

**РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ 4π-ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОВ «ПРИПЯТЬ»**

**С. К. Андрухович<sup>1</sup>, А. В. Берестов<sup>1</sup>, С. Н. Гаркуша<sup>1</sup>, Э. А. Рудак<sup>1</sup>, А. М. Хильманович<sup>1</sup>,  
А. С. Узунбаджаков<sup>2</sup>, Ф. Е. Зязюля<sup>3</sup>, Н. Антович<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Институт физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup> *ОК УП «АКСИКОН» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>3</sup> *НЦ ФЧВЭ, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

<sup>4</sup> *Физический факультет, Черногорский университет, Подгорица, Черногория*

Сообщается о новых измерительных возможностях шестикристалльных гамма-спектрометров серии «Припятъ», имеющих близкую к 4π геометрию регистрации и большой рабочий объем измерительной камеры (до 5 л). Описаны принцип работы электроники новой системы регистрации и программные методы обработки получаемых спектров. Приводятся минимально измеряемые объемные активности для модернизированного спектрометра «Припятъ» (для <sup>137</sup>Cs, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th < 1 Бк/л, для <sup>40</sup>K < 10 Бк/л).

**Введение**

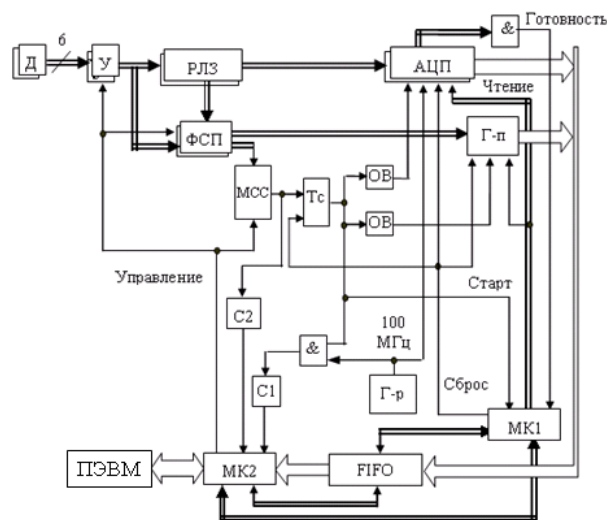
Гамма-спектрометры серии «Припятъ» [1], разработанные и изготовленные в Институте физики НАН Беларуси в рамках Государственной программы по преодолению последствий аварии на ЧАЭС в Республике Беларусь в конце 80-х годов, установлены и успешно работают в различных организациях страны. Отличительной особенностью спектрометров является геометрия регистрации, близкая к 4π (внутренний рабочий объем представляет собой куб со стороной 185 мм, в каждую грань которого вписан NaI(Tl)-детектор Ø 150 × 100 мм).

До недавнего времени основной областью применения спектрометра «Припятъ» являлось проведение массового экспрессного анализа содержания радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K в образцах различной природы и формы. Спектрометр имеет рекордные показатели по чувствительности регистрации и способен обнаруживать наличие радионуклидов цезия в воде на уровне 10 Бк/л за время измерения не более 1 мин.

В 2005 г. в Институте физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси завершена ОКР, результатом которой явилась разработка новой системы регистрации для гамма-спектрометров «Припятъ», основанной на регистрации спектров различной кратности совпадений, и двух методик выполнения измерений для 4π-гамма-спектрометров с большим рабочим объемом, позволяющими производить контроль за содержанием гамма-излучающих радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra в продуктах питания, воде, строительных материалах и <sup>220</sup>Rn в воздухе в соответствии с существующими допустимыми уровнями.

**1. Система регистрации спектрометра «Припятъ-2п»**

Принцип работы новой системы регистрации (рисунок), разработанной для спектрометра «Припятъ», следующий.



Блок-схема системы регистрации спектрометра «Припятъ-2п»: Д - детекторы; У - усилители; РЛЗ - распределенные линии задержки; АЦП - преобразователи заряд-код; ФСП - формирователи со следящим порогом; МСС - мажоритарная схема совпадений, ОБ - одновибратор; Г-п - годоскоп; Тс - триггер флага события; С1 - делитель частоты счетчика мертвого времени; С2 - делитель частоты счетчика событий; Г-р - генератор; МК1 и МК2 - микроконтроллеры; FIFO - буферная память; ПЭВМ - персональная ЭВМ.

