

УДК 621.384.66+539.1.07

## Графитовые мишени для экспериментов по обнаружению азотосодержащих веществ методом гамма-резонансного поглощения

А. В. Бурдаков, А. С. Кузнецов, Б. Ф. Баянов, В. Т. Астрелин, К. И. Меклер, Ю. С. Суляев

*Данная работа является развитием исследований по обнаружению взрывчатых веществ при помощи резонансного поглощения гамма-квантов на ядрах азота. Представлены конструкции, результаты расчётов и испытаний новых мишеней для генерации резонансных гамма-квантов в реакции  $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ : тонкой мишени, предназначенной для генерации монохроматического излучения с энергией 9,17 МэВ, и толстой подвижной мишени, охлаждаемой излучением и предназначенной для работы с мощным пучком протонов.*

PACS: 29.20.-c

*Ключевые слова:* обнаружение взрывчатых веществ, гамма-резонансное поглощение, ускоритель-тандем, графитовые мишени.

### Введение

В данной работе основной целью проводимых исследований является проверка принципиальной возможности обнаружения взрывчатых веществ по методу резонансного поглощения гамма-квантов на ядрах азота, реализуемого на базе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией [1].

подавляющее большинство промышленно изготавливаемых взрывчатых веществ содержит в себе повышенную концентрацию азота. Корреляция содержания азота и плотности вещества позволяет отличать группы взрывчатых и наркотических веществ от распространённых бытовых материалов [2]. Обнаружение азота в веществе возможно при помощи резонанса поглощения гамма-квантов с энергией 9,17 МэВ в реакции  $^{14}\text{N}(\gamma, p)^{13}\text{C}$ , обладающего малой энергетической шириной и высоким сечением захвата. Сравнение спектров резонансного и нерезонансного излу-

чения, прошедшего сквозь изучаемый объект, позволяет определить наличие взрывчатых веществ [3—6].

Генерацию гамма-квантов с требуемой энергией предлагается осуществлять при помощи реакции  $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ . Для осуществления этой реакции необходим протонный пучок с энергией 1,75 МэВ и током на уровне нескольких миллиампер, при этом особые требования предъявляются к энергетическому и угловым разбросам частиц пучка [4]. Эти требования делают привлекательным использование в качестве источника излучения компактного электростатического ускорителя, разработанного в ИЯФ СО РАН для осуществления борнейтронозахватной терапии злокачественных опухолей и ряда других приложений [7].

В ходе первых экспериментов [1, 8] были разработаны толстые графитовые мишени, обогащённые изотопом углерода  $^{13}\text{C}$ , реализована схема регистрации гамма-квантов, продемонстрирована генерация и возможность измерения резонансного ослабления излучения на азотной мишени. Для развития метода были спроектированы и изготовлены новые мишени, а именно, тонкая мишень, предназначенная для генерации монохроматического излучения с энергией 9,17 МэВ, и толстая подвижная мишень, охлаждаемая излучением, предназначенная для работы с протонным пучком высокой мощности.

При проектировании учитывался имеющийся в ИЯФ СО РАН опыт работы с подобными мишенями [9].

Следует отметить, что развитие данного метода обнаружения может быть распространено и

---

Бурдаков Александр Владимирович, зам. директора.  
Кузнецов Александр Сергеевич, научный сотрудник.  
Баянов Борис Федорович, ведущий инженер.  
Астрелин Виталий Тимофеевич, старший научный сотрудник.  
Меклер Константин Иванович, старший научный сотрудник.  
Суляев Юлий Сергеевич, старший научный сотрудник.  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.  
Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика  
Лаврентьева, 11.  
Тел. 8 (383) 329-47-81. E-mail: A.S.Kuznetsov@inp.nsk.su

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2016 г.

