

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЧЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ ПОД ВОДОЙ

*В. Ю. Алексахин, В. М. Быстрицкий, Н. И. Замятин, Е. В. Зубарев,
А. В. Красноперов, В. Л. Рапацкий, А. В. Рогачев¹, Ю. Н. Рогов,
А. Б. Садовский, А. В. Саламатин, М. Г. Сапожников, В. М. Слепнев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты исследования возможности применения метода меченых нейтронов (ММН) для обнаружения опасных веществ, скрытых в объектах под водой. Представлено теоретическое обоснование применимости ММН для решения указанных задач. Определены основные характеристики опытного образца детектора для обнаружения взрывчатых веществ в водной среде.

The paper presents results of investigation of possible application of tagged neutron technique for detection of dangerous substances hidden underwater. Theoretical justification is given to applicability of tagged neutron technique for solving mentioned problems. General capabilities of prototype detector for underwater explosives detection are evaluated.

PACS: 07.85.Fv; 29.40.-n; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Задача обнаружения скрытых опасных веществ (взрывоопасных, радиоактивных и сильнодействующих ядовитых) в подводных объектах весьма актуальна как в плане антитеррористической деятельности, так и в плане поиска возможных источников загрязнения водной акватории океанов, морей и рек.

Для поиска скрытых веществ в различных средах наибольшей достоверностью полученных результатов обладают системы, основанные на прямых методах обнаружения. Это, прежде всего, относится к различным устройствам, использующим, например, методы химического анализа вещества и метод, в основе которого лежит явление ядерного квадрупольного резонанса. Однако применение указанных методов весьма ограничено — наличие герметично упакованной или непроницаемой металлической оболочки делает невозможным обнаружение скрытых опасных веществ. В таких случаях необходимо применение таких методов обнаружения, в основе которых лежит использование излучения,

¹E-mail: rogachev@nf.jinr.ru

обладающего высокой проникающей способностью и характерными признаками взаимодействия его с химическими элементами.

Одной из разработок детектора для идентификации отравляющих, взрывчатых и радиоактивных веществ в подводных объектах, использующего проникающее нейтронное излучение, является комплекс «Варяг-ЧС» (ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова) [1–4]. Действие комплекса основано на ядерно-физическом методе нейтронного активационного анализа (ТНА — thermal neutron analysis) под действием тепловых нейтронов. К недостаткам использования последнего можно отнести отсутствие информации о пространственном расположении скрытого объекта и достаточно высокий уровень фонового излучения.

Метод меченых нейтронов (ММН) [5, 6], на наш взгляд, является одним из наиболее эффективных методов поиска скрытых веществ в различных средах. Данное утверждение основано на совокупности результатов, полученных нами при детальном исследовании ММН, разработке и создании целого ряда стационарных и передвижных устройств, базирующихся на использовании ММН [5, 7–10]. В основе метода быстрых меченых нейтронов лежат следующие физические принципы. Исследуемый объект облучается нейтронами с энергией 14,1 МэВ, образующимися в бинарной реакции $d + t \rightarrow \alpha + n$. В результате реакции неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах вещества облучаемого объекта (реакция $A(n, n'\gamma)A$) образуются γ -кванты с характерной энергией для каждого из химических элементов, входящих в состав данного вещества.

Спектры зарегистрированного характеристического гамма-излучения содержат информацию об элементном составе облучаемого вещества, а также о количественном их содержании. Для взрывчатых веществ соотношения между собой концентраций ядер азота, кислорода и углерода (N/O, C/O, N/C) отличаются от аналогичных соотношений для большинства обычных веществ.

В эксперименте, кроме детектирования характеристического гамма-излучения, измеряется временной интервал между моментами регистрации альфа-частицы и гамма-кванта. Этот интервал определяет координату точки рождения гамма-кванта внутри облучаемого объекта вдоль направления движения меченого нейтрона. Чувствительные элементы (пиксели) кремниевого альфа-детектора регистрируют альфа-частицу, сопутствующую вылетевшему из тритиевой мишени нейтрону. Номер пикселя альфа-детектора, с учетом соотношения расстояний от тритиевой мишени до альфа-детектора и до объекта облучения, определяет координаты точки взаимодействия меченого нейтрона с веществом объекта в плоскости, перпендикулярной направлению его движения. Таким образом, с помощью ММН определяется трехмерное положение скрытого объекта в пространстве. Использование многопиксельного альфа-детектора позволяет выделять независимые пучки меченых нейтронов в количестве, равном числу пикселей альфа-детектора. Каждый меченый пучок нейтронов облучает вполне определенную область исследуемого объекта — воксель. Размеры вокселя в плоскости, перпендикулярной направлению движения нейтрона, определяются размерами соответствующего пикселя альфа-детектора, а в направлении движения меченого нейтрона — временным разрешением системы (альфа–гамма)-совпадений. Анализ спектра гамма-излучения производится в каждом элементе объема.

