис. 1. Общая схема установки

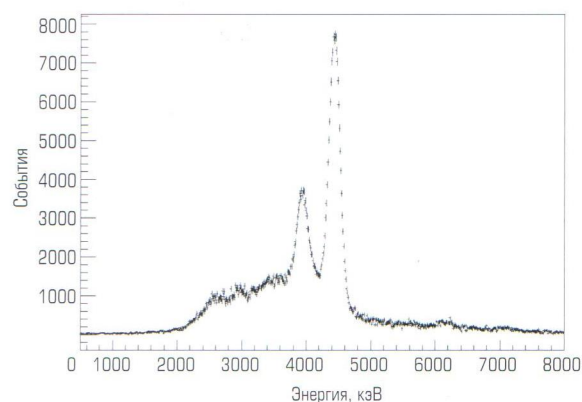


Рис. 2. Суммарный энергетический спектр от всех γ -детекторов при облучении углеродной пластины потоком меченых нейтронов с энергией 14 МэВ

щей установленные нормы. Радиационная угроза для персонала, обслуживающего комплекс, или используемого оборудования, не возникает [18].

Методика измерений

Алмазы практически полностью состоят из углерода, поэтому методика их обнаружения заключалась в нахождении избытка углерода в какой-либо области кимберлитовой руды. Энергетический спектр характеристического излучения углерода в реакции (2) приведен на рис. 2.

Как видно на рис. 2, спектр углерода характеризуется линией излучения γ -квантов с энергией 4,44 МэВ. Кроме того, четко виден пик одиночной утечки из кристалла BGO γ -кванта с энергией 0,511 МэВ, соответствующий энергии 3,93 МэВ. Такая простая форма γ -спектра углерода существенно упрощает задачу его распознавания в кимберлите.

Вся зона досмотра руды разделяется на 192 области. Размер вокселя зависит от расстояния от лотка с рудой до нейтронного генератора. В нашем случае средний размер вокселя составлял $8 \times 8 \text{ мм}$. В каждом вокселе определяли локальную концентрацию

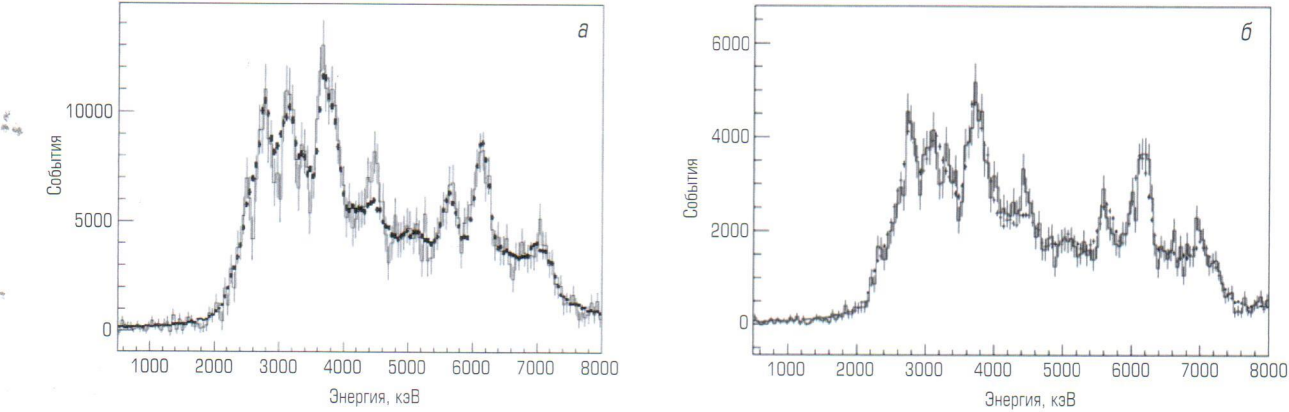


Рис. 3. Энергетический спектр, регистрируемый в вокселе с имитатором алмаза размером 8 мм в кимберлитовой руде крупностью –50+20 мм. Черные точки – усредненный энергетический спектр всего лотка с рудой (а) и с имитатором алмаза размером 16 мм в образце кимберлита 160×90×90 мм (б)

Таблица 1. Вероятность обнаружения имитаторов алмазов в руде крупностью –50+20 мм

Размер имитатора алмаза, мм	Число испытаний, N_{tot}	Число обнаружений N	Вероятность обнаружения W , %
6	10	8	80
8	10	9	90
10	10	10	100
12	10	10	100
14	10	10	100

Таблица 2. Масса рудного материала, отнесенного в хвосты и концентрат

Материал	Хвосты, кг	Концентрат, кг
K6062/26 пр. № 14	99,6	2,8
K6062/26 пр. № 15	69,7	3,0
Э102/-18-30	64,8	2,1

углерода и сравнивали со средней по всему образцу. Сигналом наличия алмаза в данном вокселе являлось превышение локальной концентрации углерода над средней.

