

# ПРОГНОЗ МОЩНОСТИ ОБЭ-ВЗВЕШЕННОЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ $^{137}\text{Cs}$ И ТРАНСУРАНОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НАДЗЕМНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ОРГАНОВ РАСТЕНИЙ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

## FORECAST OF RBE-WEIGHTED ABSORBED DOSE RATE OF $^{137}\text{Cs}$ AND TRANSURANIUM ELEMENTS FOR ABOVEGROUND AND UNDERGROUND ORGANS OF PLANTS OF THE POLESYE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE

*P. K. Спиров<sup>1</sup>, А. Н. Никитин<sup>2</sup>, Н. И. Тимохина<sup>1</sup>  
R. Spirau<sup>1</sup>, A. Nikitin<sup>2</sup>, N. Tsimokhina<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,  
г. Гомель, Республика Беларусь*

*<sup>2</sup>Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь  
ruslan.spirov@yandex.ru*

*<sup>1</sup>Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus*

*<sup>2</sup>Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

Представлены результаты расчета прогнозных значений мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. Установлено, что  $\beta$ -распад  $^{241}\text{Pu}$  и образование дочернего  $^{241}\text{Am}$  не приведет к превышению референтных уровней доз облучения, рекомендуемых Международной комиссией по радиологической защите.

The results of calculating the values of the RBE-weighted absorbed radiation dose of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  in the long-term period after the Chernobyl accident are presented. It has been established that the  $\beta$ -decay of  $^{241}\text{Pu}$  and the formation of a daughter  $^{241}\text{Am}$  will not exceed the derived consideration reference levels recommended by the International Commission on Radiological Protection.

*Ключевые слова:* трансурановые элементы, ОБЭ-взвешенная доза облучения, плутоний, америций, цезий, биота, радиационная защита

*Keywords:* transuranium elements, RBE-weighted absorbed dose, plutonium, americium, caesium, non-human biota, radiation protection

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-1-102-105>

**Введение.** Трансурановые элементы (ТУЭ) на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) обеспечивают долговременную дозовую нагрузку на объекты биоты [1]. Проведенные ранее исследования [2] показали, что дозы облучения растений заповедника не превышают предложенных Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) референтных уровней (для травянистых растений –  $416,67 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ , для деревьев –  $41,67 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ ) [3]. Тем не менее, в связи с  $\beta$ -распадом  $^{241}\text{Pu}$  происходит образование  $^{241}\text{Am}$ , что может привести к повышению уровней доз облучения объектов биоты, поэтому актуальным становится вопрос о прогнозе доз облучения техногенными радионуклидами растений ПГРЭЗ в долгосрочной перспективе.

**Цель исследования:** составить долгосрочный прогноз мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ растений ПГРЭЗ с наибольшей дозовой нагрузкой.

**Материалы и методы.** Отбор проб почвы и растений проводили в 2015 г. на четырех пробных площадках ПГРЭЗ. Пробные площадки соответствовали следующим типам фитоценозов: площадка I – суходольных лугов, площадка II – березняк, площадка III – сосняк мшистый, площадка IV – черноольшаник крапивный. Пробные площадки расположены в окрестностях бывшего населенного пункта Масаны (площадки I, II, III) и урочища Майдан (площадка IV). Определение содержания ТУЭ в почве и растениях проводили согласно методике [4], их активность измеряли на  $\alpha$ -спектрометрической системе Alpha Analyst от CANBERRA. Измерение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями [5] на  $\gamma$ -спектрометре CANBERRA Packard. На основе данных об удельной активности изотопов плутония и америция в почве и растениях, рассчитывали коэффициенты накопления радионуклидов надземными и подземными органами. Расчет мощности поглощенной дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  проводили методом дозовых коэффициентов по удельной активности изотопов в надземных и подземных органах (для внутренней дозы облучения) и почве (для внешней дозы облучения), согласно Публикации № 136 МКРЗ [3]. Расчет мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы

облучения надземных и подземных органов растений ПГРЭС проводили с учетом следующих видов излучения: осколки деления ( $C_{RBE} = 20$ ), альфа-частицы ( $C_{RBE} = 10$ ), низкоэнергетическое бета- и гамма-излучение ( $C_{RBE} = 3$ ), другое бета- и гамма-излучение ( $C_{RBE} = 1$ ).