Применение ММН для обнаружения скрытых взрывчатых веществ по сравнению с другими методами идентификации (применение рентгеновского и инфракрасного излучения, активационный анализ, анализ на тепловых нейтронах, метод квазиуглового

ядерного резонанса) имеет целый ряд преимуществ, среди которых:

- получение информации о трехмерном положении объекта за одно измерение;
- чувствительность к элементному составу вещества;
- высокая проникающая способность быстрых нейтронов — до 1–1,5 м;
- улучшение соотношения эффект/фон более, чем в 200 раз, по сравнению с отсутствием мечения.

Метод меченых нейтронов для обследования подводных опасных объектов был протестирован в проекте UnCoSS [11, 12]. Проект выполнялся консорциумом академических и промышленных партнеров из стран Европы и США.

1. ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ММН

Для оценки возможности использования метода меченых нейтронов для обнаружения взрывчатых веществ в объектах, находящихся под водой, выполнены расчеты характеристик системы (альфа–гамма)-совпадений при определенных значениях эффективности регистрации характеристического ядерного гамма-излучения и интенсивности потока нейтронов.

Расчеты выполнялись с использованием программного пакета GEANT4 [13], предназначенного для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло. В данном программном пакете процессы взаимодействия нейтронов с энергией меньше 20 МэВ с высокой точностью описываются использованием модуля нейтрон-ВТ [14]. При вычислении вероятности и типа взаимодействия нейтронов с веществом (упругое рассеяние, неупругое рассеяние, развал ядра, радиационный захват и др.) были использованы библиотеки данных ENDF (Evaluated Nuclear Data Library) [15], переформатированные для использования в программном пакете GEANT4.

Выполнен расчет поглощения потока быстрых нейтронов и траектории пучка меченых нейтронов в водной среде с учетом эффектов рассеяния.

Для расчетов использовалась модель, представленная на рис. 1. В условиях модели источник быстрых нейтронов располагался внутри воздушного контейнера, имеющего толщину стенок (1) 5 мм, выполненных из железа. На рисунке показаны оценочные плоскости (2), для которых производился расчет потока нейтронов. Оценочные плоскости расположены на расстояниях 5, 10 и 20 см от корпуса контейнера.

Выполнен расчет поглощения потока быстрых нейтронов и траектории пучка меченых нейтронов в водной среде с учетом эффектов рассеяния.

Таблица 1. Доля потока нейтронов, достигших оценочных плоскостей на расстоянии 5, 10 и 20 см от металлической стенки контейнера с источником быстрых нейтронов, для двух энергий нейтронов: > 13 и 14,1 МэВ

Энергия n , МэВ	5 см	10 см	20 см
> 13	0,64	0,44	0,20
14,1	0,59	0,39	0,15

В табл. 1 представлены расчеты потока нейтронов, достигших оценочных плоскостей и не претерпевших взаимодействия в водной среде или сохранивших значительную часть энергии при прохождении через нее. Представленные результаты свидетельствуют о том, что интенсивность потока нейтронов на расстоянии 5 см от стенки модуля досмотра в два раза меньше по сравнению с начальной, а на расстоянии 20 см — в пять раз.

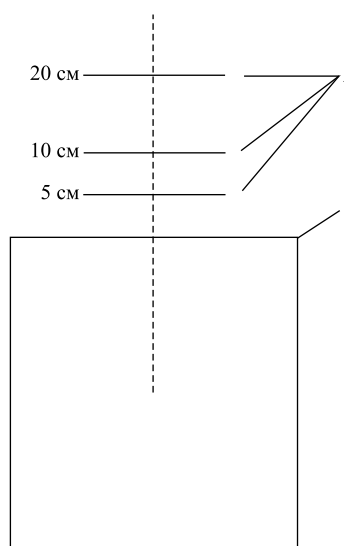


Рис. 1. Схема моделируемых условий, использованных при расчете поглощения потока быстрых нейтронов в водной среде. На схеме отмечены оценочные плоскости 2, расположенные на расстояниях 5, 10 и 20 см от корпуса контейнера 1. Пунктиром изображена ось симметрии центрального меченого пучка

Данный результат свидетельствует о необходимости увеличения времени набора статистики при регистрации гамма-излучения, возникающего при облучении потоком быстрых нейтронов объектов, находящихся в водной среде на удалении от источника нейтронов, в соответствующее число раз. Помимо этого, расчеты показывают, что при прохождении пучка быстрых нейтронов через слой воды указанной толщины практически отсутствует отклонение его относительно первоначального направления.

