

С.А. Сыпко, Г.Н. Бобов, В.Э. Введенский, А.В. Назаренкова

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ Pu-239 В ПЕЧЕНИ РАБОТНИКОВ ПО «МАЯК» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙТРОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Челябинская область, Озерск

Контактное лицо: Владимир Эдуардович Введенский, e-mail: vvedensky@subi.su

РЕФЕРАТ

Цель: Изучение микрораспределения частиц ^{239}Pu в тканях печени работников ПО «Маяк». Это является продолжением работ по изучению микрораспределения частиц ^{239}Pu в тканях легких работников ПО «Маяк», выполненных ранее и опубликованных.

Материал и методы: Для исследования распределения размеров наночастиц ^{239}Pu использовался нейтронно-индуцированный метод детектирования треков частиц, возникающих при делении атомов ^{239}Pu . В ЮУрИБФ данный метод был усовершенствован, оптимизирован и адаптирован для исследования микрораспределения плутония в биологических тканях. Исследования образцов печени было начато в 2020 г. Были выбраны материалы для исследования микрораспределения плутония в печени из Радиологического репозитория тканей человека ЮУрИБФ. В рамках поиска современных образцов ткани печени были получены парафиновые блоки из Воронежского областного патологоанатомического бюро и из Областной больницы № 3 г. Тобольска.

Нанесение образцов печени на кварцевые трековые детекторы и сборка их в определенном порядке в пластиковый контейнер для дальнейшего облучения в реакторе ИРМ производилась аналогично образцам легких. Использовались стандартные патологогистологические методики. Толщина срезов печени 5 мкм.

Основной подсчет треков производили по результатам 36-минутного травления. Подсчитывали одиночные треки и звезды. Звезды с большой плотностью треков, для которых невозможно было произвести подсчет, подсчитывали по результатам 9-минутного травления либо напрямую, если все треки были различимы, либо в соответствии с патентом на изобретение RU 2733491 C2, который позволяет рассчитать число треков в звезде по различимым периферическим трекам.

Результаты: Проведена количественная оценка микрораспределения плутония в печени у трех бывших работников ПО «Маяк», контактировавших с соединениями плутония, с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения. Размеры обнаруженных в печени частиц $^{239}\text{PuO}_2$ не превысили 20 нм. Также проведены исследования образцов печени жителей из Озерска, Тобольска, Воронежа, не работавших на ПО «Маяк». Плотности треков, обусловленных делением природного урана и плутония, содержащихся в биологических тканях, различались не более чем в 2 раза для фоновых случаев, взятых из разных регионов. Произведено сравнение с результатами аналогичного исследования, проведенного в ЮУрИБФ менее чувствительным автордиографическим методом измерения. Настоящее исследование показало, что большая часть активности плутония содержится в печеночных дольках.

Ключевые слова: плутоний, нейтронно-индуцированный метод измерения, наночастица, микрораспределение, печень, ПО «МАЯК»

Для цитирования: Сыпко С.А., Бобов Г.Н., Введенский В.Э., Назаренкова А.В. Исследование микрораспределения Pu-239 в печени работников ПО «Маяк» с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69. № 1. С. 92–104. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-1-92-104

S.A. Sytko, G.N. Bobov, V.E. Vvedensky, A.V. Nazarenkova

Study of ^{239}Pu Microdistribution in Liver of Mayak Workers Using Neutron-Activated Measurement Method

Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Russia

Contact person: V.E. Vvedensky, e-mail: vvedensky@subi.su

ABSTRACT

Purpose: Conducted research was aimed at studying of microdistribution of ^{239}Pu particles in liver tissues of former MAYAK PA workers. Current research is a continuation of studies of microdistribution of ^{239}Pu particles in lung tissues of former MAYAK PA workers that were conducted earlier and published.

Material and methods: Neutron-induced track method was utilized for studying the distribution of sizes of ^{239}Pu nanoparticles. At Southern Urals Biophysics Institute this method was improved, optimized and adapted for studying of plutonium microdistribution in biological tissues.

Liver samples studying started in 2020. Samples were chosen from Radiobiology Human Tissue Repository SUBI. Liver samples from Voronezh regional pathology and anatomical bureau and Tobolsk regional hospital #3 were obtained within the search of contemporary liver tissues.

Application of liver samples on track detectors and their assembling into plastic box for following irradiation in nuclear reactor at Joint stock company "Institute of Nuclear Materials" was provided similarly to lung samples. Standart pathohistological techniques were applied. The thickness of liver slides was 5 micrometers.

