

УДК 5.57.574

Г. К. Канагатова, М. С. Хамада, С. Б. Борзаков, К. Храмко

Изучение естественной и искусственной радиоактивности образцов растений

Изучена естественная и искусственная радиоактивность в образцах растений из Египта. Для измерения гамма-радиоактивности в образцах был использован детектор из высокочистого германия (HPGe) фирмы Canberra. Из измеренных спектров гамма-излучения была получена величина естественной активности ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th .

С помощью нейтронного активационного анализа, проведённого на реакторе ИБР-2, в этих же образцах были определены концентрации 21 элемента, среди которых есть элементы, относящиеся к основным загрязнителям окружающей среды.

Ключевые слова: радиоактивность, нейтронный активационный анализ, гамма-спектроскопия, HPGe детектор.

Об авторах

Канагатова Гулбаршын Каиргазыевна – студент магистратуры кафедры ядерной физики Государственного университета «Дубна».

Хамада Мохамед – научный сотрудник Ядерного исследовательского центра, Каир, Египет.

Борзаков Сергей Борисович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований, Дубна.

Храмко Константин – инженер Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований, Дубна.

В последнее время особое внимание уделяется изучению воздействия различных элементов, в том числе радионуклидов, на здоровье человека и состояние окружающей среды.

Ядерно-физические методы, используемые для проведения элементного анализа, превосходят по чувствительности химические методы. Одним из таких методов является нейтронно-активационный анализ (НАА). НАА является неdestructивным методом анализа с высокой чувствительностью, что позволяет определить с высокой точностью около 45 химических элементов в различных типах образцов [3].

С целью определения возможного уровня загрязнения окружающей среды египетской компанией, производящей неорганические удобрения, была изучена естественная радиоактивность и элементный состав образцов растений из Египта, собранных вблизи химического предприятия *Abu Zabal Company*.

Информация об образцах

В качестве образцов для исследования были использованы листья растений, произрастающих вдоль реки Нил, вблизи фабрики *Abu Zabal Company*, Египет. Карта пробоотбора представлена на рис. 2. Общая протяженность территории пробоотбора 2000 м. Образец P0 соответствует расположению центра фабрики *Abu Zabal Company*, координаты образца на карте: 30°16' южной широты и 31°22' восточной долготы. Образцы P1L-P5L собраны в северо-восточном направлении, вдоль реки, от образца P0, P1R-P5R – в юго-западном направлении, вдоль реки. Номер образца возрастает с расстоянием от центральной точки сбора P0, шаг пробоотбора составляет 200 м. Два реперных образца (относительно чистые, P6L и P6R) были отобраны на расстоянии 6000 м от предполагаемого центра химического загрязнения P0 (химическое предприятие *Abu Zabal Company*).

В табл. 1 представлены некоторые характеристики исследуемых образцов.

Таблица 1. Типы исследуемых образцов растений

№ образца	Название на русском	Название на латыни	Изображение
P0, P1R, P4R, P5R, P6L, P6R	Кубинская лавра	Ficus Retusa	
P3R, P4L, P5L	Клещевина обыкновенная	Ricinus communis	
P1L, P2L, P3L	Лапчатка гусиная	Eleusine Indica	
P2R	Евкалипт	Eucalyptus Globulus	

