

**ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ СОТРУДНИКОВ ПГРЭЗ  
ЗА СЧЕТ ИНГАЛЯЦИОННОГО ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ**  
**INTERNAL EXPOSURE OF EMPLOYEES PSRER  
FROM RADIOACTIVE NUCLIDES INHALATION INTAKE**

***Н. В. Блинова, С. А. Калиниченко, В. Н. Калинин***  
***N. V. Blinova, S. A. Kalinichenko, V. N. Kalinin***

*Государственное природоохранное научно-исследовательское учреждение «Полесский  
государственный радиационно-экологический заповедник»  
Хойники, Республика Беларусь  
zapovednik.nauka@mail.ru*

*The state nature protection research establishment «Poleski state radiation-ecological reserve»  
Khoyniki, Republic of Belarus*

Производственная деятельность сотрудников лесничеств и специалистов других служб Полесского государственного радиационно-экологического заповедника связана с пребыванием в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. В воздухе зоны отчуждения содержатся радионуклиды, поступающие в него за счет вторичного ветрового подъема. Поступление радионуклидов в организм человека при дыхании может привести к дополнительному внутреннему облучению. Для оценки дозы внутреннего облучения, связанной с ингаляционным поступлением радионуклидов в организм человека, был выполнен отбор проб аэрозолей приземного слоя воздуха с последующим определением активности радионуклидов методом гамма-спектрометрии с использованием полупроводникового детектора из особо чистого германия.

Industrial activity of employees in forest areas and experts of other services of Poleski state radiation-ecological reserve is connected to stay in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant. The air of the exclusion zone contains radioactive nuclides, arriving at it at the expense of secondary wind lifting. Intake of radioactive nuclides in a human body at breath can lead to an additional internal exposure. For an estimation of a dose of an internal exposure, connected with radioactive nuclides inhalation intake in a human body, sampling of aerosols of a ground layer of air with the subsequent definition of radioactive nuclide activity with help gamma-spectrometry method with the use of the broad energy germanium detectors, has been executed.

*Ключевые слова:* вторичный ветровой подъем, аэрозоль, радионуклид, доза внутреннего облучения, отбор проб.

*Keywords:* secondary wind lifting, aerosol, radioactive nuclide, internal exposure, sampling.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2023-2-163-166>

Ветровой подъем частиц пыли с поверхностного слоя почвы и других элементов подстилающей поверхности, загрязненной радиоактивными веществами, становится одним из основных механизмов поступления радиоактивного материала в приземный слой воздуха. Подстилающая поверхность является постоянным поверхностным источником аэрозоля с меняющейся скоростью эмиссии вещества в зависимости от метеорологических условий и характера подстилающей поверхности. Подъем радиоактивности за год за счет действия ветрового потока в умеренных широтах достигает десятой доли процента от осадженного на подстилающую поверхность [1]. Но в локальном масштабе различная антропогенная деятельность может существенно повлиять на подъем радиоактивного вещества и на его перераспределение в пространстве.

В естественных условиях в зависимости от метеорологической обстановки концентрация радионуклидов в воздухе изменяется в пределах одного порядка в течение года. Однако при пылевых бурях и лесных пожарах может происходить увеличение концентрации радионуклидов в приземном слое воздуха в сотни раз [2, 3].

Отбор проб аэрозолей воздуха обеспечивался путем его прокачки через аэрозольный фильтр FPM 1515 или FPM 1530 размером 270×230 мм (VFNuclear, Czech [4]), с помощью цифрового высокообъемного устройства отбора проб аэрозолей VOPV-12 (VFNuclear, Czech). Скорость прокачки изменялась от 100 до 130 м³/ч. Установка VOPV-12 откалибрована производителем в 2020 г. Объем прокачанного воздуха ( $Q$ , м³), вычисляют по формуле 1[5]:

$$Q = S \times V \times t, \quad (1)$$

где:  $S$  – площадь поперечного сечения, м²;

$V$  – линейная скорость воздушного потока, м/с;

$t$  – время покачивания воздуха, с.