Basic track count was conducted on the results of 36-minute etching. Single tracks and stars were counted. Stars with high density of tracks that exceeded counting abilities were counted on the results of 9-minute etching either directly (if all tracks were distinct) or in accordance with patent for invention RU 2733491 C2 that enables to calculate the number of tracks in a star by distinct peripheral tracks.

Results: This study quantitatively compares ^{239}Pu microdistribution in liver of three deceased former Mayak PA workers who were exposed to ^{239}Pu by inhalation and three deceased subjects who had been never employed at Mayak PA (from Ozyorsk, Voronezh, Tobolsk). The comparison is made utilizing neutron-activation method of measurement. The results are compared to the results of less-sensitive autoradiographic method. The study demonstrated that the most of ^{239}Pu activity in liver is concentrated in liver lobules. $^{239}\text{PuO}_2$ nanoparticles found didn't exceed the size of 20 nm. Track density for three liver samples of subjects who had been never employed at Mayak PA differed for less than two times.

Keywords: *Plutonium, neutron-activation measurement method, nanoparticles, microdistribution, liver, Mayak PA*

For citation: Sypko SA, Bobov GN, Vvedensky VE, Nazarenkova AV. Study of ^{239}Pu Microdistribution in Liver of Mayak Workers Using Neutron-Activated Measurement Method. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2024;69(1):92–104. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-1-92-104

Введение

Исследования дисперсного состава промышленных α -излучающих аэрозолей воздуха рабочих помещений плутониевого завода показали наличие т.н. мелкодисперсной фракции радиоактивных аэрозолей [1]. Литературные данные свидетельствуют о существовании фракции субмикронных радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочих помещений предприятий ядерного топливного цикла [2]. Собственные исследования ЮУрИБФ показали, что в суммарную удельную активность промышленных α -излучающих аэрозолей воздуха рабочих помещений наночастицы вносят значимый вклад [3].

Представленные исследования были направлены на изучение микрораспределения частиц ^{239}Pu в тканях печени работников ПО «Маяк». Это является продолжением работ по изучению микрораспределения частиц ^{239}Pu в тканях легких работников ПО «Маяк», выполненных ранее и опубликованных в [4].

Для исследования распределения размеров наночастиц ^{239}Pu использовался нейтронно-индуцированный метод детектирования треков. Описание нейтронно-индуцированного метода для измерения наночастиц диоксида ^{239}Pu приведено в работах [5, 6]. В ЮУрИБФ данный метод был усовершенствован, оптимизирован [7–10] и адаптирован для исследования микрораспределения плутония в биологических тканях [4].

Материал и методы

Исследования образцов печени было начато в 2020 г. При выборе материала для исследования микрораспределения плутония в печени учитывали опыт предыдущих исследований [11–13], проведенных в ЮУрИБФ, а также следующие моменты:

- для сравнения содержания и микрораспределения плутония в печени и легких необходимо исследовать образцы печени тех же субъектов, для которых ранее проводили исследование легких. Этот аспект относится как к бывшим работникам ПО «Маяк», так и к фоновым случаям;
- в случае отсутствия образцов печени субъектов, для которых были проведены исследования микрораспределения плутония в легких, необходимо подобрать аналогичные по годам жизни и (для бывших работников ПО «Маяк») с аналогичным содержанием плутония в организме;
- необходимо принимать во внимание случаи, для которых ранее отбирались ткани помимо легких.

По собственным исследованиям, для фоновых случаев – жителей территории нынешнего Озерска – расчетная доля треков от плутония в легких была незначительной от общего числа треков. Для понимания происхождения треков фоновых случаев необходимо исследовать

образцы тканей людей, проживавших в местах, не подвергавшихся воздействию актинидов.

Из Радиологического репозитория тканей человека ЮУрИБФ были выбраны следующие случаи, представленные в табл. 1. Профмаршруты работников представлены в табл. 2. В табл. 3 представлена информация из протоколов патологогистологических исследований для выбранных случаев.