© Бурдаков А. В., Кузнецов А. С., Баянов Б. Ф., Астрелин В. Т., Меклер К. И., Суляев Ю. С., 2016

на хлорсодержащие взрывчатые вещества [2]. Этот шаг, помимо использования специфической мишени и энергии протонов, потребует значительно-го увеличения тока протонного пучка либо времени сканирования. Учитывая тенденции в развитии ускорительной техники, в будущем требуемые параметры пучков могут быть получены, и развиваемый метод может получить более широкое применение.

### Тонкая мишень для генерации гамма-квантов

Поскольку реакция  $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$  имеет несколько резонансов, привлекательно создание тонкой мишени, позволяющей генерировать только спектральную линию с энергией 9,17 МэВ при энергии протонов 1,75 МэВ. Пробег протонов с такой энергией в графите составляет 4 мкм. Толщины графита порядка 0,1—1 мкм оказывается достаточно для генерации резонансных гамма-квантов, в то же время только относительно малая часть энергии протонов будет выделяться в самой мишени. Снижением поглощенной в мишени мощности можно добиться эффективного охлаждения поверхности мишени при помощи теплового излучения, даже если мишень неподвижна.

Естественно, такой мишени необходима подложка, не позволяющая тонкой графитовой плёнке разрушиться под действием собственного веса, а также из-за разницы давлений газа в про-

цессе вакуумной откачки камеры. В качестве подложки предложено использовать танталовую фольгу, учитывая механическую стойкость тантала и его стойкость при облучении протонным пучком. Протоны, проходящие сквозь такую мишень, будут далее поглощаться в коллекторе, который может располагаться на некотором удалении от мишени и быть закрытым радиационной защитой. Использование такого коллектора позволит снизить уровень гамма-излучения с нерезонансными энергиями квантов и улучшить контрастность сканирования. Крепление мишени может осуществляться в охлаждаемой водой рамке, идентичной используемой для крепления толстых мишеней [8].

Для оперативной смены отработавшей мишени без вскрытия вакуумной камеры можно использовать барабан с несколькими мишенями.

Расчёт поглощённой в мишени энергии выполнен с помощью кода SRIM [10], предназначенного для численного моделирования рассеяния ионов в различных материалах. Модель мишени представляла собой тонкий слой графита толщиной 0,5 мкм, нанесённый на танталовую фольгу толщиной 5 мкм. Расчёт показывает (см. рис. 1), что в слое графита протоны теряют всего 0,7 % своей энергии, а в танталовой подложке — 28 %. Таким образом, суммарные потери энергии в мишени составляют величину  $\sim 30\%$  от полной энергии протонов, в то время как остальные  $\sim 70\%$  энергии поглощаются в коллекторе.