В 2021 году сотрудниками ЛСР научного отдела ПГРЭЗ были выполнены отбор проб и измерения объёмной активности  $^{137}\text{Cs}$  в аэрозолях воздуха и его плотности загрязнения на подстилающей поверхности в различных

точках на территории Заповедника (с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  970-11300 кБк/м<sup>2</sup>), в разные сезоны года (весна, лето, осень) и на площадках с различным типом почвы и общим характером подстилающей поверхности в условиях отсутствия антропогенной деятельности.

Таблица 1

*Объёмная активность  $^{137}\text{Cs}$  аэрозолей воздуха, отобранных на местности.  
Плотность загрязнения территории и коэффициент вторичного ветрового подъёма*

| Номер (шифр) точки        | Среднее значение МЭД в точке отбора, мкЗв/ч | $P_z$ ( $^{137}\text{Cs}$ ), кБк/м <sup>2</sup> | $A_{06}$ аэрозоля ( $^{137}\text{Cs}$ ), Бк/м <sup>3</sup> | $K_p$ , 1/м            | Тип почвы<br>Подстилающая поверхность<br>Состояние приземного слоя атмосферы<br>Наличие/отсутствие осадков<br>Характер облачности |
|---------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1<br>(б.н.п. Крюки)       | 11,82                                       | 11330                                           | $(4,68 \pm 1,02) \times 10^{-3}$                           | $4,13 \times 10^{-10}$ | Суглинистая<br>Травянистая растительность<br>Штиль<br>Отсутствие осадков<br>Ясно                                                  |
| 2<br>(б.н.п. Красноселье) | 2,59                                        | 968                                             | $(3,88 \pm 1,43) \times 10^{-4}$                           | $4,01 \times 10^{-10}$ | Суглинистая<br>Травянистая растительность<br>Умеренный ветер<br>Отсутствие осадков<br>Переменная облачность                       |
| 3<br>(сайт 1 GAMFAC)      | 2,42                                        | 2532                                            | $(2,60 \pm 0,58) \times 10^{-3}$                           | $1,03 \times 10^{-9}$  | Песчаная<br>Редкая травянистая и кустарниковая растительность<br>Сильный порывистый ветер<br>Отсутствие осадков<br>Облачно        |
| 4<br>(сайт 3 GAMFAC)      | 1,89                                        | 1679                                            | $(5,20 \pm 1,20) \times 10^{-4}$                           | $3,1 \times 10^{-10}$  | Торфянистая<br>Густая травянистая растительность<br>Слабый порывистый ветер<br>Отсутствие осадков<br>Ясно                         |

В 2021 г. среднегодовая активность  $^{137}\text{Cs}$  в аэрозолях приземного слоя воздуха на территории заповедной зоны ППГРЭЗ составила 2,047 мБк/м<sup>3</sup> с диапазоном зафиксированных значений 0,388–4,68 мБк/м<sup>3</sup>.

Экологическая ситуация в пострадавших от аварии на ЧАЭС районах усугубляется тем, что значительные площади загрязненных радионуклидами земель подвержены ветровой эрозии. Процессы эрозии приводят к выносу радиоактивно загрязненной почвы на значительные расстояния и являются причиной вторичного локального загрязнения сельскохозяйственных и других угодий, водных источников, т.е. приводят к территориальному перераспределению радионуклидов.

Для изучения влияния на вторичный ветровой подъём активности радионуклидов в приземный слой атмосферы мероприятий по содержанию зоны отчуждения в 2022 году были выполнены выезды на отбор проб аэрозолей приземного слоя воздуха при минерализации противопожарных полос. Отбор проб аэрозолей осуществлялся при помощи воздухозаборного устройства VOPV-12. Устройство располагалось на расстоянии 5 метров от обрабатываемой трактором противопожарной полосы. Скорость воздушного потока создаваемого воздухозаборным устройством контролировалась с помощью анемометра. В этом месте был выполнен отбор проб почвы для определения плотности загрязнения территории радионуклидами и оценки распределения нуклидов по глубине. Также в месте отбора проб почвы были выполнены измерения спектров  $\gamma$ -излучения с помощью радиометра со спектрометрическими возможностями SPIR-Асе.

Было выполнено 6 выездов в течение сезона в соответствии с графиком обработки противопожарных полос. 29 апреля выезд в Богусhevское лесничество кв.139, 12 мая в Радинское лесничество квартал 90, 5 июля Бабчинское лесничество квартал 66, 28 июля Воротецкое лесничество квартал 41, 10 августа Радинское лесничество квартал 43, 11 августа Новопокровское лесничество квартал 12.

