

P3-2013-109

А. В. Рахимов<sup>1,2</sup>, А. А. Мирсагатова<sup>2</sup>,  
Н. М. Мухамедшина<sup>2</sup>, С. В. Розов<sup>1</sup>, И. И. Садыков<sup>2</sup>,  
Д. В. Философов<sup>1</sup>, Е. А. Якушев<sup>1</sup>

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ  
ПОЛИЭТИЛЕНА НЕЙТРОННОЙ ЗАЩИТЫ  
УСТАНОВКИ **EDELWEISS**

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Институт ядерной физики АН РУз, Ташкент

## Нейтронно-активационный анализ полиэтилена нейтронной защиты установки EDELWEISS

Целью работы является применение инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) для определения примесного состава полиэтилена, использованного для нейтронной защиты низкофоновой установки в эксперименте EDELWEISS. В эксперименте EDELWEISS основным источником фона является радиоактивное излучение естественных радионуклидов, находящихся в конструкционных материалах, в том числе в защите установки. В связи с этим проведение высокочувствительного и многоэлементного анализа образцов полиэтилена, который используется в эксперименте в качестве защиты от нейтронов в количестве нескольких десятков тонн, является актуальной задачей. Один из методов, отвечающих этим требованиям, — нейтронно-активационный анализ. Для проведения ИНАА образцы полиэтилена массой 1–10 г облучали нейтронами ядерного реактора ВВР-СМ Института ядерной физики АН РУз с плотностью потока нейтронов  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 5–48 ч. При этом в образцах двух типов полиэтилена определены 35 элементов на уровне  $10^{-5}–10^{-11} \text{ г/г}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

## Neutron Activation Analysis of Polyethylene of Neutron Shield of EDELWEISS Experiment

In this work instrumental neutron-activation analysis (INAA) has been applied for estimation of trace contaminations in polyethylene used for the neutron shielding of low background setup of the EDELWEISS experiment. In the EDELWEISS main background arises due to radioactive decays of natural radio-nuclides in all construction materials, even in the shield. Thus, a task of high sensitive many elements analysis of samples from a polyethylene (PE) several tons of which is used by the experiment as a neutron shield is highly relevant. Neutron activation analysis is a method that gives the desired information about the PE. For NAA, polyethylene samples with mass 1–10 g were irradiated during 5–48 h by neutron flux  $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  from WWR-SM nuclear reactor of the Institute of Nuclear Physics of AS RUz. As a result in two types of PE presence of 35 elements has been estimated on a level of sensitivities  $10^{-5}–10^{-11} \text{ g/g}$ .

The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Фон от нейтронов и фоны, индуцированные нейтронами, представляют серьезную опасность для всех современных низкофоновых экспериментов. В обычных лабораториях основным источником нейтронов являются космические лучи. В силу большой энергии и высокой проникающей способности единственной эффективной защитой от космических лучей является проведение экспериментов в глубоких подземных лабораториях. Благодаря высокой степени подавления космогенного излучения поток нейтронов в таких лабораториях составляет менее  $0,1 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что на три порядка ниже, чем поток нейтронов на поверхности. Для современных экспериментов, направленных на прямой поиск частиц темной материи, при детектировании  $0\nu 2\beta$ -распада или регистрации нейтрино поток нейтронов должен быть на несколько порядков ниже. Фон нейтронов в подземной лаборатории в основном определяется естественной радиоактивностью горных пород, материалов стен лаборатории, конструкционных материалов экспериментальной установки, радиоактивной пылью и радоном. Нейтроны образуются при спонтанном делении урана и в  $(\alpha, n)$ -реакциях. Необходимо отметить, что даже в глубоких подземных лабораториях можно наблюдать быстрые нейтроны, связанные с остаточным космогенным фоном. В нашей работе данный вид фона не исследуется, дополнительная информация может быть найдена в [1]. В любом случае для проведения низкофоновых экспериментов требуется: 1) отбор конструкционных материалов с низким уровнем естественной радиоактивности; 2) сборка и проведение экспериментов в помещениях с низким уровнем пыли; 3) создание эффективной антирадоновой защиты на всех стадиях проведения эксперимента; 4) создание эффективной нейтронной защиты. При создании нейтронной защиты основными параметрами при выборе материалов являются их эффективность к замедлению быстрых и поглощению тепловых нейтронов, остаточная радиоактивность материала защиты (с учетом ее возможного изменения с течением времени), легкость в обработке, устойчивость к внешним воздействиям, доступность и стоимость. Для создания высокоэффективной нейтронной защиты необходимо высокое содержание в ней легких элементов.