**Результаты и обсуждение.** На основе периодов полураспада  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ, для 8 видов 5 семейств четырех пробных площадок, с наибольшими значениями мощности ОБЭ-взвешенной дозы облучения, составлены прогнозы доз облучения.

Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной дозы облучения надземных органов растений суходольного луга приходилось на *V. cracca*, подземных – *P. pratensis*. На рисунке 1 показаны прогнозы мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения для растений суходольного луга.

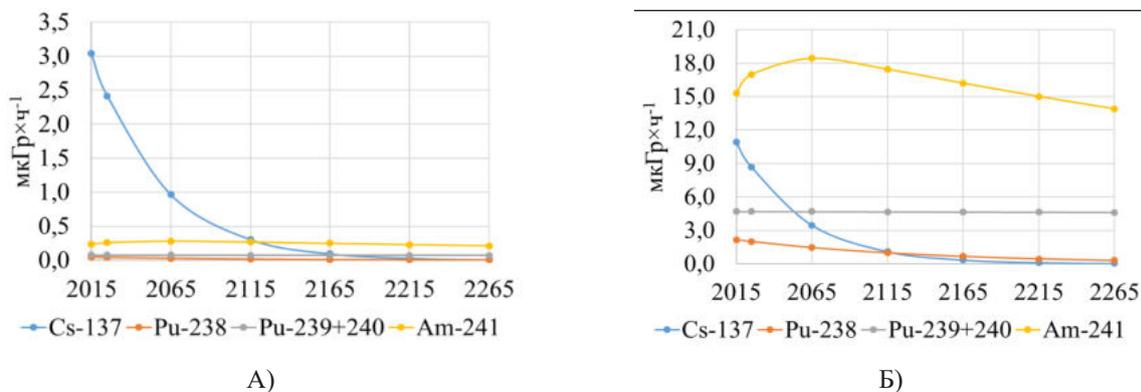


Рисунок 1 – Прогноз доз облучения для растений суходольного луга:  
А) *V. cracca* (надземные органы), Б) *P. pratensis* (подземные органы)

К 2065 г., в связи с распадом  $^{241}\text{Pu}$ , мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{241}\text{Am}$  надземных органов *V. cracca* достигнет значения 0,28 мкГр×ч<sup>-1</sup>, или 21,0 % от дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ. Спустя 180 лет после аварии на Чернобыльской АЭС, вклад  $^{241}\text{Am}$  в ОБЭ-взвешенную поглощенную дозу облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ превысит вклад  $^{137}\text{Cs}$  (22,2 %, или 0,10 мкГр×ч<sup>-1</sup>) и составит 57,3 % (0,25 мкГр×ч<sup>-1</sup>). В 2165 г. вклад ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения надземных органов *V. cracca*  $^{239+240}\text{Pu}$  составит 17,2 % (0,07 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{238}\text{Pu}$  – 3,2 % (0,01 мкГр×ч<sup>-1</sup>). На текущий момент основным дозообразующим радионуклидом среди  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ для подземных органов *P. pratensis* является  $^{241}\text{Am}$ . К 2065 г. мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{241}\text{Am}$  возрастет с 15,32 до 18,45 мкГр×ч<sup>-1</sup>. К 2165 г. вклад  $^{238}\text{Pu}$  в дозу облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ составит 3,0 % (0,66 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 21,2 % (4,65 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{241}\text{Am}$  – 74,1 % (16,22 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{137}\text{Cs}$  – 1,6 % (0,35 мкГр×ч<sup>-1</sup>).

Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной дозы облучения надземных органов растений березняка приходилось на *V. myrtillus*, подземных – *F. ovina*. На рисунке 2 показаны прогнозы мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения для растений березняка.