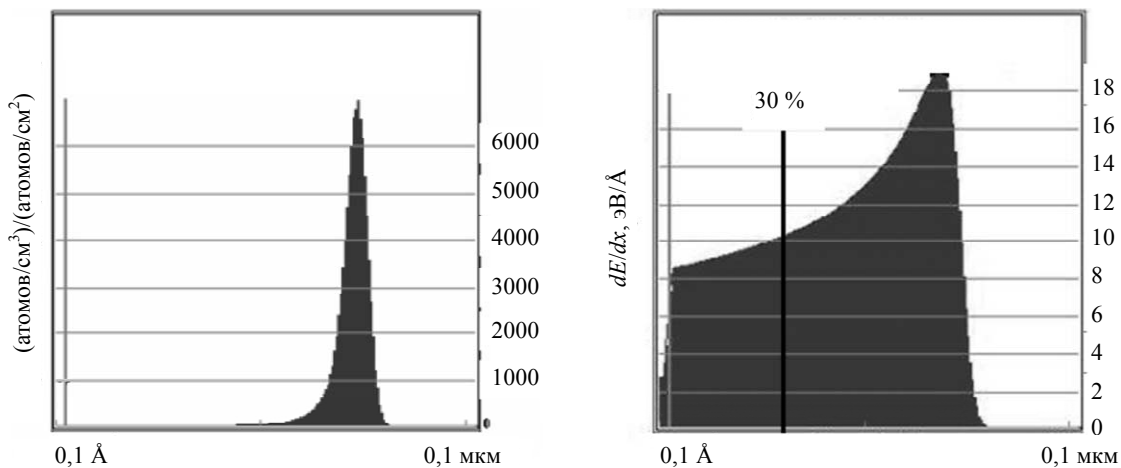


Рис. 1. Пробеги протонов (слева) и распределение энергии ионных потерь (справа) в тонкой мишени, состоящей из 0,5 мкм графита на толстой танталовой подложке.

При оценке способности мишени переизлучать выделяемую в ней энергию, следует принять во внимание различную степень черноты поверхностей графита ( $\epsilon_1 = 0,85$ ) и тантала ( $\epsilon_2 = 0,3$ ). При температуре  $T = 2100$  К плотность мощности излучения тонкой мишени составит  $W_{\text{emit}} = 127$  Вт/см<sup>2</sup>. Это

соответствует допустимой плотности мощности протонного пучка  $W_p = W_{\text{emit}}/0,3 \sim 420$  Вт/см<sup>2</sup>, что, в свою очередь, соответствует плотности тока 0,24 мА/см<sup>2</sup> при энергии пучка 1,75 МэВ.

В соответствии с расчётной моделью экспериментальная мишень была изготовлена при по-

мощи метода лазерной абляции, разработанного в ИЯФ СО РАН [11]. В составе мишени использовались изотопы углерода  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  в равных долях. Мишень проработала в эксперименте 100 минут при значениях энергии и тока пучка 1,75 МэВ и 0,2 мА, и сохранила работоспособность, несмотря на некоторые деформации (рис. 2). Полученная мишенью доза облучения составила  $0,89 \times 10^{19}$  ионов/см $^2$ . Характерный размер пучка на мишени составил  $\sim 20$  мкм.

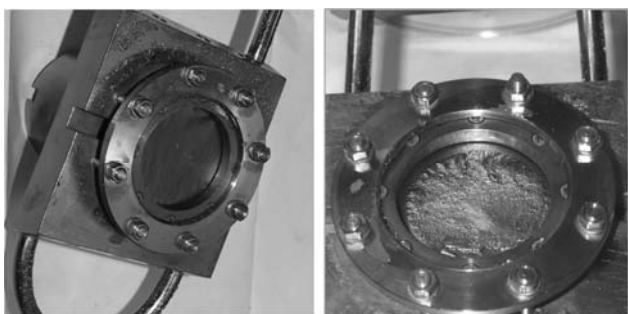


Рис. 2. Фотографии тонкой мишени до и после эксперимента.

### Определение температуры тонкой мишени

Как было показано в [8], скорость разрушения мишени зависит от её температуры. Наиболее благоприятные температуры находятся в диапазоне 1100—2100 К, при этом скорость разрушения мишени может достигать 0,5 мкм в сутки. Благодаря тому, что тонкая мишень охлаждается тепловым излучением, возможно оценить температуру её поверхности по яркости свечения, сравнимой с яркостью калиброванной лампы.

Схема эксперимента и результат обработки регистрируемого изображения представлены на рис. 3. Видеокамера установлена таким образом, чтобы регистрировать свечение мишени через вакуумное окно. При помощи зеркала в поле зрения видеокамеры попадает лампа, температура свечения нити которой измерена заранее при помощи пирометра и составляет 2950 К. Дистанция светового пути от лампы до видеокамеры совпадает с дистанцией от мишени до видеокамеры. Предполагается, что видеокамера обладает линейной чувствительностью к яркости излучения.