Импульсы тока, поступающие с датчиков, усиливаются быстрым усилителем (У) с программно-управляемым коэффициентом усиления. Сигнал с выхода усилителя анализируется двумя устройствами: ФСП и АЦП. Сигнал с усилителя поступает на АЦП через РЛЗ, имеющую 10 промежуточных выводов. С одного из указанных выводов берется задержанный сигнал для ФСП. Сигналы с ФСП подаются на МСС. Из сигнала на выходе МСС формируются строб-сигналы для АЦП и годоскопа (Г-п), фиксирующего одновременность срабатывания датчиков.

По окончании преобразования всеми преобразователями выставляется сигнал готовности и программа управления микроконтроллера МК1 записывает данные из АЦП, отмеченных в годо-

скопе, в FIFO. Программа управления микроконтроллера МК2 передает данные из FIFO в компьютер основной программе.

В случае наличия в сигнале с детектора шумовых коротких импульсов возможно их подавление в спектре при помощи дискриминации сигнала по длительности, которое проводится при помощи дополнительного регистра годоскопа, фиксирующего наличие импульса на входе через контрольный интервал времени. Если импульса нет, то событие отбрасывается и производится сброс всех АЦП и годоскопа.

При разработке новой электроники системы регистрации спектрометра «Припять» использовались современные комплектующие белорусского производства (Интеграл) и компоненты ведущих западных фирм (Analog Devices, Xicor, Atmel, Texas Instruments, Data Delay Devices и др.).

Габариты компонент системы регистрации позволяют встраивать ее в системный блок ПЭВМ, образующий с ней единый блок регистрации БР-2п.

## 2. Методы измерения активности естественных и техногенных радионуклидов на спектрометре «Припять»

Отличительной особенностью спектрометра «Припять» по отношению к однодетекторным сцинтилляционным спектрометрам является возможность получения спектров совпадений при регистрации каскадного гамма-излучения, испускаемого радиоизотопами, что дает дополнительную информацию для расшифровки спектров.

Аппаратура системы регистрации, описанная выше, позволяет регистрировать события кратностью (числом одновременно сработавших детекторов) от 1 до 6.

В целях сокращения объема информации обычно регистрируются спектры совпадений кратностями 1, 2, 3. Спектры более высоких кратностей совпадений суммируются в спектр с максимальной граничной кратностью.

В табл. 1 представлены сгруппированные по диапазонам данные о гамма-линиях семейств  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ . В этой таблице отмечены линии, входящие в каскады множественностью 2 и 3. Часть из линий, начинающихся с верхних возбужденных уровней и являющихся родоначальниками каскадов, не включены в таблицу, так как имеют низкий квантовый выход.

В зависимости от радионуклидного состава образца полученные спектры можно обрабатывать либо с помощью традиционной методики обработки линейчатых спектров по фотопикам, либо с помощью матричного метода обработки сцинтилляционных спектров, при котором про-

водится подгонка измеренного реального спектра суммой функций откликов спектрометра на спектры излучения радионуклидов, предположительно входящих в состав образца.

При обработке спектра матричным методом энергетический диапазон спектрометра разбивается на отдельные интервалы. Ширины и положения интервалов для каждой конкретной задачи могут определяться отдельно из условия максимальной устойчивости решения системы уравнений к вариациям значений скорости счета в интервалах. В табл. 1 приведены варианты разбиения энергетической шкалы, предлагаемые в работах [2, 3], для различных типов сцинтилляционных спектрометров. В колонках 16 - 19 указаны схемы разбиения, используемые в спектрометрах «Припять» при измерениях в режиме «ЕРН +  $^{137}\text{Cs}$ » и в режиме измерения биологических образцов «БИО  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{40}\text{K}$ ». Функции отклика спектрометра на излучение отдельных радионуклидов или равновесных  $P_{ij}$  семейств нуклидов для каждой геометрии измерений определяются экспериментально при проведении калибровочных измерений и заносятся в специальный файл в виде матрицы (1) значений чувствительности спектрометра в энергетических интервалах:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij} - F_j}{A_i}, \quad (1)$$

где  $i$  – индекс радионуклида или семейства радионуклидов;  $j$  – индекс интервала;  $F_j$  – фоновая скорость счета в интервале  $j$ ;  $S_{ij}$  – скорость счета в интервале  $j$  от градуировочного источника, содержащего отдельный радионуклид или семейство радионуклидов  $i$  с  $A_i$  активностью.

Для учета самопоглощения излучения веществом измеряемого образца с конкретной массой и плотностью величины  $P_{ij}$  для него получают из измеренных при калибровке функций отклика спектрометра на излучение эталонных образцов объемом 1 л и с различной плотностью с помощью локально параметрического метода гладкой аппроксимации (метода «двух опор»), предложенного в [4]. Для учета зависимости  $P_{ij}$  от массы и объема (геометрии) образца его значение умножается на коэффициент, получаемый аппроксимацией калибровочных измерений для образцов с постоянной плотностью различного объема.