Одним из материалов для создания нейтронных защит, удовлетворяющим всем вышеперечисленным параметрам, является полиэтилен.

Данная работа направлена на определение степени загрязнения в первую очередь естественными радионуклидами урана, тория, радия и калия-40 полиэтилена основной нейтронной защиты EDELWEISS и нового полиэтилена, используемого в EDELWEISS-3, с применением метода ИНАА.

## ЭКСПЕРИМЕНТ EDELWEISS, КОНЦЕПЦИЯ ЗАЩИТЫ, ЗАЩИТА ОТ НЕЙТРОНОВ

Для прямого поиска частиц темной материи в эксперименте EDELWEISS [2] используются германиевые детекторы-баллометры, находящиеся в криостате растворения  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ . Для подавления космогенной составляющей фона установка расположена в подземной лаборатории (LSM) [3], в туннеле Фрежюс, соединяющем Францию и Италию. 1800 м горной породы (4800 м в.э.) уменьшают поток мюонов вплоть до  $4 \text{ м}^2/\text{сут}$ , и соответственно уменьшается поток быстрых нейтронов до уровня  $\sim 10^{-2} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Защита установки EDELWEISS окружает детекторы со всех сторон и состоит из следующих слоев: 20 см свинца (36 т, включая внутреннюю часть защиты из сверхнизкофонового, археологического свинца), 50 см полиэтилена для защиты от нейтронов (30 т), далее вся установка окружена активной  $\mu$  вето-системой (100  $\text{м}^2$  сцинтилляционных панелей толщиной 5 см). При закрытой защите в свободное пространство возле криостата непрерывно подается очищенный от радона воздух. Криостат с защитой установлен внутри чистой комнаты класса 1000.

Эффективность защиты была установлена путем сравнения модельных расчетов с результатами тестов, выполненных в том числе с активным нейтронным источником, расположенным в разных местах вне защиты. Все конструкционные материалы, использованные для EDELWEISS, были отобраны в зависимости от уровня их радиоактивного загрязнения. Благодаря предпринятым усилиям в предыдущей фазе эксперимента EDELWEISS-2 был получен один из лучших пределов на взаимодействие WIMP-нуклон на уровне  $4,4 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$  для WIMP с массой  $85 \text{ ГэВ}/c^2$  [4]. На новом этапе эксперимента (фаза EDELWEISS-3) целью проекта является улучшение чувствительности измерения сечения рассеяния WIMP-нуклон как минимум на порядок. Для улучшения чувствительности эксперимента до нужного уровня наряду с увеличением статистики в десять раз, до  $\sim 3000 \text{ кг}/\text{сут}$ , необходимо существенное понижение индекса ожидаемого фона. Из данных работы [4] видно, что для успешности EDELWEISS-3 нейтронный фон, связанный с остаточной радиоактивностью электроники, коннекторов и кабелей, расположенных внутри и на криостате установки, необходимо подавить по крайней мере на порядок. Уменьшение радиоактивности уже специально отобранных материалов применяемых электронных компонентов на порядок является сложной задачей. Поэтому для третьей фазы эксперимента предусмотрена установка дополнительной полиэтиленовой защиты от нейтронов, частично внутри криостата, частично между криостатом и археологическим свинцом (рис. 1). Естественно, что основным требованием при создании новой защиты является выяснение уровня собственной радиоактивности используемого материала.