Результаты измерений

Для настройки установки проведено 281 измерение с имитаторами алмазов, которые находились внутри образцов руды различной крупности. Для проведения измерений были изготовлены имитаторы алмаза из алмазного синтетического порошка (RVD) размерами от 6 до 14 мм.

Типичный энергетический спектр, регистрируемый в вокселе с имитатором алмаза размером 8 мм в кимберлитовой руде крупностью –50+20 мм, показан на рис. 3, а. Черными точками показан усредненный энергетический спектр всего лотка с рудой,

гистограмма показывает энергетический спектр, который регистрируется в месте расположения имитатора алмаза. Он полностью совпадает с усредненным спектром от всего лотка, за исключением четкого сигнала от пика углерода в районе 4,44 МэВ.

Размеры самого большого куска руды, подвергнутого исследованию, составляли 160×90×90 мм, внутри него находился имитатор алмаза размером 14 мм. Соответствующий энергетический спектр приведен на рис. 3, б. Видно, что даже при соотношении между крупностью руды и размером алмаза 10:1 установка регистрирует четкий сигнал в районе пика углерода и позволяет обнаружить алмаз даже в руде такой крупности.

Для определения вероятности обнаружения алмазов образцы с имитаторами алмазов внутри забрасывали в загрузочный бункер и перемешивали с породой. Для удобства измерений камни с имитаторами были выкрашены в различные цвета, соответствующие крупности породы. Затем подсчитывали число камней с имитаторами, которые оказались в бункере концентрата (или хвостов). Результаты испытаний сведены в табл. 1.

Вероятность обнаружения на уровне достоверности 90 % для имитаторов размером 6 мм находится в интервале 49–96 %, размером 8 мм – 61–99 %, размером 10, 12 и 14 мм – 74–100 %.

Для определения вероятности ложных тревог испытания проводили с различными типами веществ, среди которых была забалансовая руда, хвосты обогащения обогатительного комплекса Поморской ГРЭ, галька искусственной постели мельницы самоизмельчения и керновый материал. Вероятность ложных тревог, проверенная в 73 измерениях, составила менее 7 % на уровне достоверности 0,9.

На рис. 4 показаны энергетические спектры трех образцов керновых материалов, которые использовали в испытаниях: керновые пробы K6062/26 из трубки им. Карпинского (№ 14 с глубины 35–41,5 м и № 15 с глубины 41,5–48,5 м) и Э102/-18-30 из трубки «Архангельская» с глубины 110 м. Видно, что энергетические спектры пород из трубки им. Карпинского-1 очень похо-

жи, а спектр породы из трубки «Архангельская» несколько отличается. В нем меньше событий в области пика углерода (4,4 МэВ). В табл. 2 показано, как рудный материал этих проб разделился на концентрат и хвосты.

Руда концентрата и хвостов была проверена на наличие алмазов по результатам прохождения через технологическую цепочку извлечения алмазов на обогатительном комплексе Поморской ГРЗ. Результаты обработки материала концентрата и хвостов для класса крупности $-8+4$ мм не выявили наличия алмазов в них. Однако установили, что причиной срабатывания алгоритма выделения концентрата стало наличие в руде включений других минералов. В концентрате были также найдены алмазы более мелких классов крупности. Например, в концентрате одной из проб было обнаружено 4 кристалла класса $-2+1$ мм и 1 кристалл $-1+0,5$ мм. При этом в хвостах этой пробы не было найдено ни одного кристалла. Поэтому не исключено, что найденные мелкие алмазы в кимберлитовой руде находились в виде гнездообразного включения и были раздроблены на мелкие алмазы при прохождении технологической цепочки обогатительного комплекса Поморской ГРЗ.

Закключение

Испытания прототипа опытной установки для сухого обогащения кимберлитовой руды методом меченых нейтронов проходили в июле – сентябре 2015 г. на базе обогатительного комплекса Поморской ГРЗ ПАО «Севералмаз». В ходе испытаний было проведено 1416 измерений с кимберлитовой рудой и 281 измерение с имитаторами алмазов, внедренными в кимберлитовую руду разной крупности. Нейтронный генератор отработал 218 ч без каких-либо существенных проблем, как и γ -детекторы. Алгоритм обнаружения алмаза был проверен на большой статистике измерений с имитаторами. Среднее энергопотребление установки составило 500 Вт/ч.