Измерение активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  в аэрозольных фильтрах выполнялось методом  $\gamma$ -спектрометрии с помощью спектрометра Canberra и программного обеспечения Genie-2000. Для регистрации  $\gamma$ -излучения применялся блок детектирования на основе особо чистого германия, с площадью рабочей поверхности 2000 мм<sup>2</sup> и толщиной чувствительной зоны 20 мм (BE2020). Объёмные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  приведены в таблице 2.

Таблица 2

*Объёмная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  аэрозолей воздуха, отобранных на местности во время выполнения мероприятий по минерализации противопожарных полос*

| Лесничество                             | Даты прокачки | Объём прокачанного воздуха, м <sup>3</sup> | Дата измерения | Радио-нуклид      | Объёмная активность Ао, Бк/м <sup>3</sup> | Неопределённость Ао, Бк/м <sup>3</sup> |
|-----------------------------------------|---------------|--------------------------------------------|----------------|-------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| Богушевское кв.139                      | 29.04.2022    | 532                                        | 5.05.2022      | $^{137}\text{Cs}$ | 0,0068                                    | 0,0013                                 |
|                                         |               |                                            |                | $^{241}\text{Am}$ | 0,000069                                  | 0,000042                               |
| Радинское кв.90                         | 12.05.2022    | 304                                        | 13.05.2022     | $^{137}\text{Cs}$ | 0,516                                     | 0,098                                  |
|                                         |               |                                            |                | $^{241}\text{Am}$ | 0,0023                                    | 0,0005                                 |
| Бабчинское кв.66                        | 05.07.2022    | 385                                        | 6.07.2022      | $^{137}\text{Cs}$ | 0,02638                                   | 0,00505                                |
|                                         |               |                                            |                | $^{241}\text{Am}$ | 0,00024                                   | 0,00008                                |
| Воротецкое кв.41                        | 28.07.2022    | 624                                        | 28.07.2022     | $^{137}\text{Cs}$ | 0,00042                                   | 0,00016                                |
|                                         |               |                                            |                | $^{241}\text{Am}$ | менее МДА                                 | —                                      |
| Радинское кв.43                         | 10.08.2022    | 280                                        | 10.08.2022     | $^{137}\text{Cs}$ | 0,03113                                   | 0,00598                                |
|                                         |               |                                            |                | $^{241}\text{Am}$ | 0,00024                                   | 0,00010                                |
| Новопокровское кв.12 (дискование)       | 11.08.2022    | 108                                        | 11.08.2022     | $^{137}\text{Cs}$ | 0,00978                                   | 0,00228                                |
|                                         |               |                                            |                | $^{241}\text{Am}$ | менее МДА                                 | —                                      |
| Новопокровское кв.12 (после дискования) | 11.08.2022    | 261                                        | 12.08.2022     | $^{137}\text{Cs}$ | 0,00158                                   | 0,00051                                |
|                                         |               |                                            |                | $^{241}\text{Am}$ | менее МДА                                 | —                                      |

Важной особенностью полученных результатов является наличие в спектре  $\gamma$ -линии  $^{241}\text{Am}$ . Америций как  $\alpha$ -излучатель особенно опасен при попадании внутрь организма человека. Объёмные активности радионуклидов в аэрозолях приземного слоя воздуха значительно более высокие в Радинском лесничестве квартал 90. Вдыхание за год 2400 м<sup>3</sup> такого воздуха приведёт к поступлению в организм работника дополнительно 1238,9 Бк  $^{137}\text{Cs}$  и около 5,57 Бк  $^{241}\text{Am}$ .