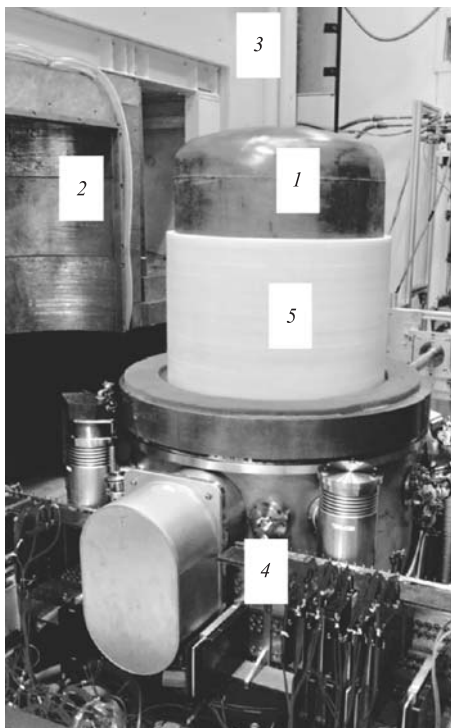


Рис. 1. Вид верхней части криостата установки EDELWEISS, внешняя защита открыта: 1 — внешний экран криостата; 2 — защита из свинца; 3 — основная полиэтиленовая защита (EDELWEISS-2 и 3); 4 — электроника, находящаяся внутри основной полиэтиленовой защиты; 5 — часть новой полиэтиленовой защиты (EDELWEISS-3)

Дополнительным фактором возникновения нейтронов внутри полиэтилена является наличие радона в соприкасающемся с полиэтиленом воздухе. Однако в рамках данной статьи нейтронный фон за счет возможной адсорбции радона в полиэтилен не исследуется.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Химические реактивы.** В этой работе использовались бидистиллированная вода, изопропиловый спирт («ОСЧ 13-5», ТУ 6-09-07-1718-91) и соляная кислота («ОСЧ 20-4», ГОСТ 14261-77).

**Облучение образцов** проводили на вертикальном канале исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ Института ядерной физики АН РУз, Ташкент, с плотностью потока нейтронов  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [5].

**Приготовление образцов полиэтилена.** Образцы для анализа отобраны из двух блоков полиэтилена, использованных для основной защиты EDELWEISS, и двух блоков новой защиты EDELWEISS-3. Из каждого блока были подготовлены по два образца, обозначенные как PE-1, PE-1s, PE-2, PE-2s, PE-N1, PE-N1s, PE-N2, PE-N2s. Образцы с символом «N» принадлежат к полиэтилену защиты EDELWEISS-3. Символом «s» обозначены образцы с меньшей массой порядка 1 г. Масса остальных образцов составляла  $\approx 10$  г. Для удаления поверхностного загрязнения образцы последовательно промывали бидистиллированной водой, изопропиловым спиртом и через некоторое время снова бидистиллированной водой. Затем анализируемые образцы с образцами сравнения (эталоны) заворачивали в алюминиевую фольгу и запаивали в кварцевую ампулу. Запаиваемую ампулу помещали в алюминиевый контейнер для облучения на реакторе.

**Гамма-спектрометрия.** Активность образцов измеряли с помощью  $\gamma$ -спектрометра, состоящего из полупроводникового HPGe-детектора GC1518 (эффективность регистрации 15 %, энергетическое разрешение 1,7 кэВ по линии 1,3 МэВ радионуклида  $^{60}\text{Co}$ ) и многоканального анализатора DSA-1000 (Канберра, США). Набор и обработку спектров проводили с помощью программного обеспечения Genie-2000, входящего в комплект спектрометра.

**Образцы сравнения (эталоны),** использованные при анализе, готовили по стандартной методике [6].

**Методика ИНАА.** Образцы полиэтилена большей массы (PE-1, PE-2, PE-N1, PE-N2) с эталонами облучали в течение 48 ч. Через 10–13 сут после облучения образцы с эталонами распаковывали, удаляли поверхностное загрязнение 0,1 моль раствором соляной кислоты и помещали в бумажные пакетики.

Образцы PE-1s, PE-N1s, PE-2s и PE-N2s облучали в течение 5 ч. Измерения этих образцов проводили через несколько часов после облучения. Время измерения образцов составляло 1000–3000 с, эталонов — 100–600 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полиэтилен состоит из углерода и водорода, которые практически не активируются при облучении нейтронами. В связи с этим полиэтилен удобен для инструментального нейтронно-активационного анализа. Низкая активность основы после облучения позволяет использовать для анализа образцы с массой в десятки грамм, высокий поток нейтронов и длительное время облучения. Все эти факторы позволяют получить высокую чувствительность определения и обеспечивают представительность пробы. Результаты НАА образцов полиэтилена основной защиты EDELWEISS и внутренней защиты EDELWEISS-3 приведены в таблице. В связи с длительным облучением образцов потоком

нейтронов с высокой плотностью интенсивное  $\gamma$ -излучение некоторых элементов с более высоким содержанием мешает определению других элементов, которые определяются по  $\gamma$ -линиям с более низкой энергией. В качестве примера приведен  $\gamma$ -спектр образца PE-1N (рис. 2).