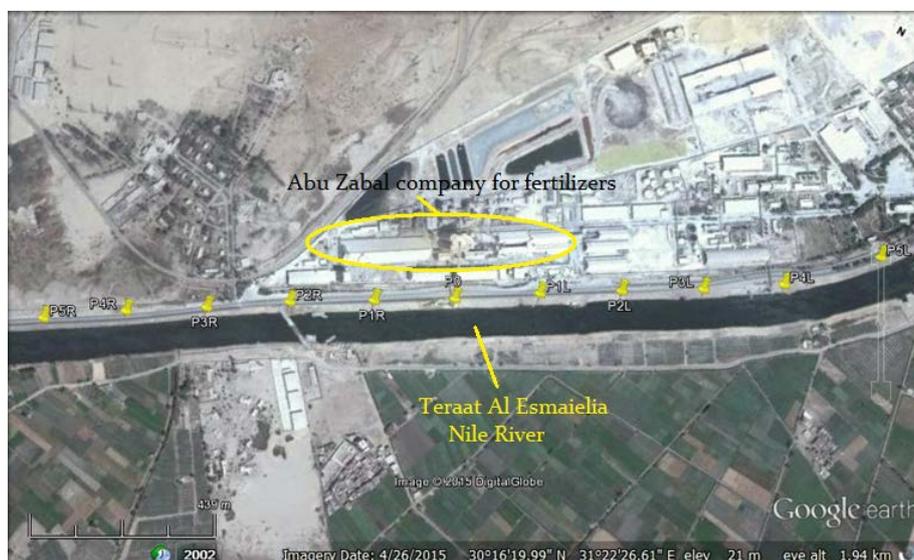


Рис. 1. Карта пробоотбора

Пробоподготовка и проведение измерений

Собранные образцы были промыты водой для удаления поверхностных загрязнений, высу-

шены на воздухе в течение 72 часов и измельчены в блендере с использованием пластиковых насадок. После измельчения образцы были высушены в течении 72 часов при температуре 70 °С до постоянного веса. Для хранения и

транспортировки образцы были упакованы в герметичные пластиковые контейнеры.

Измерение наведенной активности образцов проводилось с использованием коаксиального HPGe-детектора компании *Canberra* с относительной эффективностью регистрации гамма-квантов 40%, ПШПВ – 1,8 кэВ в пике с $E_\gamma = 1332,4$ кэВ от источника ^{60}Co , и 16К-канальным амплитудным анализатором. Набор и анализ данных проводился с использованием программного обеспечения *Genie™ 2000*. Калибровка детектора и его эффективность определялись с помощью следующих образцовых источников гамма излучения (ОСГИ): ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am . Абсолютная эффективность регистрации гамма-кванта $\varepsilon(E_\gamma)$ с энергией E_γ детектором по пику полного поглощения определяется по формуле:

$$\varepsilon(E_\gamma) = \frac{1}{A_t \cdot I_\gamma(E_\gamma)} \frac{S(E_\gamma)}{\Delta t}, \quad (1)$$

где A_t – активность радиоизотопа (в 4π), пересчитанная на дату измерения; $I_\gamma(E_\gamma)$ – интенсивность излучения гамма-квантов с энергией E_γ на акт распада радиоизотопа; $S(E_\gamma)$ – площадь фотопика; Δt – «живое» время измерения.

Экспериментально измеренные эффективности регистрации γ -квантов различных энергий позволяют построить кривую зависимости эффективности детектора, которая была в дальнейшем использована в работе. Профитировав экспериментальные данные с помощью формулы (2), была получена кривая зависимости эффективности регистрации γ -квантов HPGe-детектором от их энергии (см. рис. 2):

$$\ln \varepsilon(E_\gamma) = A_0 + A_1 \ln E_\gamma + A_2 (\ln E_\gamma)^2 + A_3 (\ln E_\gamma)^3 + A_4 (\ln E_\gamma)^4, \quad (2)$$

где параметры A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 – функции подгонки находятся методом наименьших квадратов; E_γ – энергия гамма-кванта в кэВ.

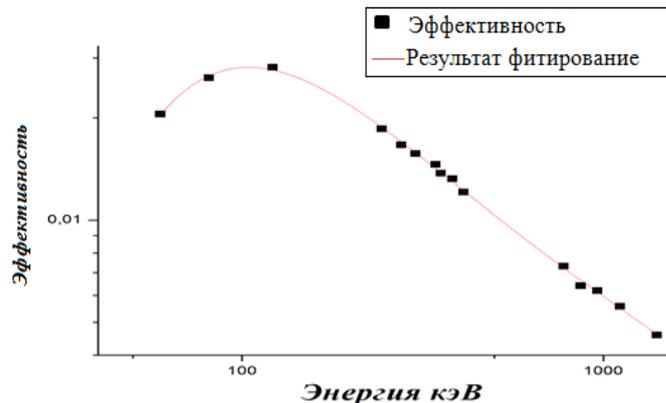


Рис. 2. Зависимость эффективности регистрации γ -квантов от их энергии для HPGe-детектора

Определение естественной радиоактивности образцов растений

Измерение естественной активности всех образцов (одновременно) проводилось в течении 24-х часов на расстоянии 0 см от HPGe-детектора (образцы были расположены на детекторе). Для увеличения точности измерения из накопленного спектра естественной активности образцов была вычтена фоновая активность. Фоновый спектр, как и спектр образцов, был накоплен в течении 24-х часов. На рис. 3 представлено сравнение спектров фонового измерения и измерения естественной активности образцов.