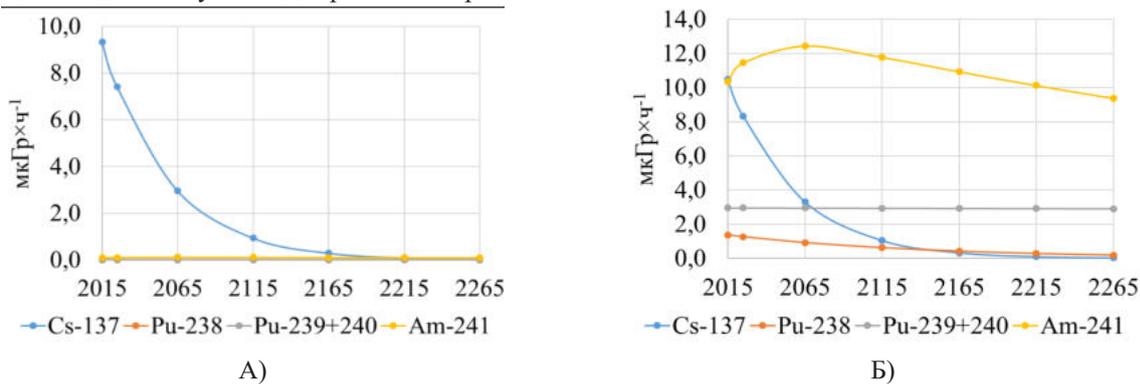


Рисунок 2 – Прогноз доз облучения для растений березняка:  
А) *V. myrtillus* (надземные органы), Б) *F. ovina* (подземные органы)

Вплоть до 2215 г.  $^{137}\text{Cs}$  будет основным дозообразующим радионуклидом среди  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ для надземных органов *V. myrtillus*. Спустя 230 лет после аварии вклад  $^{241}\text{Am}$  в суммарную дозу облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ составит 48,3 % (0,10 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{238}\text{Pu}$  – 0,8 % ( $1,58 \times 10^{-3}$  мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 5,9 % (0,01 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{137}\text{Cs}$  – 45,0 % (0,09 мкГр×ч<sup>-1</sup>). К 2065 г. мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{241}\text{Am}$  подземных органов *F. ovina* возрастет с 10,34 до 12,46 мкГр×ч<sup>-1</sup>, что составит 63,3 % от дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ. Вклад  $^{238}\text{Pu}$  на этот момент будет составлять 4,7 % (0,93 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 15,0 % (2,96 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{137}\text{Cs}$  – 16,9 % (3,33 мкГр×ч<sup>-1</sup>).

Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной дозы облучения надземных органов растений сосняка мшистого приходилось на кору *P. sylvestris*, подземных – обрастающие корни *B. pendula*. На рисунке 3 показаны прогнозы мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения для растений сосняка мшистого.

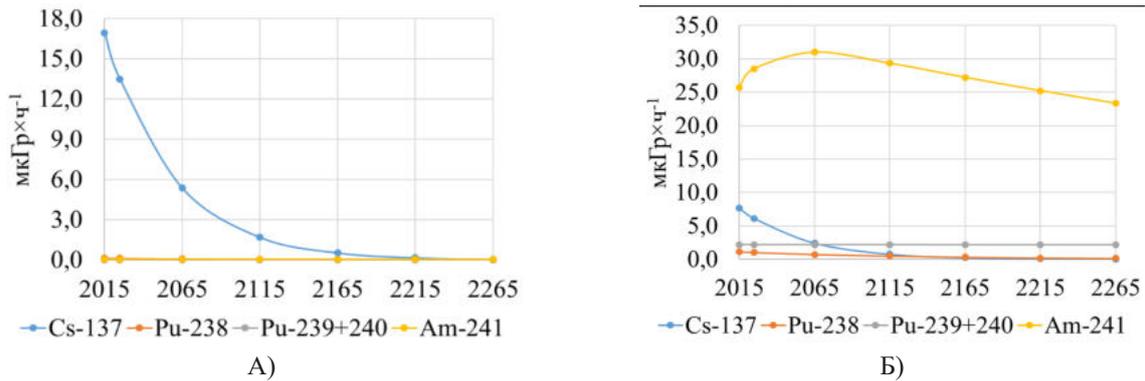


Рисунок 3 – Прогноз доз облучения для растений сосняка мшистого:  
А) *P. sylvestris* (кора), Б) *B. pendula* (обрастающие корни)

