

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ РАДИОБИОЛОГИИ
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS
INSTITUTE OF RADIOBIOLOGY**

РАДИОБИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ – 2023

**Материалы международной научной конференции
(25–26 мая 2023, Гомель)**

RADIOBIOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY – 2023

**Proceedings of the International Scientific Conference
(25–26 May 2023, Gomel)**

Минск
«ИВЦ Минфина»
2023

УДК [577.34+614.876](082)
ББК 28.071я43
Р15

Составитель А. А. Михайлова

Редакционная коллегия :

*кандидат медицинских наук И. А. Чешик (главный редактор),
кандидат сельскохозяйственных наук А. Н. Никитин,
кандидат биологических наук Н. И. Тимохина,
кандидат биологических наук О. Л. Федосенко*

Радиобиология и экологическая безопасность — 2023 : материалы
Р15 международной научной конференции (25–26 мая 2023 г., Гомель) /
Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии
Национальной академии наук Беларуси». — Минск : ИВЦ Минфина, 2023. —
334 с.

ISBN 978-985-880-338-4.

В сборник включены научные статьи, представленные на международной научной конференции «Радиобиология и экологическая безопасность – 2023», состоявшейся в Институте радиобиологии НАН Беларуси (Гомель, Республика Беларусь) 25–26 мая 2023 года. Статьи посвящены проблемам поведения радионуклидов и тяжелых металлов в окружающей среде, их переходу из почвы в растения и включения в пищевые цепи человека. Охватываются вопросы радиационной защиты, формирования доз облучения человека и биоты, эффекты воздействия ионизирующих и неионизирующих излучений на живые организмы. Затронуты актуальные аспекты информационной работы в области радиационной безопасности.

Издание предназначено для научных работников, преподавателей и учащихся высших учебных заведений, специалистов в области медицины, радиационной безопасности, экологии, сельскохозяйственного производства.

УДК [577.34+614.876](082)
ББК 28.071я43

ISBN 978-985-880-338-4

© Государственное научное учреждение «Институт
радиобиологии Национальной академии наук
Беларуси», 2023
© Оформление. УП «ИВЦ Минфина», 2023

(preservative) action. At the same time, the intake of high doses of preservatives into the human body can negatively affect the state of health. Therefore, there is a tendency to reduce their use in the food industry and the search for alternatives to chemical processing or (and) opportunities to reduce the concentration of chemical preservatives is particularly relevant. Radiation treatment of packaged raw materials and ready to eat food products solves this problem as well as possible, which allows inactivating most microorganisms in the entire volume of the product without heating it and without violating the integrity of the package. The influence of different concentrations of potassium sorbate on the survival of mold spores of *Penicillium spp.* was studied under the influence of gamma radiation in a dose of 500 Gy. A decrease in the viability of spores was shown at a concentration of sorbic acid salt in the range of 1000–3000 mg/L. With the combined effect of a food additive (3000 mg/L) and irradiation, there is an increase in the survival rate of mold fungi by 16 % relative unirradiated samples. A regular change in the morphology of *Penicillium spp.* colonies was revealed under the combined effect of ionizing radiation and potassium sorbate, with an increase in the concentration of sorbic acid salt, a decrease in the number of sporangia and a lightening of the pigmentation of the colony were noted. The results obtained allow us to conclude that the radiation treatment of foods containing potassium sorbate is less effective due to an increase in the survival rate of molds when irradiated in the presence of a preservative.

Keywords: gamma radiation, potassium sorbate, *Penicillium spp.*, survival rate, morphological features of colonies mold

ПОИСК И АНАЛИЗ «ГОРЯЧИХ» ЧАСТИЦ В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ СЕВЕРНОГО СЛЕДА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ (МАСАНЫ, ПОЛЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ЗАПОВЕДНИК, БЕЛАРУСЬ)

Э. Г. Хачатрян¹, Т. Р. Полякова¹, В. О. Япаскурт², И. Э. Власова¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, химический факультет,
г. Москва, Российская Федерация, eveline.khachatryan@gmail.com

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, геологический факультет,
г. Москва, Российская Федерация

Введение. 26 апреля 1986 года произошла авария на Чернобыльской атомной электростанции. Реактор РБМК был частично разрушен [1], в окружающую среду попало от 6 до 8 тонн радионуклидов [2]. Суммарный выброс радиоактивных веществ (без учета благородных газов) составил 10^{18} Бк [1; 3].