Сбор и анализ данных проводился с использованием программы *Genie™ 2000* фирмы *Can-*

berra. Расшифровка спектров (идентификация пиков) проводилась с помощью онлайн библиотеки *WWW Table of Radioactive Isotopes* [6].

Используя отношение (3), были вычислены активности естественных радионуклидов в измеренном образце:

$$A_s \left(\frac{\text{Бк}}{\text{кг}} \right) = C_a / \varepsilon \cdot a_\gamma \cdot M_s, \quad (3)$$

где M_s – масса образца (кг); ε – эффективность детектора для определенной энергии – лучей; C_a – число импульсов в секунду; $C_a = \frac{S(E_\gamma)}{t}$ (здесь $S(E_\gamma)$ – площадь пика полного поглощения; t – «живое» время измерения); a_γ – абсолютная вероятность испускания гамма-кванта (интенсивность выхода гамма-кванта).

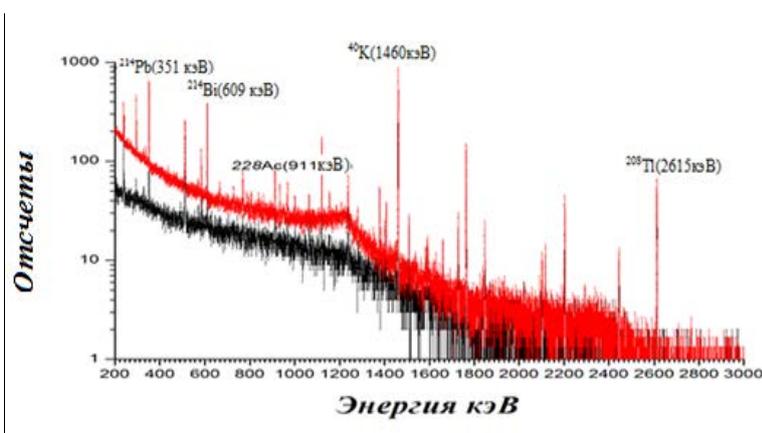


Рис. 3. Энергетическое распределение событий, зарегистрированных HPGe-детектором при измерении фонового излучения (спектр черного цвета) и излучения естественной активности образцов растений

Таблица 2. Удельная активность нуклидов

		Е (кэВ)	a_γ (%)	C_a (с ⁻¹)	А (Бк/кг)
²²⁶ Ra (²³⁸ U)	²¹⁴ Pb	241.997	7.43 ± 0.11	0.0080 ± 0.0003	11.2 ± 0.5
		295.224	19.3 ± 0.02	0.0190 ± 0.0004	12.8 ± 0.3
		351.932	37.6 ± 0.04	0.0350 ± 0.0004	13.3 ± 0.2
	²¹⁴ Bi	609.312	46.10 ± 0.05	0.0380 ± 0.0005	37.1 ± 0.5
		768.356	4.94 ± 0.06	0.0050 ± 0.0004	26.7 ± 2.2
²³² Th	²²⁸ Ac	338.320	11.27 ± 0.20	0.0030 ± 0.0005	3.8 ± 0.6
		911.204	25 ± 0.04	0.0045 ± 0.0002	11.0 ± 0.5
		968.971	15.8 ± 0.03	0.0030 ± 0.0001	4.3 ± 0.2
	²¹² Bi	727.330	6.58 ± 0.05	0.0015 ± 0.0003	12.0 ± 2.4
		785.370	1.1 ± 0.13	0.00010 ± 0.00003	28.5 ± 8.6
⁴⁰ K	⁴⁰ K	1460.830	11	0.120 ± 0.001	499.2 ± 4.2

Активность ²³⁸U определяется по активности изотопа ²²⁶Ra, который является продуктом цепочки распада. Для расчета активности использовались гамма-линии конечных продуктов цепи распада, а именно изотопы ²¹⁴Pb ($E_\gamma = 352$ кэВ) и ²¹⁴Bi ($E_\gamma = 609$ кэВ). Активность ²³²Th была рассчитана с помощью гамма-линий радиоизотопов ²²⁸Ac ($E_\gamma = 911$ кэВ) и ²¹²Bi ($E_\gamma = 727$ кэВ). В табл. 2 приведены экспериментальные данные активности радиоизотопов радия, тория и калия, рассчитанные по формуле (3).