Из-за изначально высокого вклада  $^{137}\text{Cs}$  в ОБЭ-взвешенную поглощенную дозу облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ (98,8 %) коры *P. sylvestris*,  $^{137}\text{Cs}$  будет основным дозообразующим радионуклидом на протяжении примерно 280 лет после аварии на Чернобыльской АЭС на территории сосняка мшистого. Преобладание вклада  $^{241}\text{Am}$  отмечено к 2315 г. (46,1 %, или 0,04 мкГр×ч<sup>-1</sup>). Вклад  $^{137}\text{Cs}$  в ОБЭ-взвешенную поглощенную дозу облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ коры *P. sylvestris* на этот момент составит 18,0 % (0,02 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{238}\text{Pu}$  – 13,3 % (0,01 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 22,7 % (0,02 мкГр×ч<sup>-1</sup>). Для обрастающих корней *B. pendula* мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{241}\text{Am}$  к 2065 г. увеличится с 25,72 до 30,98 мкГр×ч<sup>-1</sup>, или 85,1 % от дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ. Вклад  $^{238}\text{Pu}$  на этот момент будет составлять 2,1 % (0,76 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 6,1 % (2,21 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{137}\text{Cs}$  – 6,7 % (2,45 мкГр×ч<sup>-1</sup>).

Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной дозы облучения надземных органов растений черноольшаника крапивного приходилось на листья *A. glutinosa*, подземных – обрастающие корни *C. avellana*. На рисунке 4 показаны прогнозы мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения для растений черноольшаника крапивного.

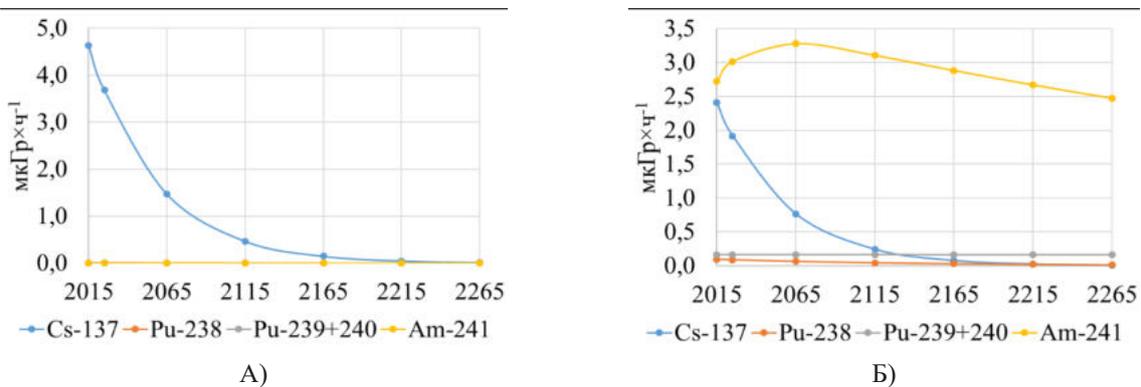


Рисунок 4 – Прогноз доз облучения для растений черноольшаника крапивного:  
А) *A. glutinosa* (листья), Б) *C. avellana* (обрастающие корни)

Поскольку для листьев *A. glutinosa* удельная активность  $^{241}\text{Am}$  была ниже минимальной детектируемой активности, то основной вклад в дозу облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ будет вносить  $^{137}\text{Cs}$  почти на протяжении десяти периодов полураспада с момента аварии. К 2365 г. его вклад в суммарную дозу облучения листьев *A. glutinosa* составит 40,6 % ( $1,49 \times 10^{-3}$  мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{238}\text{Pu}$  – 7,7 % ( $2,83 \times 10^{-4}$  мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 51,7 % ( $1,90 \times 10^{-3}$  мкГр×ч<sup>-1</sup>). Для обрастающих корней *C. avellana* мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{241}\text{Am}$  к 2065 г. увеличится с 2,72 до 3,28 мкГр×ч<sup>-1</sup>, или 76,8 % от дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ. Вклад  $^{238}\text{Pu}$  на этот момент будет составлять 1,5 % (0,06 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 3,9 % (0,17 мкГр×ч<sup>-1</sup>),  $^{137}\text{Cs}$  – 17,9 % (0,76 мкГр×ч<sup>-1</sup>).