Один из продуктов деления урана, ^{137}Cs , распространился на большие территории в мобильной форме Cs^+ и иммобилизованный в «горячих» частицах (далее – ГЧ) [4]. Топливные ГЧ представляют собой частицы оксидного уранового топлива и его сплавы с конструкционными материалами реактора. ГЧ являются кинетически стабильной формой, в которой заключены продукты деления и нейтронной активации урана (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{239}Pu и др.). Относительно высокая кинетическая стабильность топливных ГЧ приводит к пролонгированному во времени высвобождению этих радионуклидов в окружающую среду. Длительное высвобождение мобильных радионуклидов приводит к постоянному новому загрязнению окружающей среды. Большая часть радионуклидов распространилась на территории современных Беларуси, России и Украины.

В первые часы аварии, т.е. сразу после взрыва, ветер имел западное направление [5]: в данном направлении распространялись неокисленные топливные частицы диоксида урана, сплавленного с цирконием [6]. В течение длительного пожара, который следовал после взрыва, ветер имел преимущественно северное, северо-восточное направление. В результате этого образовался северный след, который содержит окисленные топливные частицы и продукты деления урана. Со временем частицы подверглись разрушению. Частицы с цирконием оказались более устойчивыми к природным воздействиям [6].

Продолжительный выброс длился 10 дней с момента аварии, направление и скорость ветра обусловили загрязнение большей части Беларуси [7] и других стран.

Из-за большой активности, выпавшей на территории к северу, северо-востоку в секторе 30-км зоны ЧАЭС, был организован Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (далее – Заповедник). Заповедник занимает площадь в 2,162 тыс. км², с которых было отселено население 96 населенных пунктов, где проживало более 22 тысяч человек [7].

На всей территории Заповедника, в отличие от других регионов Беларуси, присутствуют значимые загрязнения долгоживущими радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238,239,240,241}\text{Pu}$, ^{241}Am . Общий выброс ^{137}Cs оценен как $8,5 \cdot 10^{16}$ Бк [7]. Однако сложность лесных массивов и ландшафтные

особенности заповедника оказали влияние на неравномерность распределения активности. Из-за близости к четвертому энергоблоку в почве заповедника содержится высокая концентрация топливных горячих частиц [7], что является источником длительного радиоактивного загрязнения биогеоценозов [3].

Наибольший уровень загрязнения ^{137}Cs в заповеднике находится в районе деревень Крюки, Желибор, Михалевка, Кулажин. А наибольший уровень загрязнения изотопами плутония и ^{241}Am – в районах деревень Масаны и Кулажин [7].

Данная работа посвящена определению активности ^{137}Cs и ^{241}Am в растениях Северного следа чернобыльской аварии (Масаны, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, Беларусь), а также поиску, выделению и изучению морфологии и состава топливных «горячих» частиц, в пробах почв, отобранных в деревне Масаны.

Материалы и методы. Были исследованы пробы торфяно-болотных и дерново-подзолистых почв из деревни Масаны, а также несколько единичных представителей различных семейств растений (табл. 1), произрастающие на дерново-подзолистых почвах.

Таблица 1 – Описание растений

Растение	Латинское название	Семейство
Вейник	<i>Calamagrostis epigejos</i>	Злаковые
Пырей	<i>Elytrigia répens</i>	Злаковые
Вереск	<i>Calluna vulgaris</i>	Вересковые
Хвоя	<i>Pinus sylvestris</i>	Сосновые
Щавель	<i>Rumex acetosa</i>	Гречишные

Для определения коэффициента накопления радионуклидов в системе почва–растение была проведена гамма-спектрометрия образцов почв и растений. Для этого гамма-спектрометр ORTEC с HPGe детектором и программой обработки данных Spectraline был откалиброван по эффективности для ^{152}Eu , ^{241}Am , ^{137}Cs по стандартным образцам почв с известной активностью. Коэффициент накопления был рассчитан по формуле (1).

$$K_n = \frac{\text{Уд. активность нуклида в растении, Бк/кг}}{\text{Уд. активность нуклида в почве, Бк/кг}} \quad (1)$$