По данным, представленным в работе [5], допустимые уровни активности ²²⁶Ra и ²³²Th составляют 35 Бк/кг. Средние мировые значения активности ⁴⁰K лежат в интервале 140–850 Бк/кг (среднее значение 370 Бк/кг, разрешенный уровень 400 Бк/кг). По нашим расчетам активности ⁴⁰K, ²³²Th и ²³⁸U лежат в указанных интервалах. Так как суммарная активность образцов не превышает указанный

диапазон, то можно сказать, что фабрика наносит незначительный радиационный вред окружающей среде.

Элементный анализ образцов методом НАА

Образцы облучались нейтронами на 3-м канале импульсного реактора ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ [2]. Описание установки дано в работе [4]. Облучение проводилось в течение всего цикла работы реактора – 13.5 дней. С помощью анализа измерений, проведенных с индикаторами из меди и золота, были определены значения потока тепловых ($F_{th} = 3.2 \cdot 10^{11}$ н·см⁻²сек⁻¹); и резонансных ($F_{res}(E_n = 1 \text{ эВ}) = 4.3 \cdot 10^{10}$ н·см⁻²сек⁻¹) нейтронов. Образцы измерялись на высоте 5 см от детектора, время измерения ~10–20 часов.

Масса искомого элемента в образце была рассчитана по следующей формуле:

$$m_x = \frac{N_\gamma \cdot M \cdot \lambda \cdot e^{\lambda t_d}}{N_A \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot \theta \cdot (\sigma_{th} \Phi_{th} + I_{res} \Phi_{res}) [1 - \exp(-\lambda t_{irr})] [1 - \exp(-\lambda t_{meas})]}, \quad (5)$$

m_x – масса искомого элемента в образце (г);
 t_{irr} – время облучения; t_d – время, прошедшее от конца облучения до начала измерения;
 t_{meas} – время измерения; N_γ – число отсчетов детектора для определенной линии; θ – содержание изотопа в естественной смеси (%);
 $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро; γ – интенсивность выхода гамма-квантов определенной энергии [2]; σ_{th} – сечение захвата тепловыми нейтронами; $I_{res} = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \frac{\sigma(E)}{E} dE$ – резонансный интеграл; $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ – постоянная распада; Φ_{th} , Φ_{res} – потоки тепловых и резонансных нейтронов; $\varepsilon(E_\gamma)$ – эффективность детектора. Значения сечений захвата тепловых нейтронов и резонансных интегралов взяты из справочника Т.С. Белановой и др. [1].

Для определения концентраций найденных элементов в образцах растений была использована формула:

$$n = \frac{m_x}{m_{обр}}, \quad (6)$$

где n – концентрация элемента (мг/кг или ppm), $m_{обр}$ – масса образца (г).

Вместе с исследуемыми образцами облучался образец стандарта почвы 1633С с известными концентрациями содержащихся в нём элементов. Концентрации элементов рассчитывались абсолютным и относительным методами. Использование относительного метода позволило значительно уменьшить погрешности, связанные с неопределённостями в определении потока нейтронов, эффективности детектора, а также с неточностью определения ядерных данных.

Таблица 3. Содержание элементов, определенных абсолютным методом в 7 образцах, собранных в северо-восточном направлении (мг/кг)