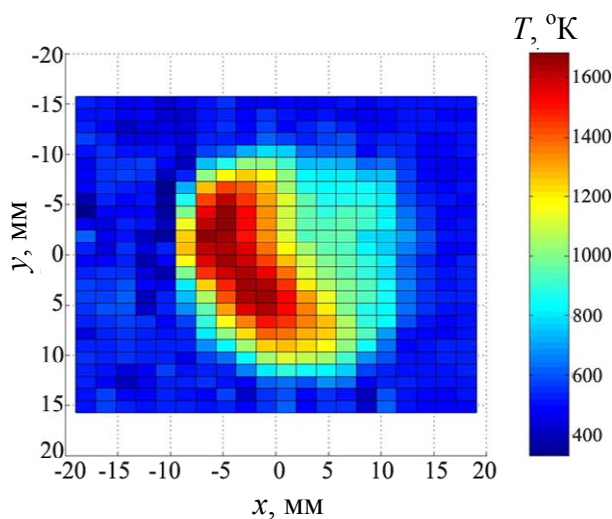
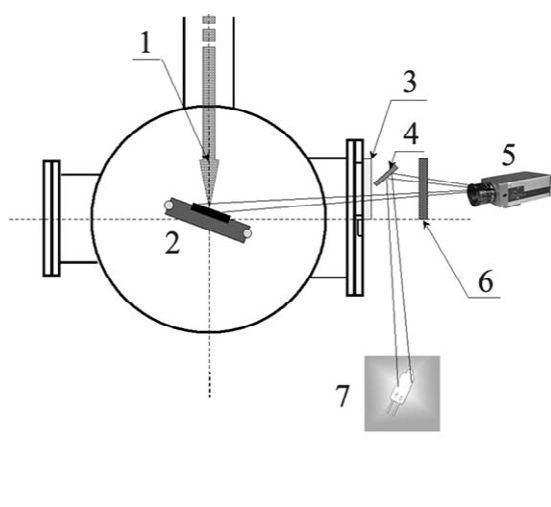


Рис. 3. Схема эксперимента по определению температуры тонкой мишени (слева) и температурный профиль мишени, восстановленный по изображению на видеокамере (справа). 1 — протонный пучок, 2 — мишень, 3 — вакуумное окно, 4 — зеркало, 5 — видеокамера, 6 — светофильтр, 7 — лампа с температурой 2950 К.

Во время эксперимента по определению температуры мишени плотность тока пучка составляла 0,17 мА/см $^2$ , энергия протонов — 1800 кэВ, плотность мощности — 0,31 кВт/см $^2$ . Расчётное значение температуры мишени при таких параметрах пучка — 1800 К, максимальная температура, полученная в ходе измерений, составила  $1700 \pm 200$  К. Таким образом, можно ожидать, что при сохранении величины тока пучка полное время работы такой мишени может достигать одних суток.

### Подвижная мишень, охлаждаемая излучением

Стационарные мишени работали в экспериментах при токах пучка, не превышавших 400—500 мкА. Для работы с большими токами необходимо создать подвижную мишень. С учётом существующей геометрии тракта пучка и сложности обеспечения охлаждения возможной вращающейся конструкции, было принято решение создать толстую мишень, совершающую одномерные вертикальные колебания. Если при этом принять допустимой скоростью испарения графита 500 мкм в

сутки, то рабочую температуру мишени можно тогда увеличить до 2500 К, при которой основным механизмом отдачи тепла станет излучение.

При моделировании температурного режима работы мишени предполагалось, что диаметр пучка  $2R_0 = 3$  см, максимальная плотность мощности в центре пучка  $W_{\max} = 2,47$  кВт/см<sup>2</sup>, полная мощность пучка —  $P_0 = 8,75$  кВт, соответствующая току 5 мА. Колебания мишени совершаются с амплитудой 4,5 см при частотах 0,2 Гц и 1 Гц. Рассматривался как вариант плохого теплового контакта графита с рамкой крепления, при котором охлаждение мишени осуществляется только излучением, так и вариант хорошего крепления, при котором действует дополнительное охлаждение через контакт графита с подложкой, охлаждаемой водой.