Для поиска и выделения «горячих» частиц из проб торфяно-болотных и дерново-подзолистых почв из деревни Масаны, в 15 км от ЧАЭС, была применена цифровая радиография Cyclone Storage Phosphor System, PerkinElmer, с запаасающей пластиной Imaging plate. Время экспозиции составляло около 24 часа для всех проб. «Горячие» частицы были локализованы по следующему критерию: на радиограмме проявлялось «скопление» запасенной люминесценции, с единым центром «вылета» и со значением фотостимулированной люминесценции, превышающей значения окружающих частиц почвы или растений более чем на порядок. Также была определена доля активности, заключенная в «горячих» частицах, в пробах дерново-подзолистой и торфяно-болотной почв. Она рассчитывается по формуле (2), где DLU – это значение запасенной люминесценции пластины в условных единицах при радиографии:

$$\text{Доля активности ГЧ} = \frac{DLU_{\text{частиц}}}{DLU_{\text{пробы}}} \times 100 \% \quad (2)$$

Проба почвы, содержащая «горячие» частицы, переносилась на стекло с углеродным скотчем. Была проведена альфа-трековая радиография с твердотельным альфа-трековым детектором (PADC, GM Scientific, Великобритания). Травление детектора проводилось в 6,25 М NaOH на протяжении 4 часов при температуре 80 °С. После чего были выявлены ямки травления альфа-треков для их визуализации с применением оптического микроскопа Olympus BX-51.

Для выделенных частиц были получены изображения с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6480LV с INCA Energy-350 в двух режимах: обратно-рассеянных электронов и вторичных электронов, а также проведен

рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) после напыления углеродом для улучшения электронной проводимости.

Результаты исследования и их обсуждение. Во всех растениях был обнаружен ^{137}Cs (рис. 1). Максимальное значение удельной активности ^{137}Cs содержалось в щавеле, на порядок больше остальных растений. Средние значения активности ^{137}Cs были выявлены в злаковых (вейник и пырей) и в сосновой хвое, а также в вереске. Высокое значение активности у щавеля может быть связано с низкорослостью растения [8].

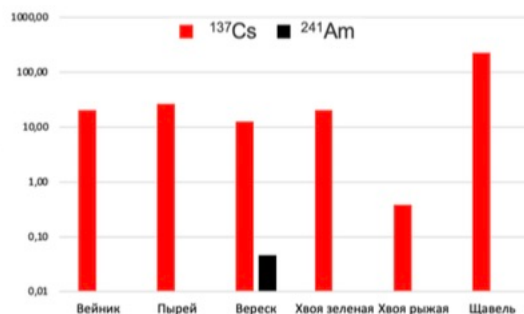


Рисунок 1 – Удельная активность ^{137}Cs и ^{241}Am в растениях

Был определен коэффициент накопления (КН) ^{137}Cs и ^{241}Am из дерново-подзолистой почвы для всех проб растений (табл. 2).

Таблица 2 – КН в системе почва–растение

Растение	КН ^{137}Cs	КН ^{241}Am
Вейник	0,11	—
Пырей	0,14	—
Вереск	0,07	0,03
Щавель	1,19	—

По результатам цифровой радиографии были локализованы и выделены 15 «горячих» частиц из проб почв (рис. 2, а). Доля активности, заключенная в дерново-подзолистой почве, составила 47 %, рассчитано по формуле (2).

По результатам альфа-трекового анализа в пробе было установлено наличие альфа-излучателей с единым центром вылета альфа-частиц (рис. 2, б), что свидетельствует о присутствии «горячей» частицы.

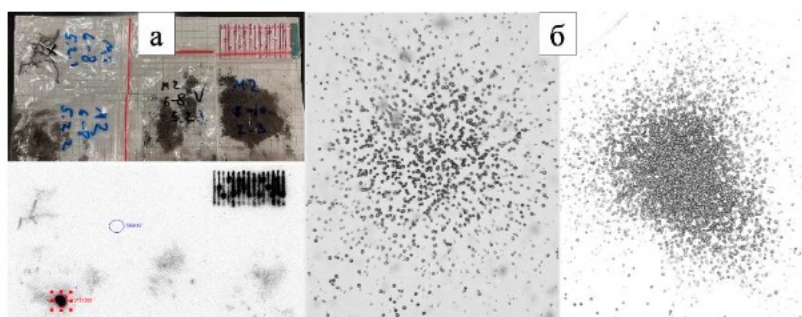


Рисунок 2 – Фотография проб и их цифровая (а) и альфа-трековая (б) радиограмма

На полученных РЭМ-изображениях (рис. 3) наблюдаются частицы, размер самой крупной $5,5 \times 6,6$ мкм. Частицы хлопьевидные, присутствуют меньшие раздробленные фрагменты размером 2×1 мкм. Поверхность частиц шероховатая. Также наблюдаются немногочисленные трещины и поры. Края частиц острые, со сколами и острыми выступами. По данным РСМА, частица содержит уран и кислород.