№	Элемент	Радио-нуклид	Концентрация (ppm)						
			P0	P1L	P2L	P3L	P4L	P5L	P6L
1	Na	²⁴ Na	5170 ± 32	6184 ± 7	3511 ± 4	1377 ± 5	4131 ± 14	5641 ± 10	1718 ± 67
2	Sc	⁴⁶ Sc	0.5 ± 0.01	0.4 ± 0.008	0.4 ± 0.002	0.7 ± 0.003	0.45 ± 0.001	0.4 ± 0.002	0.4 ± 0.001
3	Cr	⁵¹ Cr	18 ± 0.7	41 ± 0.7	15 ± 0.16	15 ± 0.2	11.5 ± 0.06	15 ± 0.1	12.6 ± 0.1
4	Fe	⁵⁹ Fe	2176 ± 198	6246 ± 173	2474 ± 111	3086 ± 109	2599 ± 34.2	2987 ± 72	2972 ± 41
5	Co	⁶⁰ Co	4.0 ± 0.3	3.8 ± 0.2	0.9 ± 0.04	1.5 ± 0.02	1.0 ± 0.01	1.1 ± 0.01	0.6 ± 0.006
6	Zn	⁶⁵ Zn	226 ± 6	650 ± 6.1	219 ± 1.2	206 ± 1.2	154 ± 0.5	212 ± 0.9	189 ± 0.5
7	Ga	⁷² Ga	113 ± 8	374 ± 22	205 ± 11	366 ± 12	101 ± 6.2	155 ± 13	478 ± 185
8	As	⁷⁶ As	7.6 ± 0.7	8.0 ± 0.7	1.1 ± 0.09	1.8 ± 0.1	1.6 ± 0.2	0.85 ± 0.2	–
9	Br	⁸² Br	47 ± 0.7	49 ± 0.4	32 ± 0.3	51.7 ± 0.5	18.6 ± 0.2	45 ± 0.5	19.6 ± 0.7
10	Rb	⁸⁶ Rb	4.7 ± 2	31.7 ± 3	20.4 ± 0.3	21 ± 0.2	17.2 ± 0.1	20 ± 0.3	17.2 ± 0.2
11	Mo	⁹⁹ Mo	18.1 ± 0.2	10.7 ± 1.5	1.4 ± 0.05	39.8 ± 3.1	2.2 ± 0.04	1.7 ± 0.05	1.5 ± 0.07
12	Cd	¹¹⁵ Cd	7.9 ± 0.5	6.2 ± 0.4	0.7 ± 0.08	0.8 ± 0.07	0.9 ± 0.05	1.6 ± 0.2	3.8 ± 0.2
13	Sb	¹²² Sb	0.8 ± 0.05	0.6 ± 0.05	0.7 ± 0.02	0.3 ± 0.02	2.6 ± 0.06	1.3 ± 0.1	0.6 ± 0.08
14	Sb	¹²⁴ Sb	1.3 ± 0.1	1.8 ± 0.1	0.8 ± 0.07	0.5 ± 0.04	3.0 ± 0.05	1.6 ± 0.1	0.6 ± 0.03

Окончание табл. 3

№	Элемент	Радио-нуклид	Концентрация (ppm)						
			P0	P1L	P2L	P3L	P4L	P5L	P6L
15	Ba	¹³¹ Ba	41.2 ± 11	39.3 ± 4.2	25 ± 2.5	35.0 ± 3.4	54.6 ± 3.1	64.6 ± 5	67.0 ± 3
16	La	¹⁴⁰ La	2 ± 0.2	2.1 ± 0.2	1.4 ± 0.08	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.1	1.4 ± 0.1	1.8 ± 0.2
17	Ce	¹⁴¹ Ce	4.7 ± 0.9	1.6 ± 0.17	2 ± 0.05	2.3 ± 0.07	3.7 ± 0.04	3. ± 0.07	6.8 ± 0.1
18	Sm	¹⁵³ Sm	0.6 ± 0.003	1.8 ± 0.005	0.4 ± 0.001	0.4 ± 0.001	0.5 ± 0.001	0.3 ± 0.001	0.1 ± 0.001
19	Hf	¹⁸¹ Hf	7.4 ± 0.3	23.1 ± 0.75	0.5 ± 0.05	0.6 ± 0.02	0.8 ± 0.02	1.5 ± 0.09	0.2 ± 0.006
20	W	¹⁸⁷ W	1.3 ± 0.1	0.9 ± 0.09	1.02 ± 0.07	0.5 ± 0.09	0.7 ± 0.19	0.8 ± 0.07	-
21	Au	¹⁹⁸ Au	0.008±0.001	0.04 ±0.001	0.05 ± 0.002	0.006±0.0003	0.01±0.00007	0.01±0.0001	0.007±0.0001

Таблица 4. Содержание элементов, определенных по стандарту в 7 образцах, собранных в северо-восточном направлении (мг/кг)