Таблица 1

Случаи, выбранные из Радиологического репозитория тканей человека ЮУрИБФ

Persons chosen from Russian Radiobiology Human Tissue Repository (RRHTR)

Номер регистранта	Годы жизни	Содержание Pu, Бк (Данные ЮУрИБФ)			
		в организме	в легких	в скелете	в печени
Бывшие сотрудники ПО «Маяк»					
153	1913–1980	182,41	1,85	161,69	4,07
4118	1934–2004	115,81	12,58	48,47	35,15
196	1931–1982	1513,3	140,23	666	503,2
Фоновые случаи (Озерск)					
4097	1935–2003	–	–	–	–
636	1920–1992	–	–	–	–

Вне Репозитория тканей человека ЮУрИБФ был осуществлен поиск образцов тканей человека по следующим критериям. Во-первых, это ткани с минимально возможным содержанием техногенных актинидов. Под это условие подошли бы образцы ткани, фиксированные в доядерную эпоху – до 1945 г. Во-вторых, это ткани людей одного возраста на момент смерти с исследуемыми случаями бывших сотрудников ПО «Маяк», проживавших в других регионах. Желательно, чтобы годы жизни приблизительно совпадали с исследуемыми случаями бывших работников ПО «Маяк» – 1913–1980, 1934–2004, 1931–1982, либо имели приблизительно тот же возраст на момент смерти – 67–69 и 50 лет. Исследование таких образцов тканей позволило бы оценить вклад урана в общее число треков на детекторах.

Изначально было очевидно, что найти материал тканей доядерной эпохи представляется маловероятным. Фиксированные в парафин блоки найти не удалось, а использование влажных препаратов из музейных фондов сочли нецелесообразным. В рамках поиска современных образцов ткани были поданы заявки в Воронежское областное патологоанатомическое бюро и в Областную больницу № 3 г. Тобольска. Парафиновые блоки тканей должны были удовлетворять следующим критериям:

- приблизительно возраст на момент смерти – 67–69 и 50 лет;
- отсутствие серьезных патологий легких и печени;
- причина смерти не связана с заболеваниями легких и печени.

Таблица 2

Профмаршруты случаев, выбранных из Радиологического репозитория тканей человека ЮУрИБФ

Professional route of persons chosen from RRHTR

ИН	Завод	Цех, участок	Должность	Год поступления	Год увольнения
153	20	Литейно-механический	слесарь	1959	1963
153	20	Химико-металлургический	аппаратчик	1963	1967
153	20	Химико-металлургический	слесарь	1967	1969
153	20	Химико-металлургический	слесарь	1969	1973
196	20	Литейно-механический	слесарь	1949	1951
196	20	Котельная 2	зольщик	1951	1952
196	20	Литейно-механический	слесарь	1952	1972
196	20	Механический	слесарь	1972	1981
4118	20	Заводоуправление	инженер-физик	1958	1959
4118	20	Литейно-механический	ст. инженер-физик	1959	1969
4118	20	Заводоуправление	и.о. гл. инж. по науч. части	1969	1969
4118	20	Заводоуправление	зам. гл. инж. по науч. части	1969	1994

Таблица 3

Информация из протоколов патологистологических исследований для случаев, выбранных из Радиологического репозитория тканей человека ЮУрИБФ

Information from protocols of pathohistological studies of persons chosen from RRHTR

Номер регистранта	Пол	Возраст на момент смерти (годы жизни)	Причина смерти (протокол)	Описание печени (протокол)
153	М	67 (1913–1980)	Смерть больного обусловлена интоксикацией вследствие развития гангрены нижних конечностей	Масса печени 1620 г. Печень на разрезе и с поверхности однородного буровато-коричневатого цвета. Печень диффузная, на отдельных участках очаговая инфильтрация миелоидными элементами
4118	М	69 (1934–2004)	Острая сердечно-сосудистая недостаточность, асистолия	Масса печени 1500 г. Печень бордового цвета, эластичная, на разрезе однородного вида, полнокровная. Отек перикапиллярных пространств, полнокровие межблочных капилляров и центральных вен. Зернистая дистрофия гепатоцитов
196	М	50 (1931–1982)	Легочно-сердечная недостаточность. Раковая интоксикация	Масса печени 2120 г. Ткань печени светло-коричневого цвета с поверхности и на разрезе. Дискомплексация печеночных балок. Капилляры инфильтрованы сегментоядерными лейкоцитами в умеренном количестве. Вокруг триад видны инфильтраты из лимфоцитов. Протоплазма гепатоцитов набухшая, мелкозернистая, часто заполнена зернами бурого пигмента
4097	М	68 (1935–2003)	Тромбоэмболия долевого ствола легочной артерии вследствие кардиопульмонального рефлекса	Масса печени 1450 г. Печень вишнево-коричневого цвета, поверхность с чуть заметной зернистостью. На разрезе – мускатная
636	М	71 (1920–1992)	Легочно-сердечная недостаточность (отрыв фрагмента тромба с эмболией обеих стволов легочной артерии и их ветвей)	Масса печени 1450 г. Печень коричневого цвета, на разрезе с нерезко выраженным «мускатом», в правой доле, под капсулой, узел серовато-синеватого цвета, на разрезе губчато-волоконистого вида.