Одной из составляющих дозы внутреннего облучения персонала и населения является дозовая нагрузка за счёт ингаляционного поступления радионуклидов. Используя значение объёмной активности нуклида  $^{137}\text{Cs}$  в аэрозоле воздуха для производственных помещений и в аэрозолях на местности при обработке противопожарных полос, а также годовой объём вдыхаемого воздуха 2400 м<sup>3</sup>, выполнена консервативная оценка годовой дозы внутреннего облучения. Так как размеры частиц аэрозолей воздуха нам неизвестны, использовались оба значения  $e(g)1\text{мкм}$ , и  $e(g)5\text{мкм}$  – ожидаемая эффективная доза на единицу ингаляционного поступления для частиц с эффективным диаметром частиц 1 мкм и 5 мкм соответственно, Зв/Бк. Полученные с использованием  $e(g)1\text{мкм}$  значения годовой дозы для персонала изменялись в пределах от 0,0000013 до 0,005944 мЗв. Используя  $e(g)5\text{мкм}$  получены значения годовой дозы в пределах от 0,0000018 до 0,008297 мЗв. В аэрозолях приземного слоя воздуха на местности при обработке противопожарных полос кроме  $^{137}\text{Cs}$  был также обнаружен  $^{241}\text{Am}$ . Полученные значения годовой дозы внутреннего облучения представлены на диаграммах (рисунок 1, 2).

Вдыхание в течение года воздуха содержащего аэрозоли, образующиеся при обработке противопожарной полосы в Радинском лесничестве, могло бы дать заметный вклад в дозу внутреннего облучения персонала, однако референтный уровень 1 мЗв[6] не был бы превышен. Но как показали исследования воздушных аэрозолей в Новопокровском лесничестве, уровень содержания аэрозолей после окончания работ по минерализации противопожарной полосы, быстро снижается. Кратковременное пребывание в зоне выполнения работ по минерализации противопожарной полосы не представляет угрозы здоровью.

Воздушные аэрозоли могут содержать изотопы, которые не определяются методом  $\gamma$ -спектрометрии, в частности  $^{90}\text{Sr}$  и дочерние продукты распада радона, такие как изотопы полония. Также в аэрозолях, в которых обнаружен радионуклид  $^{241}\text{Am}$ , могут присутствовать изотопы плутония.

Для оценки суммарной активности  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающих нуклидов[7] использовалась низкофоновая установка альфа-бета-счёта LB4100 (CanberraIndustries, Inc. USA), укомплектованная пропорциональными газоразрядными детекторами, работающими на проточной газовой смеси (90 % аргон / 10 % метан). Прибор характеризуется низким уровнем фона (не более 0,7 имп/мин для  $\beta$ - и 0,1 имп/мин для  $\alpha$ -частиц) и высокой эффективностью регистрации (не менее 0,45 для  $\beta$ - ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ) и 0,35 для  $\alpha$ -частиц ( $^{241}\text{Am}$ )). Это позволяет выполнять измерения образцов с малой активностью при длительности измерения 50 минут. В связи с небольшим объёмом измерительной камеры и необходимостью измерения тонкослойных образцов, для исключения эффекта самопоглощения, аэрозольные фильтры перед измерением озолялись при температуре 450°C. Была отработана техника сжигания фильтров до состояния золы и способ приготовления счётных мишеней из полученной золы. Из полученной золы изготавливались счётные образцы. Если масса полученной пробы золы не превышала 200 миллиграмм, то она использовалась для измерения полностью, если масса превышала 200 миллиграмм, то из пробы отбирались одна или две навески, масса которых не превышала 200 миллиграмм. Параметры образцов использованных для измерения суммарной альфа- и бета-активности приведены в таблице 2.3. Некоторые образцы подвергались

дополнительному озолению, но это существенно не повлияло на их характеристики. Низкофоновая установка альфа-бета-счёта LB4100 имеет два лотка и четыре ячейки в каждом лотке. Это позволяет измерять до восьми образцов одновременно.