**Результаты ИНАА образцов полиэтилена, используемых в экспериментах EDELWEISS и EDELWEISS-3**

Элемент	Содержание, г/г			
	PE-1/PE-1s	PE-2/PE-2s	PE-1N/PE-1Ns	PE-2N/PE-2Ns
Ag	$(1,33 \pm 0,06) \cdot 10^{-10}$	$(1,56 \pm 0,06) \cdot 10^{-10}$	—	—
As	$(2,37 \pm 0,16) \cdot 10^{-9}$	$(3,21 \pm 0,16) \cdot 10^{-9}$	—	—
Au	$(3,32 \pm 0,02) \cdot 10^{-10}$	$(9,93 \pm 0,18) \cdot 10^{-11}$	$< 4,7 \cdot 10^{-11}$	$< 1,1 \cdot 10^{-11}$
Ba	—	—	$< 1,7 \cdot 10^{-8}$	$< 8,2 \cdot 10^{-9}$
Br	$(7,51 \pm 0,12) \cdot 10^{-9}$	$(9,13 \pm 0,13) \cdot 10^{-9}$	$(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-9}$	$(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-9}$
Ce	$(1,64 \pm 0,02) \cdot 10^{-9}$	$(2,04 \pm 0,03) \cdot 10^{-9}$	$(3,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	$(3,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$
Co	$(4,15 \pm 0,03) \cdot 10^{-9}$	$(5,86 \pm 0,15) \cdot 10^{-10}$	$(6,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-10}$	$(4,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-10}$
Cr	$(1,81 \pm 0,01) \cdot 10^{-8}$	$(1,77 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$	$(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$	$(1,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$
Cs	—	—	$< 1 \cdot 10^{-11}$	$< 1 \cdot 10^{-11}$
Cu	—	—	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$
Eu	—	—	$< 2,2 \cdot 10^{-11}$	$< 1,2 \cdot 10^{-11}$
Fe	$(3,86 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}$	$(3,06 \pm 0,33) \cdot 10^{-7}$	$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$	$(1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-7}$
Hf	$(4,98 \pm 0,37) \cdot 10^{-11}$	$(8,63 \pm 0,35) \cdot 10^{-11}$	$(2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$
K	$(1,60 \pm 0,35) \cdot 10^{-7}$	$(1,03 \pm 0,25) \cdot 10^{-7}$	$(9,3 \pm 1,0) \cdot 10^{-7}$	$(3,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$
La	$(3,47 \pm 0,03) \cdot 10^{-9}$	$(2,00 \pm 0,09) \cdot 10^{-9}$	$(8,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-9}$	$(6,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-9}$
Lu	—	—	$< 9,2 \cdot 10^{-12}$	$< 1,2 \cdot 10^{-11}$
Mo	$(1,92 \pm 0,07) \cdot 10^{-9}$	$(1,84 \pm 0,07) \cdot 10^{-9}$	—	—
Mn	—	—	$(5,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-9}$	$(2,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-9}$
Na	—	—	$(3,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$	$(1,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-7}$
Nd	—	—	$< 4,0 \cdot 10^{-9}$	$< 2,5 \cdot 10^{-9}$
Ni	—	—	$(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$
Rb	—	—	$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$
Re	$(5,17 \pm 0,01) \cdot 10^{-8}$	$(1,26 \pm 0,01) \cdot 10^{-8}$	—	—
Sb	$(2,83 \pm 0,01) \cdot 10^{-8}$	$(3,68 \pm 0,01) \cdot 10^{-8}$	$(4,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$	$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-11}$
Sc	$(2,70 \pm 0,04) \cdot 10^{-10}$	$(1,46 \pm 0,03) \cdot 10^{-10}$	$(5,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$(3,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-11}$
Se	$(3,10 \pm 0,11) \cdot 10^{-9}$	$(2,12 \pm 0,10) \cdot 10^{-9}$	$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-9}$	$(9,8 \pm 1,0) \cdot 10^{-10}$
Sm	—	—	$(4,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-11}$	$(4,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-11}$
Sn	$(2,49 \pm 0,06) \cdot 10^{-8}$	$(1,40 \pm 0,05) \cdot 10^{-8}$	—	—
Ta	$(1,81 \pm 0,02) \cdot 10^{-9}$	$(1,09 \pm 0,02) \cdot 10^{-9}$	$< 8,7 \cdot 10^{-11}$	$< 6,5 \cdot 10^{-11}$