Для оценки загрузки гамма-детекторов за счет регистрации характеристического гамма-излучения, образующегося в результате реакции неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах легких элементов (^{12}C , ^{14}N и ^{16}O), входящих в состав исследуемого объекта, и внешнего фонового излучения от водной среды было выполнено моделирование прототипа спектрометрического комплекса.

Схема прототипа спектрометрического комплекса выполнена в соответствии с конструкцией детектора взрывчатых и наркотических веществ ДВИН-1 [5]. Схема прототипа спектрометрического комплекса, для которой выполнялось моделирование, представлена на рис. 2.

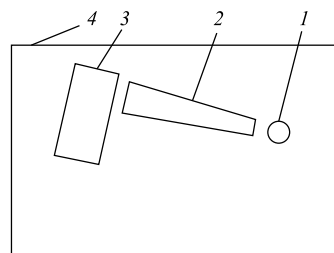


Рис. 2. Схема установки: 1 — генератор быстрых нейтронов; 2 — защита детекторов гамма-излучения; 3 — детекторы гамма-излучения; 4 — корпус детектора

Моделируемый спектрометрический комплекс включает в себя следующие модули: источник быстрых нейтронов (1); защиту гамма-детектора (2), представляющую собой клин, выполненный из полиэтилена и железа; сцинтилляционный детектор гамма-излучения с кристаллом германата висмута (BGO) (3), имеющий диаметр 76 мм и толщину 65 мм; корпус детектора (4) с толщиной стенок из алюминия 5 мм. Моделирование выполнено для условий расположения детектора в кубе, заполненном водой и воздухом. Моделирование выполнено при интенсивности нейтронного генератора $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$.

Таблица 2. Сравнение загрузки детектора гамма-излучения, находящегося в воздухе и в воде

Энерговыведение, МэВ	Интенсивность, с^{-1}	
	Воздух	Вода
> 0	$5,8 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^5$
> 0,1	$4,6 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^5$
> 1,5	$9,4 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^4$

Проведено сравнение фоновой загрузки гамма-детектора при наличии и отсутствии воды. Результаты сравнения представлены в табл. 2 и свидетельствуют о возможности использования сцинтилляционных гамма-детекторов с кристаллом германата висмута (BGO) для регистрации характеристического ядерного излучения углерода, азота и кислорода. Наличие водной среды приводит к увеличению в три раза загрузки детектора гамма-излучения, что, в свою очередь, приводит к ухудшению энергетического разрешения гамма-детектора. Тем самым, при конструировании опытного образца установки для обнаружения взрывчатых веществ представляется целесообразным рассмотреть вопрос об усилении экранирования сцинтилляторов гамма-детекторов от боковой загрузки их фоновым излучением (гамма-квантами и нейтронами).

Для моделируемого спектрометрического комплекса (рис. 2) были получены спектры характеристического гамма-излучения, возникающего при облучении быстрыми нейтронами образца из меламина. Данное вещество используется в качестве имитатора взрывчатки ввиду высокого процентного содержания азота в нем. Размеры образца из меламина составляли $10 \times 10 \times 10$ см (В \times Ш \times Г). Расчеты выполнены при нахождении образца в водной и воздушной средах. На рис. 3 приводится сравнение модельных спектров. Модельные спектры имеют пики полного поглощения энергии характеристического гамма-излучения углерода $E_\gamma = 4,44$ МэВ и азота $E_\gamma = 5,1$ МэВ, содержащихся

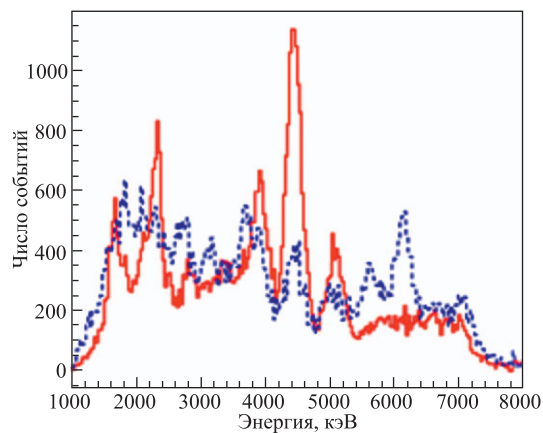


Рис. 3. Расчеты спектров гамма-излучения, возникающего при облучении быстрыми нейтронами меламина при нахождении образца в водной (пунктирная линия) и воздушной (сплошная линия) средах