Проведенные испытания полностью подтвердили состоятельность метода меченых нейтронов для обнаружения алмазов и правильность выбранных конструкторских решений. Доказана возможность обнаружения алмазов в руде большой крупности, определены основные производственные характеристики установки.

В настоящее время при поддержке инновационного фонда «Сколково» ведется работа по созданию опытной установки для сухого обогащения кимберлита методом меченых нейтронов про-

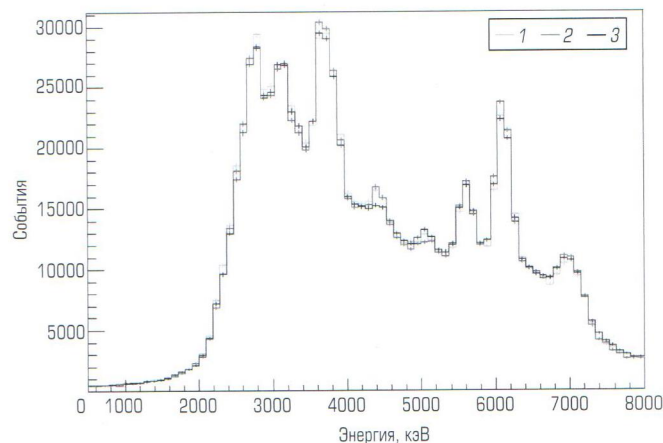


Рис. 4. Энергетические спектры керновой пробы К6062/26 из трубки им. Карпинского-1 (глубина 35–41,5 м) (1), с глубины 41,5–48,5 м (2) и керновая проба 3102/-18-30 из трубки «Архангельская» с глубины 110 м (3)

изводительностью до 30 т/ч. Такая установка может быть использована при разработке отдаленных и беднотоварных алмазных месторождений на борту карьера, а также в условиях подземных горных работ.

Авторы выражают благодарность инновационному фонду «Сколково» и С. А. Журбе за финансовую поддержку при создании прототипа опытной установки; руководству АК «АЛРОСА» (ПАО) И. В. Соболеву, А. С. Чаадаеву, В. А. Карнацкому – за финансовую поддержку проведения испытаний; руководству ПАО «Севералмаз» А. В. Письменному, И. И. Иванову, В. В. Коленченко – за помощь в организации испытаний; сотрудникам ООО «Диамант» Е. А. Андрееву, В. М. Быстрицкому, Н. И. Замятину, Е. В. Зубареву, А. В. Красноперову, П. П. Реунову, А. Б. Садовскому, Р. А. Салмину, В. М. Слепневу, О. Г. Тарасову, С. В. Хабарову, принимавшим участие в создании и испытании установки; сотрудникам ВНИИА им. Н. Л. Духова Е. П. Боголюбову, Ю. К. Преснякову, В. И. Рыжкову, Т. О. Хасаеву и Д. И. Юркову – за создание нейтронного генератора с уникальными параметрами; сотрудникам ПАО «Севералмаз» Р. Р. Гарифуллину и Л. Н. Бурмистровой – за постоянную помощь при проведении испытаний.

Библиографический список

1. Чантурия В. А., Бондарь С. С., Годун К. В., Горячев Б. Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира // Горный журнал. 2015. № 2. С. 55–58. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.10
2. Чантурия В. А., Годун К. В., Желябовский Ю. Г., Горячев Б. Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира (часть 2). // Горный журнал. 2015. № 3. С. 67–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.03.11
3. Никитин Г. М., Чаадаев А. С., Соболев И. В. Разработка инновационных технологий добычи и обогащения алмазов в АК «АЛРОСА» (ПАО) // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2012. № 12. С. 24–27.
4. Макарский И. В., Бондаренко И. Ф., Адодин Е. И. Оценка степени техногенного воздействия на сохранность алмазной продукции // Обогащение руд. 2012. № 3. С. 23–25.
5. Устинов В. Н., Митяхин С. И. Месторождение им. М. В. Ломоносова: геологическое строение и алмазоносность // Горный журнал. 2012. № 7. С. 18–24.
6. Карнацкий В. А., Савицкий Л. В., Имангулов С. В., Бондаренко И. Ф., Тимошенко Н. В. Повышение качества товарной продукции АК «АЛРОСА» за счет улучшения технологии раскрытия алмазов // Обогащение руд. 2012. № 6. С. 13–17.
7. Матвеев А. И., Львов Е. С., Осипов Д. А. Обоснование применения дробилки комбинированного ударного действия ДКД-300 в схеме сухого обогащения кимберлитовых руд

трубки «Зарница» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 107–115.