Продолжение таблицы

Элемент	Содержание, г/г			
	PE-1/PE-1s	PE-2/PE-2s	PE-1N/PE-1Ns	PE-2N/PE-2Ns
Th	$(1,16 \pm 0,04) \cdot 10^{-10}$	$(8,39 \pm 0,90) \cdot 10^{-11}$	$< 5,3 \cdot 10^{-11}$	$< 1 \cdot 10^{-11}$
U	$(1,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$	$(7,97 \pm 0,41) \cdot 10^{-10}$	$(5,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$(7,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-11}$
W	—	—	$(5,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-9}$	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$
Yb	—	—	$< 6,1 \cdot 10^{-11}$	$< 3,1 \cdot 10^{-11}$
Zn	$(9,98 \pm 0,28) \cdot 10^{-6}$	$(1,03 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$	$(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$	$(7,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$
Zr	—	—	$(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$	$(5,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$

Символом < указаны пределы обнаружения (90 % CL).

По данным таблицы и из рис. 2 видно, что содержание хрома в образце полиэтилена внутренней защиты EDELWEISS-3 на пять порядков выше, чем тория. В связи с этим комптоновский фон  $\gamma$ -линии  $^{51}\text{Cr}$  с энергией  $\gamma$ -линии 320 кэВ не дает возможности определять торий, который определяется по радионуклиду  $^{233}\text{Pa}$  с энергией  $\gamma$ -линии 311 кэВ. Поэтому в таблице для образцов серии N содержание тория приведено в виде пределов обнаружения.

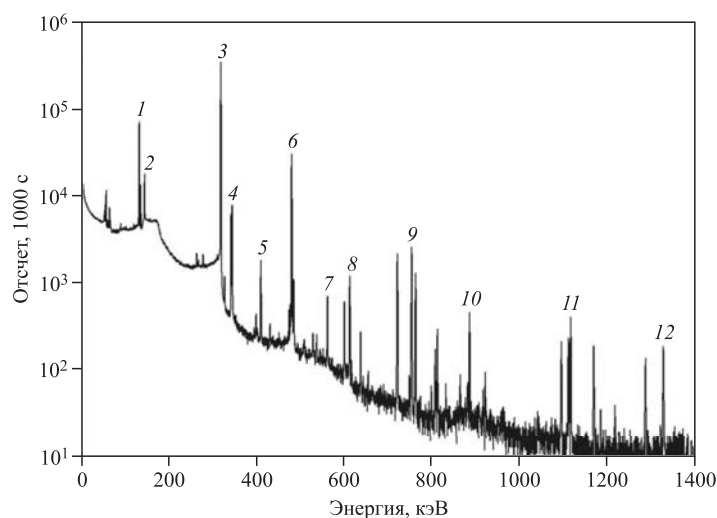


Рис. 2.  $\gamma$ -спектр образца полиэтилена PE-1N, время измерения 1000 с, время охлаждения 13 сут. Отмечены следующие  $\gamma$ -линии: 1, 4, 6, 8 —  $^{181}\text{Hf}$  (133,0 кэВ, 345,9 кэВ, 482,2 кэВ и 615,2 кэВ); 2 —  $^{141}\text{Ce}$  (145,4 кэВ); 3 —  $^{51}\text{Cr}$  (320,1 кэВ); 5 —  $^{198}\text{Au}$  (411,8 кэВ); 7 —  $^{122}\text{Sb}$  (564,1 кэВ); 9 —  $^{95}\text{Zr}$  (756,7 кэВ); 10 —  $^{46}\text{Sc}$  (889,3 кэВ); 11 —  $^{59}\text{Fe}$  (1099,3 кэВ); 12 —  $^{60}\text{Co}$  (1332,5 кэВ)



Наибольший интерес в результатах анализа вызывают концентрации тория и урана, которые являются вероятными источниками нейтронного фона. В работе [7] показано, что  $1 \cdot 10^{-9}$  г/г  $^{238}\text{U}$  в полиэтилене дает плотность потока нейтронов на уровне  $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а  $1 \cdot 10^{-9}$  г/г  $^{232}\text{Th}$  —  $5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Принимая во внимание полученные в данной работе концентрации тория и урана в полиэтилене внутренней защиты EDELWEISS-3, можно говорить о дополнительном потоке нейтронов, возникающем внутри защиты, на уровне менее  $10^{-7} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Данный уровень вполне отвечает требованиям эксперимента EDELWEISS-3.