№	Элемент	Радио-нуклид	Концентрация (ppm)						
			P0	P1L	P2L	P3L	P4L	P5L	P6L
1	Na	²⁴ Na	1668 ± 1.5	1968 ± 3.0	1117 ± 1.4	438 ± 0.4	1315 ± 0.4	898 ± 0.4	554 ± 1.0
2	K	⁴² K	8676 ± 47	26550 ± 148	15404 ± 100	24900 ± 45	26600 ± 35	20020 ± 30	-
3	Sc	⁴⁶ Sc	0.5 ± 0.01	0.4 ± 0.01	0.3 ± 0.002	0.4 ± 0.002	0.4 ± 0.003	0.5 ± 0.002	0.3 ± 0.003
4	Fe	⁵⁹ Fe	1900 ± 294	5262 ± 340	2071 ± 100	2581 ± 123	2172 ± 105.0	2571.3 ± 68.0	2490 ± 119
5	Co	⁶⁰ Co	3.0 ± 0.2	3.0 ± 0.1	0.7 ± 0.03	1.2 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.01	0.5 ± 0.02
6	Ga	⁷² Ga	8.7 ± 0.5	32.5 ± 1.7	13.3 ± 0.8	13 ± 0.7	12 ± 1.0	3.2 ± 0.1	3.7 ± 0.04
7	As	⁷⁶ As	4.1 ± 0.4	4.4 ± 0.1	0.6 ± 0.05	1 ± 0.03	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.03	-
8	Rb	⁸⁶ Rb	1.2 ± 0.4	7.9 ± 0.7	5.1 ± 0.1	5.2 ± 0.03	4.3 ± 0.1	4.9 ± 0.1	4.3 ± 0.2
9	Sb	¹²² Sb	0.3 ± 0.02	0.2 ± 0.03	0.2 ± 0.01	0.1 ± 0.01	1.2 ± 0.02	0.5 ± 0.01	0.2 ± 0.01
		¹²⁴ Sb	0.5 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.3 ± 0.04	0.2 ± 0.04	1.0 ± 0.2	0.7 ± 0.1	0.3 ± 0.04
10	Ba	¹³¹ Ba	28.7 ± 3.7	-	12.4 ± 1.3	16.3 ± 1.0	23 ± 2.1	33 ± 1.0	32 ± 2.0
11	La	¹⁴⁰ La	2.0 ± 0.2	1.8 ± 0.2	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.3	1 ± 0.1	1.2 ± 0.3	1.3 ± 0.1
12	Hf	¹⁸¹ Hf	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.07	0.1 ± 0.01	0.1 ± 0.01	0.2 ± 0.02	0.2 ± 0.01	0.1 ± 0.02
13	U	²³⁹ Np	8.0 ± 0.1	2.0 ± 0.1	1.2 ± 0.02	0.4 ± 0.01	0.7 ± 0.02	0.6 ± 0.02	0.2 ± 0.01

Таблица 5. Содержание элементов, определенных абсолютным методом в 6 образцах, собранных в юго-западном направлении (мг/кг)