в образце из меламина. В спектре, рассчитанном для водной среды, присутствует пик полного поглощения, соответствующий энергии характеристического гамма-излучения кислорода $E_\gamma = 6,13$ МэВ. Наличие данного пика объясняется неупругими взаимодействиями нейтронов с ядрами кислорода, присутствующего в воде. Полученные результаты демонстрируют, что, несмотря на необходимость увеличения времени набора статистики, в характеристических спектрах гамма-излучения можно выделить составляющую, отвечающую регистрации характеристического гамма-излучения углерода и азота с энергиями $E_\gamma = 4,44$ МэВ и $E_\gamma = 5,1$ МэВ соответственно. Это означает, что сохраняется возможность анализа взрывчатого вещества в водной среде с использованием метода быстрых меченых нейтронов по соотношению содержания во взрывчатом веществе углерода, азота и кислорода с выбором соответствующих критериев.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

Для проведения экспериментальных исследований был сконструирован экспериментальный стенд, за основу которого был взят переносной детектор для обнаружения взрывчатых веществ на основе технологии меченых нейтронов ДВИН-1 (рис. 4) [10]. Модуль досмотра был помещен в герметичный ударопрочный ящик из высокопрочного АБС-пластика. Модуль досмотра соединялся с модулем контроля и управления, сетью электропитания гибким герметичным соединением. Модуль досмотра размещался на платформе, имеющей направляющие для крепления исследуемых объектов. Для компенсации эффекта положительной плавучести модуля в нижней части платформы был размещен балласт. Погружение модуля в водный бассейн осуществлялось с использованием лебедки.

Вид испытательного стенда показан на рис. 5.

Основные характеристики переносного детектора ДВИН-1 представлены в табл. 3. Комплекс ДВИН-1 предназначен для автоматического обнаружения и локализации взрывчатых веществ внутри объектов контроля без их вскрытия.



Рис. 4. Модуль досмотра переносного комплекса для обнаружения взрывчатых веществ ДВИН-1 [10]

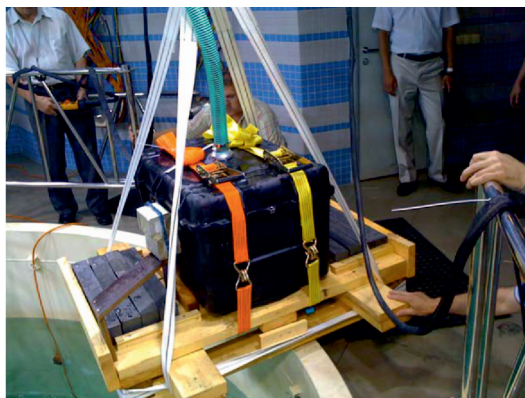


Рис. 5. Испытательный стенд на основе переносного детектора для обнаружения взрывчатых веществ ДВИН-1

Таблица 3. Основные характеристики переносного детектора ДВИН-1

Количество пучков меченых нейтронов, шт.	9
Интенсивность генератора НГ-27, с^{-1}	$5 \cdot 10^7$
Энергия нейтронов, МэВ	14
Габаритные размеры модуля досмотра (Д × Ш × В), мм, не более	$740 \times 510 \times 410$
Габаритные размеры модуля контроля (Д × Ш × В), мм, не более	$400 \times 200 \times 40$
Габаритные размеры катушки с соединительными проводами (Д × Ш × В), мм, не более	$600 \times 600 \times 400$
Масса модуля досмотра без упаковки, кг, не более	40
Масса модуля управления без упаковки, кг, не более	3
Масса катушки с соединительными проводами без упаковки, кг, не более	17
Потребляемая мощность, Вт, не более	300

Комплекс ДВИН-1 состоит из модуля досмотра, модуля управления и соединительных кабелей на катушке. Модуль досмотра, с помощью которого производится облучение объекта досмотра нейтронным потоком, состоит из нейтронного генератора со встроенным кремниевым альфа-детектором, сцинтилляционного гамма-детектора на основе кристалла ВГО, регистрирующей электроники и блоков питания. Модуль управления состоит из интерфейса оператора на базе персонального компьютера с блоком программ анализа информации, поступающей с альфа- и гамма-детекторов, с целью обнаружения и идентификации скрытых опасных веществ.

Выполнена серия экспериментов и получены спектры характеристического гамма-излучения меламина (образец массой 1400 г) и мины СПМ (масса заряда мины СПМ — 1 кг, состав заряда: 17 % тротила, 54 % гексогена, 17 % алюминия, 7 % флегматизатора) в воздушной и водной средах. Образцы меламина и мины СПМ устанавливались с внешней стороны ударопрочного корпуса на специальной площадке измерительного стенда (рис. 6).