Для случая охлаждения только излучением, максимальная локальная температура в точках остановки мишени достигает значения  $T \sim 3500$  К при частоте колебаний  $f = 0,2$  Гц, и  $T \sim 3200$  К при частоте  $f = 1$  Гц на короткое время  $t \sim 0,2/f$  и снижается в середине мишени до 2700 К и до 2300 К соответственно. Усреднённая по времени температура краёв мишени  $\langle T \rangle \sim 2700$  К и середины мишени  $\langle T \rangle \sim 2300$  К. Скорость испарения графита в таких условиях превысит 10 мм в сутки, что однозначно говорит о необходимости комбинированного охлаждения.

В случае применения дополнительного водяного охлаждения, при частоте движения мишени  $f = 0,2$  Гц, наибольшая температура на краях мишени практически такая же, как и в предыдущем случае, а в середине мишени она заметно ниже:  $T \sim 2200$  К. При частоте движения  $f = 1$  Гц максимальные температуры составляют 1700 и 2500 К, что позволяет стабильно работать при скорости испарения около 10—100 мкм в день.

Основным элементом сконструированной подвижной мишени является медная рамка с зафиксированными в ней кусочками графита. В медную рамку впаяны трубки для охлаждения мишени водой. Трубки для ввода и вывода воды заключены одна в другую, и введены в вакуум через стандартный сильфон производства компании Standard Bellows Company. Сильфон позволяет качать мишень в вертикальном направлении и имеет ресурс до  $10^6$  циклов при проектной частоте качания 1 Гц. Проектная амплитуда качания 10 см. По обеим сторонам подвижной рамки с графитом установлены изготовленные из меди неподвижные коллекторы теплового излучения, в которых предусмотрены отверстия для прохождения протонного пучка. Оба коллектора охлаждаются водой. Для движения мишени используется стандартный электромотор, предназначенный для работы с ва-

куумными задвижками и сопряжённый с червячным редуктором, вращающим кривошипно-кулисный механизм, крепящийся на специальной рамке. Двигатель обеспечивает движение мишени с периодом 5 с и максимальной амплитудой 52 мм.

Для испытаний мишень была снаряжена брусочками прессованного мелкозернистого графита марки МПГ-6 без обогащения изотопом <sup>13</sup>C. При длительном облучении мишени током до 500 мкА никаких существенных повреждений поверхности не выявлено. На рис. 4 показана фотография мишени после испытаний током пучка 1,6—1,8 мА в течение часа. Видны области быстрого испарения графита (глубина испарённых областей ~0,5 мм), которые соответствуют точкам остановки мишени в высшей и низшей позиции. При этом в области нормального движения мишени заметных повреждений поверхности не выявлено.



Рис. 4. Подвижная мишень после испытаний мощным протонным пучком.

### Заключение

Разработаны, созданы и апробированы в экспериментах графитовые мишени, предназначенные для работы с мощным протонным пучком и генерации монохроматических гамма-квантов с энергией 9,17 МэВ в реакции <sup>13</sup>C(p,γ)<sup>14</sup>N для проведения исследований по их резонансному поглощению на ядрах азота.

Разработанная тонкая графитовая мишень на танталовой подложке, несмотря на деформации, сохраняет работоспособность до флюенса  $0,89 \times 10^{19}$  ионов/см<sup>2</sup> при её облучении протонным пучком энергией 1,75 МэВ с током 0,2 мА. Температурный режим мишени соответствует благоприятному, и время её эксплуатации может достигать одних суток.

Для возможности применения протонного пучка с током более 1 мА разработана подвижная охлаждаемая водой толстая графитовая мишень, совершающая одномерные осцилляции с частотой 1 Гц. При испытаниях мишени током 1,8 мА отмечены небольшие разрушения в крайних точках движения.