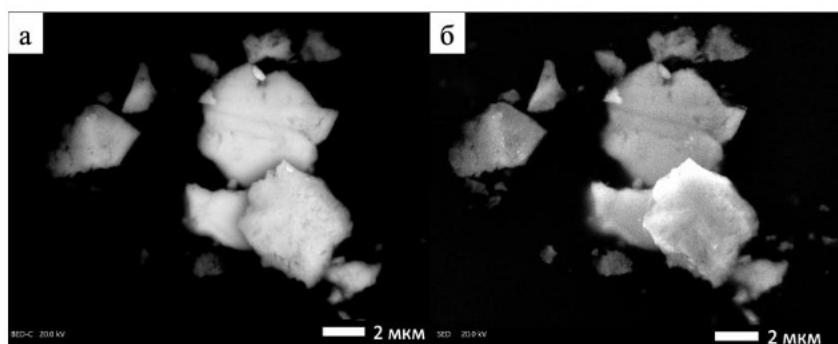


Рисунок 3 – РЭМ изображения урановых частиц в режимах обратно-рассеянных электронов (а) и вторичных электронов (б). Размер линейки 2 мкм

Заключение. Определена активность ^{137}Cs и ^{241}Am в растениях, отобранных возле деревни Масаны Полесского радиационно-экологического заповедника. Самая большая активность накоплена в щавеле (223,4 Бк/г). ^{241}Am обнаружен только в образце вереска из всех растительных проб, его удельная активность составила 0,05 Бк/г. Были определены коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{241}Am для всех проб растений, они составили 0,03–1,19. Методами радиографии были локализованы 15 топливных частиц. Растровая электронная микроскопия с рентгеноспектральным микроанализом показали наличие микрометровых «горячих» частиц, содержащих уран и кислород.

Литература

1. Sich, A. R. The Chernobyl [sic] accident revisited – source term analysis and reconstruction of events during the active phase : Thesis (Ph. D.) / A. R. Sich ; Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Nuclear Engineering. – Massachusetts Institute of Technology, 1994. – 499 p.
2. Sandalls, F. J. Hot Particles from Chernobyl: A review / F. J. Sandalls, M. G. Segal, N. Victorova // J. Environ. Radioact. – 1993. – Vol. 18 (1). – P. 5–22. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(93\)90063-D](https://doi.org/10.1016/0265-931X(93)90063-D)
3. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Р. М. Алексахин [и др.] ; под общ. ред. Л. А. Ильина, В. А. Губанова. – М. : ИздАТ, 2001. – 752 с.
4. IAEA (2011). Radioactive Particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques / IAEA-TECDOC-1663. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. – 88 p.
5. Ilyin, L. A. Radiological consequences of the Chernobyl accident in the Soviet Union and measures taken to mitigate their impact / L. A. Ilyin, O. A. Pavlovskij // IAEA Bulletin. – 1987. – Vol. 29 (4). – P. 17–24.
6. High energy X-ray microscopy for characterisation of fuel particles / B. Salbu [et al.] / Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2001. – Vol. 467–468. – P. 1249–1252.
7. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / под. ред. Ю. А. Израэля, И. М. Богдевича. – М. : Фонд «Инфосфера»–НИА–Природа; Мн. : Белкартография, 2009. – 140 с.
8. Ogura, S. I. Distribution of radioactive cesium in soil and its uptake by herbaceous plants in temperate pastures with different management after the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Station accident / S. I. Ogura, T. Suzuki, M. Saito // Soil Sci. Plant Nutr. – 2014. – Vol. 60 (6). – P. 790–800. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.954269>

SEARCH AND ANALYSIS OF "HOT" PARTICLES IN SOILS AND PLANTS OF THE NORTHERN TRACE OF THE CHERNOBYL ACCIDENT (MASANY, POLESSKY STATE RADIATION AND ECOLOGICAL RESERVE, BELARUS)

E. G. Khachatryan¹, T. R. Polyakova¹, V. O. Yapaskurt², I. E. Vlasova¹

¹Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russian Federation, eveline.khachatryan@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University, Geology Department, Moscow, Russian Federation