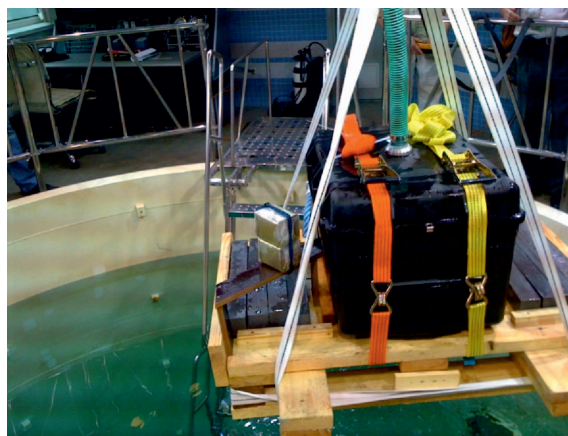


Рис. 6. Установка исследуемого образца меламина на экспериментальном стенде

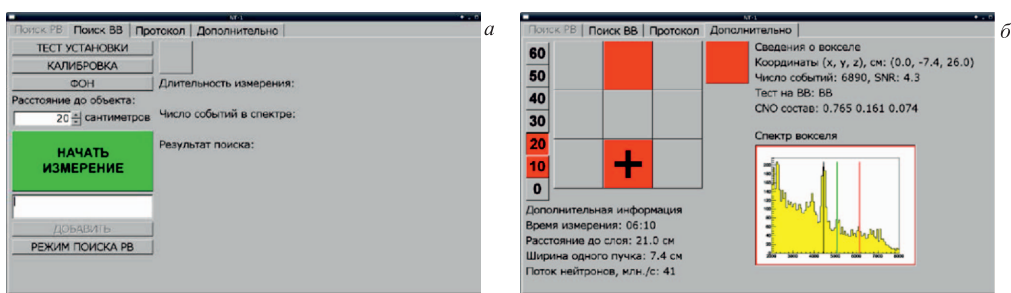


Рис. 7. Внешний вид структуры программы анализа данных комплекса ДВИН-1: а) работа программы в режиме поиска взрывчатых веществ; б) работа программы в режиме анализа результатов измерения

Результаты измерения загрузки детектора гамма-излучения в водной среде свидетельствовали об увеличении ее в четыре раза (при интенсивности потока нейтронов, испускаемого нейтронным генератором $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$) по сравнению с загрузкой детектора в воздушной среде (счет гамма-детектора $\sim 80 \text{ кГц}$ в водной среде, $\sim 20 \text{ кГц}$ в воздушной среде). При уменьшении интенсивности потока нейтронов в пять раз загрузка детектора гамма-излучения в водной среде составила 17 кГц .

Для анализа информации, поступающей с блока приема и предварительного анализа данных с альфа- и гамма-детекторов, использовалось программное обеспечение комплекса ДВИН-1. Внешний вид структуры программы представлен на рис. 7.

С помощью программы информация, поступающая от детектирующей аппаратуры, заносится в определенные ячейки, соответствующие пространственным ячейкам облучаемого объекта (так называемым вокселям), формируемым мечеными пучками нейтронов и заданными временными интервалами между приходом сигналов с детекторов альфа- и гамма-излучения. Отсчет номера меченого пучка начинается с левого верхнего угла (рис. 7, б). Расстояние вдоль выбранного направления меченого пучка нейтронов от досмотрового модуля до соответствующего вокселя объекта облучения указывается с помощью линейки, расположенной в левой части рис. 7, б. Для каждой выделенной области (вокселя) строится спектр характеристического ядерного гамма-излучения и определяются его параметры. В случае идентификации вещества в выбранном вокселе как «опасного» данный воксель в интерфейсе программы отмечается красным цветом, в случае «неопасного» — зеленым цветом.

На рис. 8 и 9 сравниваются временные и энергетические спектры характеристического гамма-излучения, измеренные в водной и воздушной средах для двух пучков меченых нейтронов, в одном из которых (номер 4) находился имитатор опасного вещества — меламин, во втором пучке (номер 6) опасное вещество отсутствовало.

Наблюдаемое различие во временных спектрах в пучке 6 для измерений в водной и воздушной средах демонстрирует существенный вклад в спектр от характеристического излучения от воды, регистрируемого гамма-детектором. Сравнение же энергетических спектров рис. 9 для этих же двух пучков меченых нейтронов позволяет установить в спектре меламин наличие пиков полного поглощения энергии характеристического гамма-излучения углерода $E_\gamma = 4,44 \text{ МэВ}$, азота $E_\gamma = 5,1 \text{ МэВ}$ и кислорода $E_\gamma = 6,13 \text{ МэВ}$.