Использование разработанных мишеней позволит выполнить исследования по генерации и последующему резонансному поглощению гамма-

квантов на ядрах азота, представляющие практический интерес в качестве способа автоматического, бесконтактного и неразрушающего обнаружения азотосодержащих (взрывчатых) веществ, а также как метод калибровки энергии ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, предназначенного для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А. С., Бельченко Ю. И., Бурдаков А. В., Давыденко В. И., Донин А. С., Иванов А. А., Константинов С. Г., Кривенко А. С., Кудрявцев А. М., Меклер К. И., Санин А. Л., Сорокин И. Н., Суляев Ю. С., Широков В. В., Эйдельман Ю. И. // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования". 2008. Т. 49. № 3. С. 187.
2. Sredniawski J. J. Detecting Concealed Explosives with Gamma Rays. In Book: The Industrial Physicist, American Institute of Physics, March 1997. P. 24—27.
3. Goldberg M. B., Vartsky D., et al. Informal Proposal. Soreq Nuclear Research Center, Yavne, Israel. December 1985.
4. Morgado R. E., Cappiello C. C., Dugan M. P., Golding C. A., Gardner S. D., Hollas C. L., Berman B. L., Hamm R. W., Crandall K. R., Potter J. M., and Krauss R. A. The Effects of Proton-Beam Quality on the Production of Gamma Rays for Nuclear Resonance Absorption in Nitrogen — Los Alamos National Laboratory document LAUR-93-3588. October 1993.
5. Hannah S. S., Meyer-Schutzmeister L. // Physical Re-

view. 1959. Vol. 115. P. 4.

6. Kwan T. J. T., Morgado R. E., Wang Tai-Sen F., Vodolaga B., Terekhin V., Onischenko L. M., Vorozhtsov S. B., Samsenov E. V., Vorozhtsov A. S., Alenitsky Yu. G., Perpelkin E. E., Glazov A. A., Novikov D. L., Parkhomchuk V., Reva V., Vostrikov V., Mashinin V. A., Fedotov S. N., and Minayev S. A.. Detection of Explosives Using Nuclear Resonance Absorption of Gamma Rays in Nitrogen: A Russian/US Collaboration / NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. 2008. P. 97.

7. Belchenko Yu., Burdakov A., Davydenko V., et al. Status of BINP proton tandem-accelerator for explosive detection by NRA method and for boron neutron-capture therapy / Proc. of the 19th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry. Fort Worth, Texas USA. August 20—25, 2006.

8. Kuznetsov A. S., Belchenko Yu. I., Burdakov A. V., Davydenko V. I., Donin A. S., Ivanov A. A., Konstantinov S. G., Krivenko A. S., Kudryavtsev A. M., Mekler K. I., Sanin A. L., Sorokin I. N., Sulyaev Yu. S., Taskaev S. Yu., Shirokov V. V., Eidelman Yu. I. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2009. Vol. A606. P. 238.

9. Antoshin A., Avilov M., Blinov M., Bolkhovityanov D., Golikov V., Gubin K., Kholopov M., Lebedev N., Logachev P., Popov V., Shiyankov S., Tsyganov A., Zhul I. / Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy. P. 265—267.

10. Ziegler J. F., Biersack J. P., and Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids — Pergamon Press, New York, 1985.

11. Chkhalo N. I., Fedorchenko M. V., Kovalenko N. V., Kruglyakov E. P., Volokhov A. I., Chernov V. A., Mytnichenko S. V. // Nucl. Instrum. & Meth. 1995. Vol. A359. P. 121.