8. Hawkins P. O., Sutton R. W. Compact Pulsed Generator of Fast Neutrons // Review of Scientific Instruments. 1960. Vol. 31. P. 241–248.
9. Pesente S., Nebbia G., Lunardon M., Viesti G., Sudac D. et al. Detection of hidden explosives by using tagged neutron beams with sub-nanosecond time resolution // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. 2004. Vol. 531. Iss. 3. P. 657–667.
10. Kanawati W. El, Perot B., Carasco C., Eleon C., Valkovic V. et al. Conversion factors from counts to chemical ratios for the EURITRACK tagged neutron inspection system // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. 2011. Vol. 654. Iss. 1. P. 621–629.
11. Kanawati W. El, Perot B., Carasco C., Eleon C., Valkovic V. et al. Acquisition of prompt gamma-ray spectra induced by 14 MeV neutrons and comparison with Monte Carlo simulations // Applied Radiation and Isotopes. 2011. Vol. 69. Iss. 5. P. 732–743.
12. Bystritsky V. M., Gerasimov V. V., Kadyshovsky V. G., Kobzev A. P., Nozdryn A. A. et al. DVIN – stationary setup for identification of explosives // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5. № 5. С. 743–751.
13. Быстрицкий В. М., Замятин Н. И., Зубарев Е. В., Рапакский В. Л., Розов Ю. Н. и др. Стационарная установка для обнаружения взрывчатых веществ на основе метода меченых нейтронов // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10. № 5. С. 722–729.

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 5, pp. 58–62
DOI: 10.17580/gzh.2018.05.08

Application of the tagged neuron method to dry processing of kimberlite

Information about authors

Yu. N. Rogov¹, Head of Programming Engineer Department, yury.rogov@cern.ch
M. G. Sapozhnikov¹, Research Manager, Professor, Doctor of Physico-Mathematical Sciences
G. M. Nikitin², Head of Center for Innovations and Technologies
A. V. Yamov³, Deputy Head of Production and Engineering Department

¹ Diamant, Dubna, Russia
² Yakutniproalmaz, ALROSA, Mirny, Russia
³ Severalmaz, Arkhangelsk, Russia

Abstract

The results of tests of a pilot unit for diamond detection in kimberlite are discussed. The pilot unit operation is based on the tagged neuron method, which allows detecting diamond inside kimberlite without disintegration.

The key point of the technique is irradiation of ore with fast 14.1 MeV neutrons which, by inelastic scattering reaction, produce gamma-rays unique for each element the ore consists of. A diamond is detected in ore by carbon excess in a selected volume of kimberlite sample. The source of neutrons was a portable neuron generator which formed 192 neuron beams. The beams divided the measurement zone into 192 subzones 8×8 mm in size, and characteristic gamma-rays were collected by a system of 14 gamma-detectors.

The field tests held at the processing plant of SEVERALMAZ Pomorskaya Geological Exploration proved detectability of diamonds in ore grains 10 times larger than diamonds. The major characteristics of the plant were determined as diamond detectability of 97%, error probability of 7% and concentrate yield of 3%.

At the moment, with support from Skolkovo Foundation, engineering of a pilot unit for dry kimberlite concentration by the tagged neuron method with a planned capacity up to 20 tph is in process.

The authors express their deep gratitude to Skolkovo Foundation and S. A. Zhurba for the financial support of the pilot unit engineering; ALROSA management represented by I. V. Sobolev, A. S. Chaadaev and V. A. Karnatsky for the support of the performance of tests; SEVERALMAZ management represented by A. V. Pismenny, I. I. Ivanov and V. V. Kolenchenko for the assistance in the testing activities; Diamant company staff members E. A. Andreev, V. M. Bystritsky, N. I. Zamyatin, E. V. Zubarev, A. V. Krasnoperov, P. P. Reunov, A. B. Sadovsky, R. A. Salmin, V. M. Slepnev, O. G. Tarasov and S. V. Khabarov for the participation in the pilot unit engineering and trials; Dukhov Research Institute of Automatics members E. P. Bogolyubov, Yu. K. Presnyakov, V. I. Ryzhkov, T. O. Khasaev and D. Yu. Yurkov for the creation of the unique neuron generator; SEVERALMAZ members R. R. Garifullin and L. N. Burmistrova for the relentless support and advice in the testing activities.