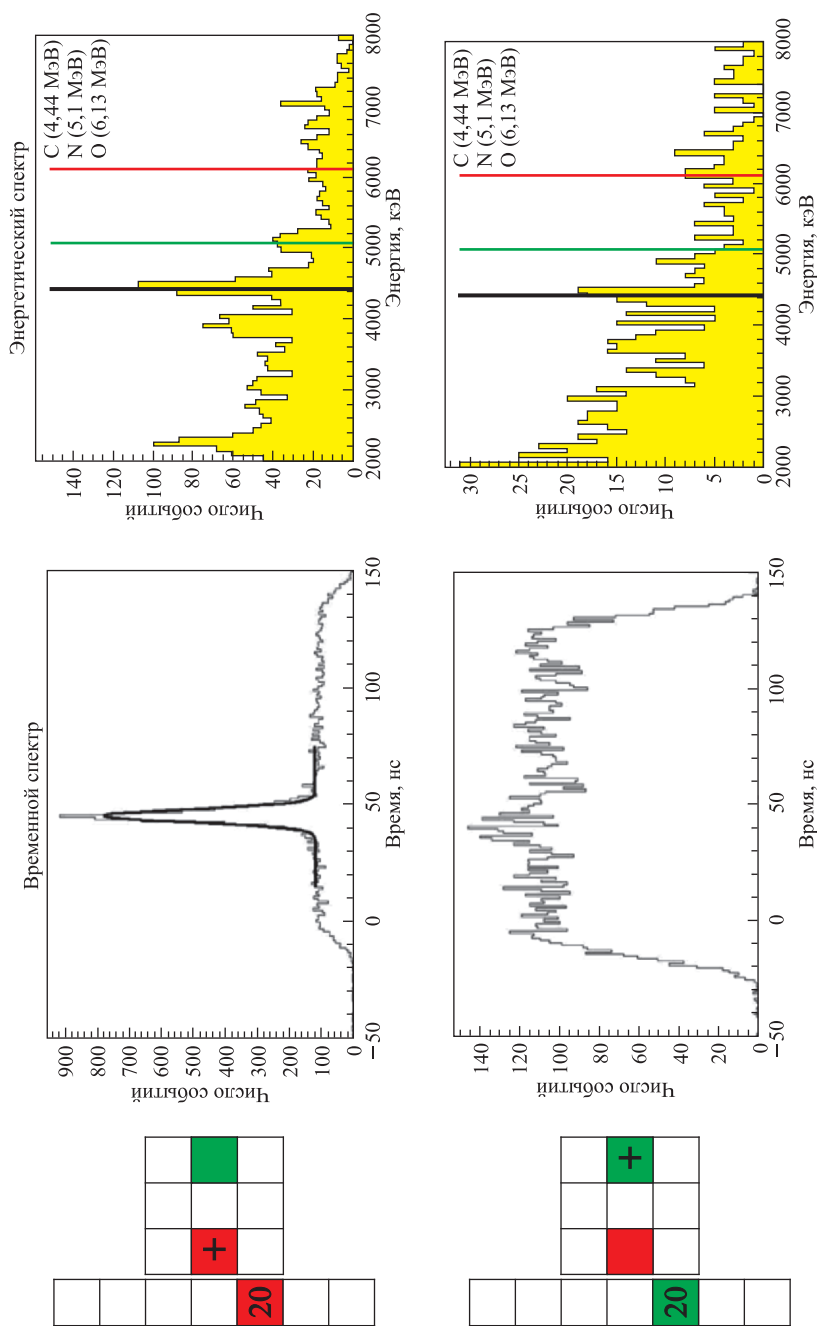


Рис. 8. Временные и энергетические спектры гамма-излучения для пучков номер 4 и 6, измерения в воздушной среде. Крестом указан меченый пучок, для которого приведены временной и энергетический спектры, а также слева указано расстояние (в см) от модуля досмотра до данного выделенного вокселя. На энергетических спектрах линиями отмечены пики полного поглощения энергии характеристического гамма-излучения углерода $E_{\gamma} = 4,44$ МэВ, азота $E_{\gamma} = 5,1$ МэВ и кислорода $E_{\gamma} = 6,13$ МэВ