Значения активности радионуклидов и семейств радионуклидов в образце определяются из системы (2) уравнений

$$\sum_{i=1}^n A_i \cdot P_{ij} = S_j - F_j, \quad (2)$$

Таблица 1. Основные характеристики гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$

Энергия, кэВ	Квантовый выход, %	$^{238}\text{U}$			$^{232}\text{Th}$			$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	Диапазоны энергий								
		Изоотоп	$k=2$	$k=3$	Изоотоп	$k=2$	$k=3$			предлагаемые в [3]		«Прогресс»	«Приять»					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2615	34,5				$^{208}\text{Tl}$	+	$k=3$			2790	2780	2860	2800		3300	2900	2900	
2448	1,65	$^{214}\text{Bi}$								2340	2360		1950		2300			
2204	5,3	$^{214}\text{Bi}$																
2118	1,23	$^{214}\text{Bi}$																
1847	2,2	$^{214}\text{Bi}$																
1765	16,6	$^{214}\text{Bi}$	+							1900	1900	1840	1950	1900	2000	2140	1820	
1730	3,07	$^{214}\text{Bi}$								1600	1600	1670					1800	
1661	1,2	$^{214}\text{Bi}$								1650		1660						
1630	1,9				$^{228}\text{Ac}$					1565		1560	1600	1600	1610			
1620	2,7	$^{212}\text{Bi}$			$^{228}\text{Ac}$							1560	1600	1600	1590			
1588	3,7	$^{214}\text{Bi}$			$^{228}\text{Ac}$					1565		1560	1600	1600				
1509	2,3	$^{214}\text{Bi}$			$^{228}\text{Ac}$			$^{40}\text{K}$				1550	1600	1600				
1496	0,9				$^{228}\text{Ac}$													
1461	10,3				$^{228}\text{Ac}$													
1459	0,9				$^{228}\text{Ac}$													
1408	2,6	$^{214}\text{Bi}$																
1401	1,44	$^{214}\text{Bi}$																
1378	4,18	$^{214}\text{Bi}$								1380	1380	1380	1300	1300	1270			
1281	1,56	$^{214}\text{Bi}$											1300	1300				
1238	6,8	$^{214}\text{Bi}$									1240		1300	1300				
1155	1,82	$^{214}\text{Bi}$	+							1200								
1120	16,0	$^{214}\text{Bi}$								990	1085			1050				
1001	0,6	$^{234}\text{Pa}$			$^{228}\text{Ac}$					990	1000			1050				
969	17,5				$^{228}\text{Ac}$					990		980		1050				1000

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
934	3.34	<sup>214</sup> Bi																
911	29.0				<sup>228</sup> Ac													
860	4.3				<sup>208</sup> Tl	+				870	875	860						
840	0.9				<sup>228</sup> Ac													
806	1.31	<sup>214</sup> Bi	+	+									800		820			
794	4.84				<sup>232</sup> Th												800	800
786	1.21	<sup>214</sup> Pb																
785	2.0				<sup>212</sup> Bi													
768	4.9	<sup>214</sup> Bi	+	+									720			750		
727	6.3				<sup>212</sup> Bi													
665	1.6	<sup>214</sup> Bi	+	+									720					
661	85.0								<sup>137</sup> Cs				630					
609	48.4	<sup>214</sup> Bi	+	+						660	665	660	630	550				
583	28.7				<sup>208</sup> Tl	+	+			540	550	540	520	550				
511	7.66				<sup>208</sup> Tl	+	+						520	550	520		450	500
463	4.0				<sup>228</sup> Ac													
409	1.9				<sup>228</sup> Ac								380					
352	39.1	<sup>214</sup> Pb								375	372	385		350				
338	10.4				<sup>228</sup> Ac									350				
328	3.36				<sup>228</sup> Ac													
322	8.0				<sup>228</sup> Ac													
300	3.41				<sup>212</sup> Pb													
295	19.2	<sup>214</sup> Pb																
277	2.3				<sup>208</sup> Tl	+	+			280	282	283						
270	3.7				<sup>228</sup> Ac					270	270	270		200				
242	7.5	<sup>214</sup> Pb								210	210	210						
186	3.7	<sup>226</sup> Ra								205	205	205						
129	2.9				<sup>228</sup> Ac					165	165	165						
99.5	1.36				<sup>228</sup> Ac					105	102	100						
										90	88	85						

где  $A_i$  - активность  $i$ -го радионуклида или семейства радионуклидов;  $S_j$  - скорость счета импульсов в интервале  $j$  при измерении образца;  $F_j$  - фоновая скорость счета в  $j$ -м интервале,  $n$  - число компонент (радионуклидов) в образце.