Keywords: tagged neuron method, dry processing of kimberlite, detection of diamonds, portable neuron generator, alpha-detector, gamma-detectors.

References

1. Chanturia V. A., Bondar S. S., Godun K. V., Goryachev B. E. Diamond industry in Russia and in the world's top diamond producing countries: State-of-the-art. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 2. pp. 55–58. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.10

2. Chanturia V. A., Godun K. V., Zhelyabovskiy Yu. G., Goryachev B. E. State-of-the-art of the diamond industry in Russia and in world's top diamond-producing countries (Part 2). *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 3. pp. 67–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.03.11
3. Nikitin G. M., Chaadaev A. S., Sobolev I. V. Innovation technologies for extraction and treatment of diamonds at ALROSA. *Vserossiiskii ekonomicheskii zhurnal EKO*. 2012. No. 12. pp. 24–27.
4. Makarskiy I. V., Bondarenko I. F., Adonin Ye. I. Production-induced damage estimation with regard to preservation of salable diamonds. *Obogashchenie rud*. 2012. No. 3. pp. 23–25.
5. Ustinov V. N., Mityukhin S. I. M. V. Lomonosov deposit: preconditions of diamond containing and geological structure. *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 7. pp. 18–24.
6. Karnatskiy V. A., Savitskiy L. V., Imangulov S. V., Bondarenko I. F., Timoshenko N. V. The “ALROSA” marketable products’ quality increase through improvement of technology of diamonds liberation. *Obogashchenie rud*. 2012. No. 6. pp. 13–17.
7. Matveev A. I., L'vov E. S., Osipov D. A. Use of the Combined Impact Crusher DKD-300 in the Dry Concentration Scheme at Zarnitsa Kimberlite Pipe. *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49, No. 4. pp. 604–610.
8. Hawkins P. O., Sutton R. W. Compact pulsed generator of fast neutrons. *Review of Scientific Instruments*. 1960. Vol. 31. pp. 241–248.
9. Pesente S., Nebbia G., Lunardon M., Viesti G., Sudac D. et al. Detection of hidden explosives by using tagged neutron beams with sub-nanosecond time resolution. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*. 2004. Vol. 531, Iss. 3. pp. 657–667.
10. Kanawati W. El, Perot B., Carasco C., Eleon C., Valkovic V. et al. Conversion factors from counts to chemical ratios for the EURITRACK tagged neutron inspection system. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*. 2011. Vol. 654, Iss. 1. pp. 621–629.
11. Kanawati W. El, Perot B., Carasco C., Eleon C., Valkovic V. et al. Acquisition of prompt gamma-ray spectra induced by 14 MeV neutrons and comparison with Monte Carlo simulations. *Applied Radiation and Isotopes*. 2011. Vol. 69, Iss. 5. pp. 732–743.
12. Bystritsky V. M., Gerasimov V. V., Kadyshovsky V. G., Kobzev A. P., Nozdryn A. A. et al. DVIN – stationary setup for identification of explosives. *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei Letters*. 2008. Vol. 5, No. 5. pp. 743–751.
13. Bystritsky V. M., Zamyatin N. I., Zubarev E. V., Rapatskiy V. L., Rogov Yu. N. et al. Stationary Setup for Identifying Explosives Using the Tagged Neutron Method. *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei Letters*. 2013. Vol. 10, No. 5. pp. 722–729.
14. Aleksakhin V. Yu., Bystritsky V. M., Zamyatin N. I., Zubarev E. V., Krasnoperov A. V. et al. Detection of diamonds in kimberlite by the tagged neutron method. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*. 2015. Vol. 785. pp. 9–13.
15. Valkovic V., Sudac D., Obhodas J., Eleon C., Perot B. et al. The use of alpha particle tagged neutrons for the inspection of objects on the sea floor for the presence of explosives. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*. 2013. Vol. 703. pp. 133–137.
16. Valkovic V. 14 MeV Neutrons: Physics and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2015. 516 p.
17. Bogolyubov E. P., Gavryuchenkov A. V., Karetnikov M. D., Yurkov D. I., Ryzhkov V. I., Zverev V. I. Neutron generators and DAQ systems for tagged neutron technology. *Proceedings of XXVI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017)*. Budva, 2017. pp. 176–181.
18. Kurneva M. V., Vishnyakov J. D., Kiseleva S. P. Methodological approach to assessment of ecological and economic efficiency of reproduction of mineral raw material base of diamonds. *Eurasian Mining*. 2015. No. 2. pp. 21–25. DOI: 10.17580/em.2015.02.06