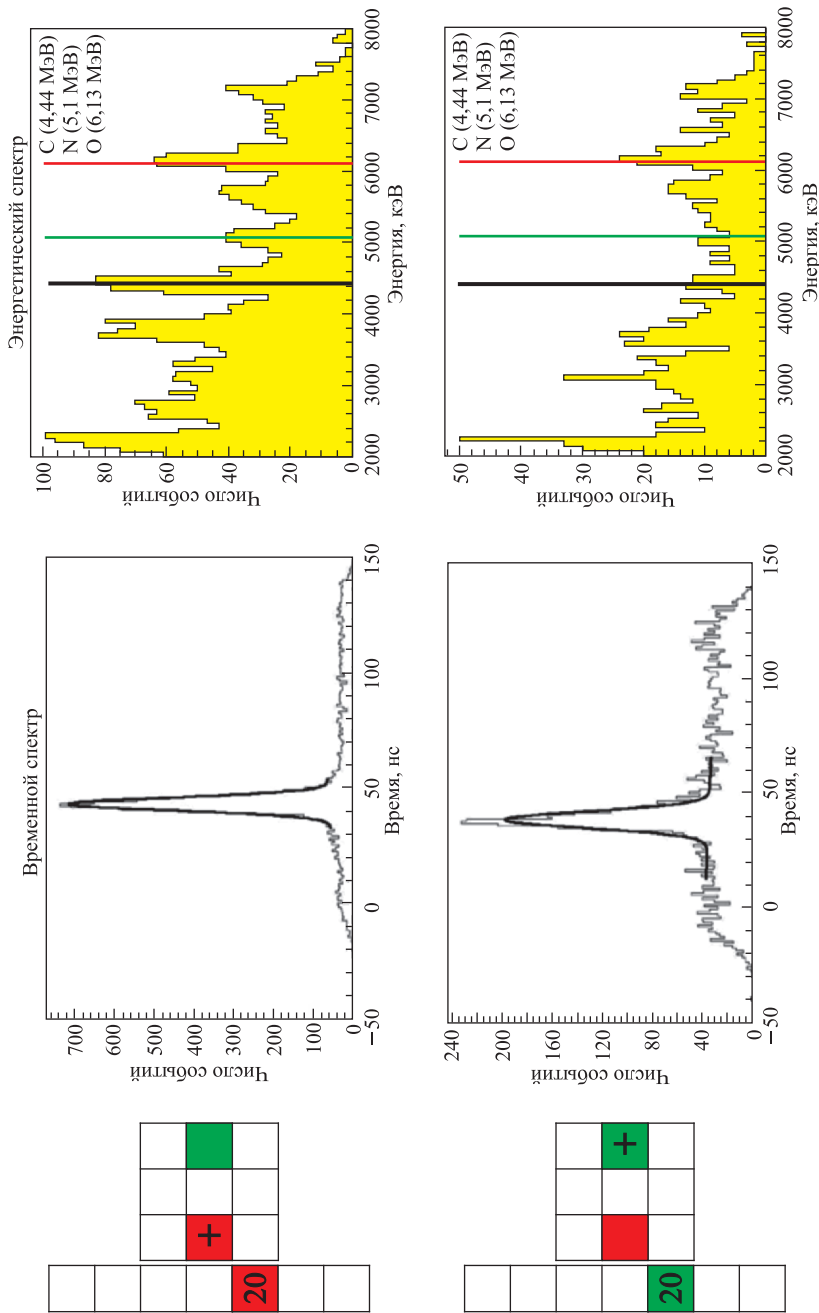


Рис. 9. Временные и энергетические спектры гамма-излучения для пучков номер 4 и 6, измерения в водной среде. Крестом указан меченый пучок, для которого приведен энергетический спектр, и указана дистанция (в см) от модуля досмотра вдоль направления выбранного пучка. На энергетических спектрах линиями отмечены пики полного поглощения энергии характеристического гамма-излучения углерода $E_{\gamma} = 4,44$ МэВ, азота $E_{\gamma} = 5,1$ МэВ и кислорода $E_{\gamma} = 6,13$ МэВ

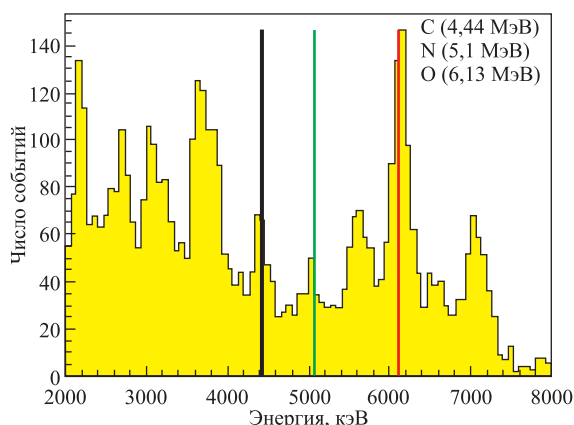


Рис. 10. Энергетический спектр меламина, полученный в водной среде при удалении от стенки модуля досмотра на 20 см. Линиями отмечены пики полного поглощения энергии характеристического гамма-излучения углерода $E_\gamma = 4,44$ МэВ, азота $E_\gamma = 5,1$ МэВ и кислорода $E_\gamma = 6,13$ МэВ

Сравнение временных и энергетических спектров в водной и воздушной средах показывает, что результаты измерений одного и того же количества взрывчатого вещества в этих средах существенно различаются и, как следствие, методы анализа полученных данных в этих средах (алгоритмы и критерии отбора зарегистрированных событий) должны быть различны.