Количество энергетических интервалов для обработки выбирается таким образом, чтобы система уравнений была избыточной, т.е. количество уравнений превышало количество неизвестных. Решение системы уравнений (приближенное) находится с помощью метода наименьших квадратов или адаптированного метода максимального правдоподобия. Решение системы в матричном виде (3) выглядит следующим образом [5]:

$$A = (PWP)^{-1} \cdot PWY, \quad (3)$$

где  $A$  - вектор параметров решения системы;  $P$  - конструкционная матрица системы (4), составленная из  $P_{ij}$ :

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1i} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{j1} & \dots & P_{ji} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$Y$  - вектор значений из правой части системы уравнений ( $S_j - F_j$ );  $W$  - матрица, обратная ковариационной матрице значений  $Y$ .

В случае, если значения  $Y_j$  не коррелированы, матрица  $W$  имеет диагональный вид (5)

$$W = \begin{pmatrix} 1/\sigma_1^2 & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1/\sigma_j^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $\sigma_j$  - дисперсия значения  $Y_j$ .

Полная относительная погрешность активности  $i$ -го радионуклида или семейства радионуклидов ( $P_{\text{доп}} = 0,95$ ) определяется как

$$\delta A_i = \delta A_{\text{сист}} + \frac{1}{A_i} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial A_i}{\partial (S_j - F_j)} \right]^2 \cdot (\Delta S_j^2 + \Delta F_j^2)}, \quad (6)$$

где  $\Delta S_j$  и  $\Delta F_j$  - абсолютные значения статистической погрешности измеренной и фоновой скорости счета в интервале  $j$ ;  $\delta A_{\text{сист}}$  - не исключенная систематическая составляющая погрешности, определяемая при проверке спектрометра.

Значение производной  $\partial A_i / \partial (S_j - F_j)$  определяется численно путем решения системы для значения скорости счета  $S_j$ , измененной на 0.1%.

Измерение удельной активности смеси радионуклидов с неизвестным составом возможно выполнять в случае, если в спектре имеются одиночные или слабо перекрывающиеся линии (пики полного поглощения). Алгоритм обработки в этом случае основан на поиске пиков, разложении мультиплетов для наложенных пиков, определении их площади путем подгонки аналитической кривой, определении энергий найденных пиков, их идентификации по библиотеке изотопов. Расчет активности идентифицированных радионуклидов в этом случае проводится программным обеспечением с учетом самопоглощения гамма-излучения материалом образца на основании калибровочных измерений эффективности регистрации гамма-квантов различных энергий и справочных коэффициентов поглощения.

## Заключение

В Институте физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси разработаны и утверждены в Белорусском государственном институте метрологии (БелГИМ) и Госстандарте две методики выполнения измерений: методика измерения объемной активности радона в воздухе жилых и служебных помещений и плотности потока радона с поверхности земли и строительных конструкций на сцинтилляционных 6-кристалльных спектрометрах «Припять» (МВИ.МН 2397-2005) и методика выполнения измерений удельной активности естественных и техногенных радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционных 6-кристалльных спектрометрах «Припять» (МВИ.МН 2424-2005).

Проведена модернизация гамма-спектрометров «Припять» в двух организациях-потребителях: БелГИМ и Институте физике им. Б.И. Степанова НАН Беларуси. Спектрометры прошли метрологическую аттестацию.

Спектрометры «Припять» в варианте «Припять-2п» полностью отвечают потребностям пользователей по измерению объемной (ОА) и удельной активности (УА) естественных и техногенных гамма-излучающих радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) в воде, продуктах питания, сельскохозяйственном сырье, продукции лесного хозяйства, почве и других объектах окружающей среды, удельной эффективной активности естественных радионуклидов в строительных материалах, измерению объемной активности радона в воздухе и плотности потока радона с поверхности земли и строительных конструкций. Они могут использоваться при экологическом мониторинге, сертификации продукции, таможенном досмотре и т.д.

Полных аналогов спектрометру «Припять» другими производителями не выпускается. Измерительные возможности спектрометра «Припять-2п» превышают уровень лучших схожих серийно выпускаемых аналогов: радиометров спектрометрического типа и бета-гамма-спектрометров.