№	Элемент	Радио-нук-лид	Концентрация (ppm)						
			P0	P1R	P2R	P3R	P4R	P5R	P6R
1	Na	²⁴ Na	5170 ± 32	1820 ± 3.4	2638 ± 1.75	1391 ± 2.2	1488 ± 3.3	1338 ± 6	2006 ± 39
2	Sc	⁴⁶ Sc	0.5 ± 0.01	0.2 ± 0.001	0.2 ± 0.001	0.2 ± 0.001	0.7 ± 0.001	0.5 ± 0.001	0.5 ± 0.001
3	Cr	⁵¹ Cr	18 ± 0.7	13.6 ± 0.1	23 ± 0.2	19 ± 0.1	16 ± 0.08	13 ± 0.08	14 ± 0.07
4	Fe	⁵⁹ Fe	2176 ± 198	1697 ± 46	2591 ± 91	2340 ± 61	4203 ± 67	2863 ± 52	2837 ± 46
5	Co	⁶⁰ Co	4.0 ± 0.3	1.0 ± 0.02	0.9 ± 0.03	0.6 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.2 ± 0.01	1.0 ± 0.007
6	Zn	⁶⁵ Zn	226 ± 5.6	157 ± 0.5	264 ± 1.0	214 ± 0.7	193 ± 0.6	217 ± 0.6	199 ± 0.6
7	Ga	⁷² Ga	113 ± 7.6	90.2 ± 4.3	168 ± 5.6	111 ± 7.3	106 ± 6	99 ± 10.3	777 ± 65.2
8	As	⁷⁶ As	7.6 ± 0.7	1.9 ± 0.1	0.6 ± 0.05	0.4 ± 0.04	1.5 ± 0.1	1.2 ± 0.2	4.2 ± 1.1
9	Br	⁸² Br	47 ± 0.7	30 ± 0.3	54 ± 0.2	15 ± 0.2	37.4 ± 0.2	37 ± 0.3	41.2 ± 0.6
10	Rb	⁸⁶ Rb	4.7 ± 1.8	53.7 ± 0.4	23 ± 0.3	19 ± 0.2	26 ± 0.2	20 ± 0.2	18 ± 0.1
11	Mo	⁹⁹ Mo	18.1 ± 0.2	3.6 ± 0.2	6.5 ± 0.5	6.2 ± 0.3	14.4 ± 0.3	16.5 ± 0.4	27.5 ± 0.7
12	Cd	¹¹⁵ Cd	7.9 ± 0.5	4.3 ± 0.1	2.6 ± 0.1	1.0 ± 0.07	1.0 ± 0.08	1.0 ± 0.01	0.8 ± 0.08
13	Sb	¹²² Sb	0.8 ± 0.05	0.5 ± 0.007	1.3 ± 0.1	0.8 ± 0.1	1.2 ± 0.07	1.6 ± 0.08	2.3 ± 0.1
14	Sb	¹²⁴ Sb	1.3 ± 0.1	0.1 ± 0.005	1.4 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.4 ± 0.08	1.8 ± 0.06	2.4 ± 0.06
15	Ba	¹³¹ Ba	41.2 ± 11	32 ± 2.3	40 ± 2.8	19 ± 1.3	94 ± 5.2	66 ± 4.2	42.6 ± 3.4
16	La	¹⁴⁰ La	2 ± 0.2	1.0 ± 0.1	0.8 ± 0.06	0.6 ± 0.08	1.8 ± 0.07	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.2
17	Ce	¹⁴¹ Ce	4.7 ± 0.9	1.7 ± 0.04	1.4 ± 0.06	1.0 ± 0.03	3.4 ± 0.04	4.0 ± 0.05	7.0 ± 0.05
18	Sm	¹⁵³ Sm	0.6 ± 0.003	0.1 ± 0.001	0.3 ± 0.001	0.2 ± 0.001	0.4 ± 0.001	0.3 ± 0.001	0.2 ± 0.001
19	Hf	¹⁸¹ Hf	7.4 ± 0.3	0.1 ± 0.005	0.7 ± 0.06	0.3 ± 0.02	0.3 ± 0.01	0.3 ± 0.01	0.3 ± 0.008
20	W	¹⁸⁷ W	1.3 ± 0.1	1.0 ± 0.03	2.2 ± 0.04	0.5 ± 0.01	0.5 ± 0.06	0.8 ± 0.06	-
21	Au	¹⁹⁸ Au	0.008 ± 0.001	0.01 ± 0.0001	0.01 ± 0.0002	0.01 ± 0.0001	0.004 ± 0.0001	0.006 ± 0.0001	0.005 ± 0.0001

Таблица 6. Содержание элементов, определенных по стандарту в 6 образцах, собранных в юго-западном направлении (мг/кг)