## Graphite targets for experiments on GRA detection of nitrogen containing materials

A. V. Burdakov, A. S. Kuznetsov, B. F. Bayanov, V. T. Astrelin, K. I. Mekler, and Yu. S. Sulyaev

Budker Institute of Nuclear Physics  
11 Academica Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: A.S.Kuznetsov@inp.nsk.su

Received April 15, 2016

***This paper presents the development of the research on explosives detection using GRA on nitrogen nuclei. New graphite targets were designed, constructed and tested to generate resonance gammas in  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  reaction. The thin target is designed to generate monochromatic 9.17 MeV gammas and the thick moving target with radiation cooling is designed to operate with high power proton beam at Vacuum Insulated Tandem-Accelerator.***

PACS: 29.20.-c

**Keywords:** explosives detection, gamma-resonance absorption, tandem-accelerator, graphite target.

## REFERENCES

1. A. S. Kuznetsov, Yu. I. Belchenko, A. V. Burdakov, V. I. Davydenko, A. S. Donin, A. A. Ivanov, S. G. Konstantinov, A. S. Krivenko, A. M. Kudryavtsev, K. I. Mekler, A. L. Sanin, I. N. Sorokin, Yu. S. Sulyaev, V. V. Shirokov, and Yu. I. Eidelman. Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations **49** (3), 187 (2008).

2. J. J. Sredniawski, *Detecting Concealed Explosives with Gamma Rays* In Book: *The Industrial Physicist*, (American Institute of Physics, March 1997), pp. 24-27.
3. M. B. Goldberg D. Vartsky, et al., *Informal Proposal*. (Soreq Nuclear Research Center, Yavne, Israel. December 1985).
4. R. E. Morgado, C. C. Cappiello, M. P. Dugan, C. A. Golding, S. D. Gardner, C. L. Hollas, B. L. Berman, R. W. Hamm, K. R. Crandall, J. M. Potter, and R.A. Krauss. *The Effects of Proton-Beam Quality on the Production of Gamma Rays for Nuclear Resonance Absorption in Nitrogen* (Los Alamos National Laboratory document LAUR-93-3588. October 1993).
5. S. S. Hannah and L. Meyer-Schutzmeister, *Physical Review* **115**, 4 (1959).
6. T. J. T. Kwan, R. E. Morgado, Tai-Sen F. Wang, B. Vodolaga, V. Terekhin, L. M. Onischenko, S. B. Vorozhtsov, E. V. Samsonov, A. S. Vorozhtsov, Yu. G. Alenitsky, E. E. Perpelkin, A. A. Glazov, D. L. Novikov, V. Parkhomchuk, V. Reva, V. Vostrikov, V. A. Mashinin, S. N. Fedotov, and S. A. Minayev. *Detection of Explosives Using Nuclear Resonance Absorption of Gamma Rays in Nitrogen: A Russian/US Collaboration*. (NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. 2008). P. 97.
7. Yu. Belchenko, A. Burdakov, V. Davydenko, et al., *Status of BINP proton tandem-accelerator for explosive detection by NRA method and for boron neutron-capture therapy*. In *Proc. of the 19th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry*. (Fort Worth, Texas USA. August 20–25, 2006).
8. A. S. Kuznetsov, Yu. I. Belchenko, A. V. Burdakov, V. I. Davydenko, A. S. Donin, A. A. Ivanov, S. G. Konstantinov, A. S. Krivenko, A. M. Kudryavtsev, K. I. Mekler, A. L. Sanin, I. N. Sorokin, Yu. S. Sulyaev, S.Yu. Taskaev, V. V. Shirokov, and Yu. I. Eidelman, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research* **A606**, 238 (2009).
9. A. Antoshin, M. Avilov, M. Blinov, D. Bolkhovityanov, V. Golikov, K. Gubin, M. Kholopov, N. Lebedev, P. Logachev, V. Popov, S. Shiyankov, A. Tsyganov, and I. Zhul. In *Proceedings of EPAC08* (Genoa, Italy), pp. 265—267.
10. J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids* (Pergamon Press, New York, 1985)
11. N. I. Chkhalo, M. V. Fedorchenko, N. V. Kovalenko, E. P. Kruglyakov, A. I. Volokhov, V. A. Chernov, and S. V. Mytnichenko, *Nucl. Instrum. & Meth.* **A359**, 121 (1995).