Преимущества спектрометра «Припять-2п» по отношению к однокристалльным сцинтилляционным радиометрам и спектрометрам выражаются в 4π-геометрии регистрации, упрощенной пробоподготовке, возможности неразрушающего контроля, совмещении амплитудного анализа с временным (по совпадениям), экспрессности измерений, более высокой чувствительности.

Минимально измеряемые удельные активности (Бк/кг)  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  для модернизи-

рованного спектрометра «Припять» следующие:

$^{137}\text{Cs}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Не более 1	Не более 1	Не более 1	Не более 10

В табл. 2 приведены экспериментально измеренные эффективности регистрации спектрометра «Припять» в зависимости от положения точечного источника в измерительной камере для энергий гамма-квантов, перекрывающих весь энергетический диапазон, в котором работает данный спектрометр. Из этих данных видно, что анизотропия чувствительности спектрометра «Припять» для различных точечных геометрий регистрации составляет 10 % от среднего значения.

Таблица 2. Анизотропия чувствительности спектрометра «Припять»

Радионуклид	Линия, кэВ	Эффективность регистрации для различных геометрий измерения			Максимальное отклонение эффективности от значения в центре, %
		Центр	1 см от середины ребра	2 см от угла	
$^{137}\text{Cs}$	662	0,176	0,176	0,157	11
$^{228}\text{Th}$	239	0,188	0,165	0,149	20
$^{228}\text{Th}$	583	0,063	0,057	0,053	16
$^{228}\text{Th}$	2615	0,018	0,018	0,014	20
$^{88}\text{Y}$	898	0,134	0,131	0,114	15
$^{88}\text{Y}$	1836	0,067	0,068	0,055	18

На базе разработанных методик и 32-кристалльного спектрометра АРГУС [6] планируется создание образцовой установки для эталонных измерений активности образцов большого объема или нестандартных геометрий (например, эталонных образцов для СИЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрухович С.К., Берестов А.В., Гутько В.И. и др. Высокочувствительный шестикристалльный гамма-спектрометр «Припять». - Минск, 1993. - 40 с. - (Препр. / АН Беларуси. Ин-т физики; № 681).
2. Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». - М.: ГП ВНИИФТРИ, 1996.
3. Бобров В.А., Гофман А.М. Лабораторный гамма-спектрометрический анализ естественных радиоактивных элементов. - Новосибирск, 1971. - 20 с.
4. Соколов А.М. Программа POLAS для построения по экспериментальным данным сглаженной зависимости и ее производной. - Киев, 1986. - 15 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-86-40).
5. Худсон Д. Статистика для физиков. - М.: Мир, 1970. - 296 с.
6. Andrukovich S.K., Antovich N., Berestov A.V. et al. Positron investigation in the Institute of Physics National Academy of Sciences of Belarus // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy: Proc. of the Int. Conf. (Kyiv, May 29 - June 03, 2006). - Kyiv, 2007. - P. I. - 393 - 401.

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ 4π-ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІВ "ПРИП'ЯТЬ"

С. К. Андрухович, А. В. Берестов, С. Н. Гаркуша, Е. А. Рудак, А. М. Хильманович, А. С. Узунбаджаков, Ф. Е. Зязюля, Н. Антович

Повідомляється про нові вимірювальні можливості шестикристалльних гамма-спектрометрів серії «Прип'ять», що мають близьку до 4π геометрію реєстрації та великий робочий об'єм вимірювальної камери (до 5 л). Описано принцип роботи електроніки нової системи реєстрації та програмні методи обробки одержаних спектрів. Наводяться мінімально вимірювані об'ємні активності для модернізованого спектрометра «Прип'ять» (для  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th} < 1$  Бк/л, для  $^{40}\text{K} < 10$  Бк/л).

**EXTENSION OF ABILITIES OF THE  $4\pi$ -GAMMA-SPECTROMETERS “PRIPYAT”**

**S. K. Andrukhovich, A. V. Berestov, S. N. Harkusha, E. A. Rudak, A. M. Khilmanovich,  
A. S. Uzunbadjakov, F. E. Zyazyulya, N. Antovich**

The new measuring possibilities of 6-crystal gamma-rays spectrometers of “Pripyat” type are reported. Distinctive features of these spectrometers are the  $4\pi$  registration geometry and large sensitive volume (up to 5 l). Principle of operation of the new registration system and the processing methods of spectra using the corresponding software are described. The minimal volume activities measured by using modernized spectrometers of “Pripyat” type are presented ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th} < 1 \text{ Bq/l}$ ,  $^{40}\text{K} < 10 \text{ Bq/l}$ ).

Поступила в редакцию 23.06.06,  
после доработки – 14.06.07.