№	Элемент	Радио-нуклид	Концентрация (ppm)						
			P0	P1R	P2R	P3R	P4R	P5R	P6R
1	Na	²⁴ Na	1668 ± 1.5	580 ± 3.0	886 ± 3	443 ± 0.8	475 ± 1.2	426 ± 0.5	638 ± 0.8
2	K	⁴² K	8676 ± 47	26550 ± 148	22090 ± 273	17370 ± 92	26478±380	20140 ± 29.6	–
3	Sc	⁴⁶ Sc	0.5 ± 0.01	0.2 ± 0.01	0.2 ± 0.003	0.2 ± 0.001	0.7 ± 0.003	0.5 ± 0.001	0.4 ± 0.003
4	Fe	⁵⁹ Fe	1900 ± 294	1414 ± 240	2280 ± 156	2052 ± 113	3522 ± 134	2512 ± 172	2488 ± 119
5	Co	⁶⁰ Co	3.0 ± 0.2	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.04	0.5 ± 0.01	1.2 ± 0.01	0.8 ± 0.03	0.5 ± 0.02
6	Ga	⁷² Ga	8.7 ± 0.5	32.5 ± 1.7	58 ± 3.2	13 ± 0.5	12.5 ± 0.7	10 ± 0.3	56 ± 0.04
7	As	⁷⁶ As	4.1 ± 0.4	1.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.03	0.9 ± 0.1	0.8 ± 0.03	2.8 ± 1.0
8	Rb	⁸⁶ Rb	1.2 ± 0.4	14 ± 0.5	6 ± 0.2	4.7 ± 0.1	6.4 ± 0.1	5.3 ± 0.2	4.6 ± 0.2
9	Sb	¹²² Sb	0.3 ± 0.02	0.3 ± 0.03	0.7 ± 0.03	0.3 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.8 ± 0.1	1.2 ± 0.2
		¹²⁴ Sb	0.5 ± 0.1	0.1 ± 0.03	0.6 ± 0.02	0.4 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.1	1.0 ± 0.3
10	Ba	¹³¹ Ba	28.7 ± 3.7	27 ± 1.2	39 ± 3.0	10 ± 0.8	41 ± 2.1	47 ± 2.0	31 ± 2.0
11	La	¹⁴⁰ La	2.0 ± 0.2	1.0 ± 0.2	0.8 ± 0.2	0.5 ± 0.1	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.1	1.5 ± 0.04
12	Hf	¹⁸¹ Hf	0.5 ± 0.1	0.1 ± 0.07	0.4 ± 0.1	0.1 ± 0.01	0.2 ± 0.01	0.3 ± 0.02	0.3 ± 0.02
13	U	²³⁹ Np	8.0 ± 0.1	2.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1	0.5 ± 0.01	0.6 ± 0.02	0.5 ± 0.05	0.5 ± 0.01

Заключение

Из измеренных спектров гамма-лучей была получена величина активности ⁴⁰K, ²³²Th и ²³⁸U в образцах растений, отобранных вблизи предприятия *Abu Zabal Company*, Египет. Результаты измерений показали, что суммарная активность образцов существенно не превышает уровня естественной радиоактивности.

Нейтронный активационный анализ, проведенный на 3-м канале ИБР-2, показал, что это эффективный метод анализа ряда элементов в растениях. Были идентифицированы и рассчитаны концентрации 21-го элемента. Содержание некоторых элементов, относящихся к основным загрязнителям окружающей среды, таких как Sr, Co, Zn и As, убывает с увеличением расстояния от фабрики.

Для ряда элементов результаты, полученные абсолютным и относительным методами, существенно расходятся. Это объясняется, видимо, отсутствием достаточно точных ядерных данных для этих элементов. На установке ИБР-

2 существенный вклад в активацию дают резонансные нейтроны, однако потоки тепловых и резонансных нейтронов также определяются с большой погрешностью. Тем не менее абсолютный метод позволяет определить содержание тех элементов, которых нет в стандартном образце.

Авторы работы благодарят за помощь в облучении образцов М. Булавина, ответственного за 3-й канал ИБР-2, а также И. Зинковскую за ряд полезных замечаний.

Библиографический список

1. Беланова Т.С. и др. Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Драгунов Ю.Г., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В., Романова Н.В., Лукасевич И.Б., Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В., Едунов Л.В., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Шабалин Е.П., Зайкин А.А., Головин И.С. Модернизация импульсного исследовательского реактора ИБР-2 // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 1. С. 29–38.

3. Фронтасьева М.В. Нейтронный активационный анализ в науках о жизни // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2011. Т. 42, вып. 2. С. 636–716.

4. Шабалин Е.П., Верхоглядов А.Е., Булавин М.В., Рогов А.Д., Кулагин Е.Н., Куликов С.А. Спектр и плотность потока нейтронов в облучательном канале пучка № 3 реактора ИБР-2 // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 2(193). С. 505–516.

5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Sources and Effects of Ionizing Radiation United Nations. New York, 2000.

6. Chu S.Y.F., Ekstrom L.P., Firestone R.B., The Lund/LBNL Nuclear Data Search, Version 2.0, 1999, <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/radsearch.asp> (режим доступа: свободный).

Поступила в редакцию
15.01.2018