Прогноз мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ растений ПГРЭЗ с наибольшими текущими значениями на 2015, 2025, 2065 гг. представлен в таблице 1.

Прогноз мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ ( $\Sigma H$ )  
некоторых растений ПГРЭЗ

Органы	Год			DCRL, мкГр $\times$ ч $^{-1}$
	2015	2025	2065	
ΣH( $^{137}\text{Cs}$ , ТУЭ), мкГр $\times$ ч $^{-1}$				
<i>Vicia cracca</i> (площадка I)				
Надземные	3,40	2,80	1,35	416,67
Подземные	26,39	25,11	20,25	
<i>Poa pratensis</i> (площадка I)				
Надземные	2,87	2,30	0,97	416,67
Подземные	33,11	32,36	28,06	
<i>Vaccinium myrtillus</i> (площадка II)				
Надземные	9,45	7,54	3,10	416,67
Подземные	12,65	10,51	5,33	
<i>Festuca ovina</i> (площадка II)				
Надземные	5,96	5,30	3,48	416,67
Подземные	25,19	24,04	19,67	
<i>Pinus sylvestris</i> (площадка III)				
Кора	17,17	13,68	5,55	41,67
Скелетные корни	19,20	18,06	14,09	
<i>Betula pendula</i> (площадка III)				
Листья	4,22	3,42	1,54	41,67
Обрастающие корни	36,78	37,89	36,40	
<i>Alnus glutinosa</i> (площадка IV)				
Листья	4,64	3,69	1,47	41,67
Обрастающие корни	4,63	4,16	2,87	
<i>Corylus avellana</i> (площадка IV)				
Листья	2,91	2,61	1,77	41,67
Обрастающие корни	5,39	5,18	4,27	

Примечание: DCRL (Derived Consideration Reference Levels) – рекомендуемые МКРЗ референтные уровни обеспокоенности [3].

Согласно таблице 1, увеличение дозовой нагрузки  $^{241}\text{Am}$  не приведет к увеличению значения мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ надземных и подземных органов растений ПГРЭЗ и превышению референтных уровней МКРЗ. В целом, мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения растений  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ к 2065 г. будет уменьшаться.

**Заключение.** Таким образом, мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения  $^{241}\text{Am}$  растений ПГРЭЗ достигнет максимальных значений к 2065 г., в то время как изотопов плутония и цезия будет уменьшаться вследствие радиоактивного распада. В отдельных случаях, для надземных органов растений ПГРЭЗ, вклад  $^{241}\text{Am}$  превысит вклад  $^{137}\text{Cs}$  к 2165 г., а для подземных органов уже преобладает в структуре дозы облучения  $^{137}\text{Cs}$  и ТУЭ.  $\beta$ -распад  $^{241}\text{Pu}$  и образование дочернего  $^{241}\text{Am}$  не приведет к превышению референтных уровней доз облучения, рекомендуемых МКРЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Конопля, Е. Ф. Радиация и Чернобыль: трансурановые элементы на территории Беларуси / Е. Ф. Конопля, В. П. Кудряшов, В. П. Миронов. – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. – 128 с.
2. Спиоров, Р. К. Прогноз дозовой нагрузки трансурановых элементов на доминантные и субдоминантные виды растений зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / Р.К. Спиоров, А.Н. Никитин // Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века: материалы 18-й междунар. научн. конф., 17-18 мая 2018 г., г. Минск, Республика Беларусь / под ред. С.А Маскевича, С.С. Позняка. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – Ч. 2. – С. 241-243.
3. ICRP Publication 136. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation Ann. ICRP 46 (2), 2017. – 136 p.
4. Методика определения активности стронция-90 и трансурановых элементов в биологических объектах: МВИ.МН 1892-2003. – Введ. 2003-04-30. – Минск: ИРБ НАН Б, 2003. – 17 с.
5. МВИ объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами. МВИ. МН 3421-2010: утв. БелГИМ 28.05.10. – Минск: БелГИМ, 2010. – 35 с.