Особого внимания заслуживает высокое содержание цинка в образцах основной защиты EDELWEISS. Концентрация цинка в этих образцах на три порядка больше, чем в полиэтилене, используемом в EDELWEISS-3. По всей видимости технология производства данных полиэтиленов отличается. Важность этого наблюдения связана с тем, что цинк является химическим аналогом радия, поэтому в полиэтилене основной защиты содержание радия может быть значительно выше, чем рассчитанное в предположении о его равновесии с ураном, с вытекающими последствиями по более высокому выходу нейтронов и более высокой  $\gamma$ -активности. Тем более важным для эксперимента EDELWEISS является то, что новый полиэтилен для внутренней защиты от нейтронов имеет более низкое содержание тория и урана и, по всей видимости, радия.

Кроме нейтронного фона необходимо отметить возможный  $\gamma$ -фон, связанный с наличием  $^{40}\text{K}$ , а также с  $\gamma$ -излучением радионуклидов, образующихся при распаде урана (в основном  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{214}\text{Pb}$ ) и тория ( $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ ). Из таблицы видно, что максимальное содержание калия было обнаружено в образце PE-2 ( $1,03 \cdot 10^{-7}$  г/г), что соответствует радиоактивности  $3,1 \cdot 10^{-3}$  Бк/кг полиэтилена. Максимальное содержание тория и урана было обнаружено в образце PE-1. В пересчете на активность полученное содержание тория и урана дает  $1,5 \cdot 10^{-2}$  и  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Бк/кг полиэтилена соответственно. Таким образом, если цепочка после  $^{226}\text{Ra}$  находится в равновесии с ураном, то основной  $\gamma$ -фон за счет полиэтилена будет связан с распадом  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{40}\text{K}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен инструментальный нейтронно-активационный анализ восьми образцов из двух сортов полиэтилена, используемых для создания высокоэффективной защиты от нейтронов в эксперименте EDELWEISS.

В анализированных образцах определены до 35 элементов на уровне  $10^{-5}$ – $10^{-11}$  г/г. Установлено содержание Th и U, которые представляют наибольший интерес как элементы, являющиеся потенциальными источниками дополнительного потока нейтронов.

Дана оценка возможной величины  $\gamma$ -фона, и определены его потенциальные источники. На основании полученных результатов показано, что полиэтилен для новой защиты установки EDELWEISS-3 по примесному составу вполне отвечает требованиям эксперимента.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ. Авторы выражают благодарность коллаборации EDELWEISS и сотрудникам лаборатории LSM за предоставленные образцы полиэтилена.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Schmidt B. et al. (EDELWEISS Collab.). Muon-Induced Background in the EDELWEISS Dark Matter Search // *Astroparticle Physics*. 2013. V. 44. P. 28–39.
2. Armengaud E. et al. (EDELWEISS Collab.). First Results of the EDELWEISS-II WIMP Search Using Ge Cryogenic Detectors with Interleaved Electrodes // *Phys. Lett. B*. 2010. V. 687. P. 294–298.
3. Официальный сайт лаборатории LSM. <http://lsm.fr>
4. Armengaud E. et al. (EDELWEISS Collab.). Final Results of the EDELWEISS-II WIMP Search Using a 4-kg Array of Cryogenic Germanium Detectors with Interleaved Electrodes // *Phys. Lett. B*. 2011. V. 702. P. 329–335.
5. Муссаева М. А. Определение нейтронного потока и  $\gamma$ -излучения в активной зоне работающего и остановленного реактора с помощью кварцевых стекол и элементных мониторов // *АЭ*. 2008. Т. 105, № 3. С. 160–164.
6. Садыков И. И. Радиохимический нейтронно-активационный анализ некоторых особо чистых веществ с использованием высокопоточного ядерного реактора. Дис. . . канд. хим. наук. М., 1992. 97 с.
7. Фролова А. С. и др. Фон нейтронов из реакции  $(\alpha, n)$  на  $^{13}\text{C}$  в эксперименте EDELWEISS-II по прямому поиску слабо взаимодействующих частиц холдной небарионной темной материи // *Письма в ЭЧАЯ*. 2011. Т. 8, № 7(170). С. 1298–1301.

Получено 23 октября 2013 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 09.12.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,85. Тираж 235 экз. Заказ № 58138.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)