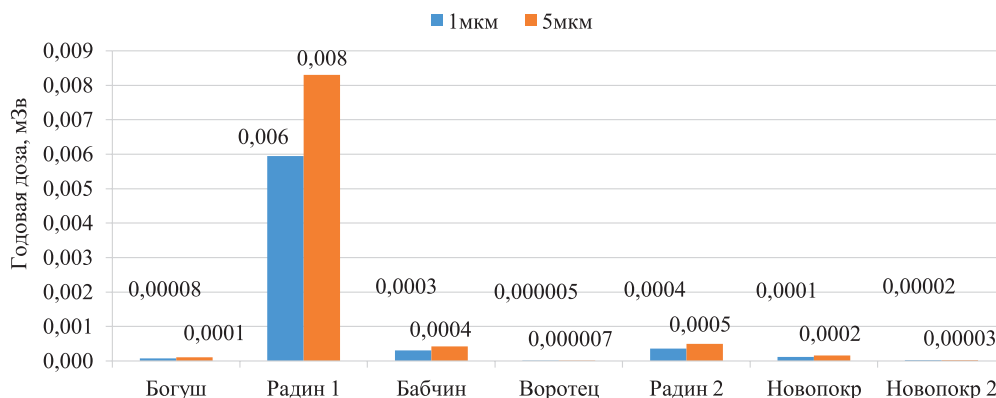


Рисунок 1 – Годовая доза внутреннего облучения при вдыхании 2400 м<sup>3</sup> воздуха содержащего аэрозоли с радионуклидом <sup>137</sup>Cs, мЗв

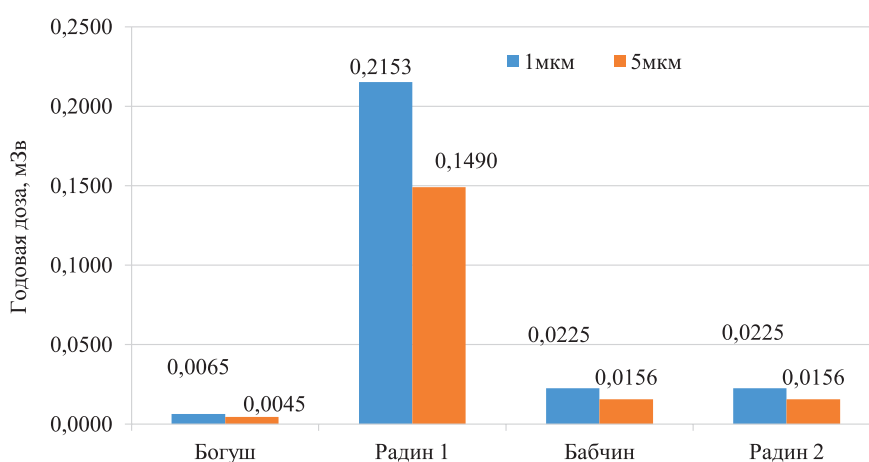


Рисунок 2 – Годовая доза внутреннего облучения при вдыхании 2400 м<sup>3</sup> воздуха содержащего аэрозоли с радионуклидом <sup>241</sup>Am, мЗв

Наибольшей суммарной α- и β-активностью отличались образцы золы фильтров, отобранные при минерализации противопожарных полос, особенно при работах на территории Радинского лесничества (отбор 12 мая). Для этих образцов будут проводиться дальнейшие исследования с использованием методов радиохимии для определения содержания <sup>90</sup>Sr и изотопов плутония.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гаргер Е.К. Вторичный подъём радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы: монография/ Е.К. Гаргер; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев обл.): Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 192 с.
2. Kashparov V.A., Kadygrib A.M., Lundin S.M., Prister B.S., Protsak V.P., Levchuk S.E., Yoschenko V.I., Garger E.K., Kashpur V. A., Talerko N.N. The results of experimental research of the forest fires on the radioactive contamination of environment and the assessment of doses to fire fighters // Aerosols.-1998, v.4a, N6, p.34-36.
3. Kashparov V.A., Lundin S.M., Kadygrib A.M., Protsak V.P., Levchuk S.E., Yoschenko V.I., Kashpur V.A., Talerko N.M. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters // Journal of Environmental Radioactivity, v.51, 2000, p. 281-298.
4. VFNUCLEAR [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://vfnnuclear.com/ru/about-vf-ru>. Дата доступа: 10.01.2022.
5. СТБ 1058-2016 Радиационный контроль. Отбор проб атмосферного воздуха. Общие требования.
6. Критерии оценки радиационного воздействия: Гигиенический норматив: утвержден постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28 декабря 2021 г.
7. Стамат И.П., Суммарная объемная бета-активность атмосферного воздуха как интегральный критерий оценки выбросов в атмосферу природных и техногенных радионуклидов/ Радиационная гигиена. Том 8, № 4 (2015), с. 74–82.