Для проверки возможности обнаружения опасных объектов, расположенных в водной среде, было выполнено измерение характеристического гамма-излучения меламина, удаленного от модуля досмотра на расстояние 20 см. Энергетический спектр, соответствующий центральному вокселю 5, приведен на рис. 10. Как видно, в энергетическом спектре четко наблюдаются пики, соответствующие характеристическому излучению азота и кислорода. Таким образом, принципиальная возможность обнаружения ВВ, расположенных в воде на расстояниях от модуля досмотра до 20 см сохраняется. Однако из-за ослабления интенсивности потока меченых нейтронов за счет упругого и неупругого взаимодействия их в указанном слое воды требуется увеличение времени набора статистики для достоверного обнаружения ВВ.

Как видно из приведенных энергетических спектров, при облучении в воде образца из меламина и мины СПМ потоком меченых нейтронов четко наблюдаются достаточно интенсивные пики характеристического излучения углерода, азота и кислорода. Возможность выделять пики углерода, азота и кислорода на фоне пиков кислорода от воды является принципиальным результатом, позволяющим производить обнаружение взрывчатых веществ, находящихся в воде.

Следует отметить, что полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с результатами расчетов с использованием программы GEANT4. Таким образом, с введением определенных критериев, устанавливающих соотношения между интенсивностями характеристического излучения С, N и O, появляется возможность обнаружения с высокой достоверностью взрывчатых веществ, погруженных в воду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены измерения характеристик детектора взрывчатых веществ на основе метода меченых нейтронов с целью определения возможности использования его для обнаружения опасных объектов под водой. Полученные результаты свидетельствуют о возможности идентификации ВВ путем регистрации характеристического гамма-излучения ядер углерода, азота и кислорода. Показано, что эффективное обнаружение взрывчатого вещества под водой возможно при условии, если толщина слоя воды между источником меченых нейтронов и объектом досмотра не превышает 20 см. Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с результатами расчета с использованием программного пакета GEANT4.

Авторы работы признательны Б. П. Глазунову и С. В. Силантьеву за интерес и поддержку при проведении настоящих исследований, а также ОАО «Тетис-Про» за предоставление бассейна для проведения экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Laikin A., Platovskikh Y.* Optimal Processing of Information from Detectors Used for Detecting Explosives by Neutron-Radiation Analysis // *At. Energy.* 2006. V. 101, No. 5. P. 838–845.
2. *Laikin A., Platovskikh Y.* Optimal Use of Spectrometric Information for Discovering Explosives by Neutron-Radiation Analysis and Inelastic Neutron Scattering // *At. Energy.* 2011. V. 109, No. 3. P. 207–212.
3. *Laikin A. I., Mozhaev A. N., Kozlovskii S. A.* Automatic Calibration of the Spectrometric Channels in a Device for Detecting Explosives // *At. Energy.* 2005. V. 98, No. 2. P. 135–139.
4. *Чистяков О. Б., Лайкин А. И.* Универсальный погружной комплекс для идентификации взрывчатых, отравляющих и радиоактивных веществ в подводных потенциально опасных объектах // *Тр. ЦНИИ им. А. Н. Крылова.* 2009. Т. 45. С. 181–187.
5. *Bystritsky V. et al.* DViN — Stationary Setup for Identification of Explosives // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5, No. 5. P. 441–446.
6. *Ipe N. E. et al.* A Cargo Inspection System Based on Pulsed Fast Neutron Analysis (PFNATM) // *Rad. Protection Dosimetry.* 2005. V. 116, Nos. 1–4. P. 343–346.
7. *Bystritsky V. M. et al.* DViN-2 Stationary Inspection Complex // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2009. V. 6, No. 6. P. 505–510.
8. *Bystritsky V. B. et al.* Portable Neutron Generators and Technologies on Their Basis // *Proc. of the Intern. Scientific and Technical Conf., Oct. 18–22, 2004. M., 2004.* P. 283–295.
9. *Bystritsky V. M. et al.* JINR Commun. E13-2006-36. Dubna, 2006.
10. *Быстрицкий В. М. и др.* Переносной детектор ДВИН-1 для обнаружения взрывчатых веществ на основе метода меченых нейтронов // *Тр. Междунар. научно-техн. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», Москва, 2012.*
11. *Carasco C. et al.* Data Acquisition and Analysis of the UNCOSS Underwater Explosive Neutron Sensor // *Nucl. Sci.* 2011. V. PP(99). P. 1.
12. *Eleon C. et al.* Experimental and MCNP Simulated Gamma-Ray Spectra for the UNCOSS Neutron-Based Explosive Detector // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 629, No. 1. P. 220–229.
13. Website of Bluefin Robotics Corporation. Available from: <http://www.bluefinrobotics.com/>
14. Website of Hydroid inc. Available from: <http://www.km.kongsberg.com/hydroid>
15. Website of UnCoSS Project. Available from: <http://www.uncoss-project.org>

Получено 8 апреля 2013 г.