Abstract. Due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant on April 26, 1986, the RBMK-1000 reactor was destroyed. The direction of the wind to the north during a prolonged fireburn caused contamination of the territories to the north of the station with mobile radionuclides and immobilized ones in fuel "hot" particles. Fuel "hot" particles are particles of uranium fuel UO_2 and other more oxidized forms. The Polesie State Radioecological Reserve covers an area of 2,162 km² and was formed because its territories were contaminated with radionuclides and fuel particles to a special extent. Most of the territories were contaminated with long-lived radionuclide ^{137}Cs . The total emission of ^{137}Cs is estimated as 8.5·10¹⁶ Bq. The activity of ^{137}Cs and ^{241}Am in soils and some plants: *Calamagrostis epigejos*, *Elytrigia répens*, *Callúna vulgári*, *Pinus sylvestris*, *Rúmex acetósa*, collected on the territory of the reserve in the village of Masany (12 km from the Chernobyl NPP) was determined. Plant accumulation coefficients of ^{137}Cs were determined. "Hot" particles were detected and localized in soil samples from the village of Masany by digital and alpha-track radiography methods. The particles were extracted, fixed on carbon tape and analyzed on a scanning electron microscope in two modes: BSE (backscattered electrons) and SE (secondary

electrons). X-ray spectral microanalysis of the «hot» particle is performed. 15 fuel particles were extracted, the morphology and composition of one of them is described. Its size was determined, it was 5.5×6.6 microns.

Keywords: EXAFS fuel particles, hot particles, Cesium-137, contaminated soils, accumulation coefficient

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИМФОЦИТОВ КРЫС ПРИ ДЕЙСТВИИ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ *IN VITRO*

И. А. Челнокова¹, А. Н. Шклярова¹, Н. И. Егоренков², М. Н. Стародубцева^{1,2}

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь, irenachelnokova@gmail.com

²Гомельский государственный медицинский университет, г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Характерными особенностями клеток при действии различных факторов являются изменения их механических свойств и поведения. Существуют различные методы оценки механических свойств клеток и субклеточных структур, среди которых атомно-силовая микроскопия (АСМ) занимает особое положение. С помощью АСМ получают не только трехмерный образ поверхности отдельных клеток и их участков с нанометровым разрешением, но и записывают карты распределения механических свойств (упругих и адгезионных) поверхностного слоя клеток, позволяющие, например, оценить структуру кортикального цитоскелета и его состояние. Анализ на микро- и наноуровнях распределения механических свойств клеточной поверхности с помощью АСМ для клеток животных, подвергнутых действию рентгеновского излучения, позволит оценить состояние цитоскелета клеток, их способность взаимодействовать с другими клетками и межклеточным матриксом, что будет способствовать пониманию механизмов развития преждевременных патологических изменений, вызванных действием рентгеновского излучения.

Материалы и методы. Самцы крыс линии Вистар (возраст 16 месяцев) содержались в стационарных условиях вивария на полноценном стандартном пищевом рационе со свободным доступом к воде, согласно установленным нормам. Кровь отбирали из воротной вены печени на фоне глубокого наркоза. Облучение цельной крови крыс проводили на рентгеновской установке биологического назначения X-RAD 320 (Precision X-Ray, США) с напряжением на трубке 320 кВ, расстоянием до объекта 50 см, фильтр 1,5 мм Al, 0,25 мм Cu, 0,75 мм Sn. Лимфоциты выделяли после суток хранения при 4 °С в градиенте плотности (ROTI®Sep 1077, Carl Roth) и иммобилизовали на стекла с адгезивным покрытием с последующей фиксацией глутаровым альдегидом и отмывкой фосфатно-солевым буфером и дистиллированной водой. Изучение механических свойств поверхности лимфоцитов проводили методом атомно-силовой микроскопии с помощью Bruker BioScope Resolve в режиме PeakForce QMN in Air (частота – 0,5 Гц, область сканирования – 250 нм × 250 нм, разрешение – 256 × 256 пикселей, пиковая нагрузка – 500 пН) иглой-зондом SCANASYST-AIR с радиусом закругления 2 нм. Обработку полученных изображений проводили в программе NanoScope Analysis 1.9. Оценку механических свойств проводили по АСМ-изображениям, полученных по каналам DMT-Modulus и Adhesion. Статистический анализ данных проводили с помощью языка программирования R.

Результаты исследования и их обсуждение. Типичные АСМ-изображения карт модуля упругости и карт силы адгезии для наномасштабных участков поверхности лимфоцитов контрольных и опытных образцов крови крыс двух возрастов и человека представлены на рисунке.

Средние значения параметров оценены для малых участков поверхности клеток размером 250 нм × 250 нм. С помощью непараметрического аналога ANOVA критерия и последующего множественного сравнения был проведен анализ различий средних значений параметров для выборок при разных поглощенных дозах.