В ответ на заявки были получены парафиновые блоки с тканями. Некоторые блоки содержали одновременно фрагменты нескольких органов. Информация о случаях представлена в табл. 4.

Таблица 4

Информация о случаях, выбранных вне Репозитория тканей человека ЮУрИБФ

Information about persons chosen out of RRHTR

Номер регистранта	Пол	Возраст на момент смерти (годы жизни)	Причина смерти	Описание печени (протокол)
ВОПАБ 156	М	70 (1946-2016)	Внутричерепная гематома в лобной, теменной и подкорковой областях левого полушария головного мозга	Масса печени 1500 г. Капсула сероватая, поверхность гладкая, ткань на ощупь плотная, на разрезах на коричневом фоне четкий темно-красный крап, рисунок долек хорошо выражен. Полнокровие в центре долек, размерность ядер гепатоцитов
Тоб. 363	М	70 (1949-2019)	Информация отсутствует	Информация отсутствует

Нанесение биоматериала на трековые детекторы. Подсчет треков. Расчет размеров частиц

Нанесение образцов печени на кварцевые трековые детекторы и сборка их в определенном порядке в пластиковый контейнер для дальнейшего облучения в реакторе ИРМ производилась аналогично образцам легких [4]. Использовались стандартные патологистологические техники [14]. Толщина срезов печени 5 мкм.

Основной подсчет треков производили по результатам 36-минутного (9+27 мин) травления. Подсчитывали одиночные треки и звезды. Звезды с большой плотностью треков, для которых невозможно было произвести подсчет, подсчитывали по результатам 9-тиминутного травления либо напрямую, если все треки были различимы, либо в соответствии с патентом [15], который позволяет рассчитать число треков в звезде по различным периферическим трекам.

На всех обработанных детекторах отмечалось схожее распределение треков: повышенная плотность треков была отмечена на периферии срезов и на участках, соответствующих стенкам сосудов. По-видимому, на данных участках создавался повышенный фон от урана, впитывающегося в ткани из реактивов, используемых при проводке. На областях детекторов, соответствующих остальным участкам срезов, распределение треков было более равномерным. При обсчете периферические треки и треки, соответствующие стенкам сосудов, не учитывали.

Расчет размеров частиц [10] проводили в соответствии с формулой:

$$l = kna \quad (1)$$

где a – шаг кристаллической решетки (0,54 нм для $^{239}\text{PuO}_2$); k – коэффициент, зависящий от физических характеристик соединения и интерпретации размера частицы, например, для $^{239}\text{PuO}_2$: диаметр Мартина $k = 1$; диаметр Ферета $k = \sqrt{3}$ [16]; n – число шагов кристаллической решетки.

Число шагов кристаллической решетки вычисляется по формуле:

$$n = \text{int} \left\{ \frac{\sqrt[3]{2N-1}-1}{2} \right\} \quad (2)$$

где N – число ядер плутония, облученных в поле тепловых нейтронов; $\text{int}\{\}$ – целая часть числа

Число атомов частицы N , облученных в поле тепловых нейтронов, рассчитывали на основе подсчета числа визуализированных треков в соответствии с выражением:

$$N = \frac{N_f}{\varepsilon \Phi \sigma_f 10^{-24}} \quad (3)$$

где N_f – число треков, приписанных данной частице в процессе обработки изображений; ε – эффективность регистрации актов деления трековым детектором; Φ – флюенс тепловых нейтронов, $4,08 \cdot 10^{17}$ нейтрон/см²; σ_f – сечение деления ядра ^{239}Pu в поле тепловых нейтронов, $750 \pm 1,82$ барн; 10^{-24} – коэффициент перехода от барн к см².

Результаты и обсуждение

Обработка фоновых детекторов

Было обчислено 3 детектора, на которые были нанесены фоновые образцы печени: 1306 (Озерск), 1410 (Тобольск), 1414 (Воронеж). Границы обсчета определяли по границам фотографий, на которые не попадали периферические области с повышенной плотностью треков. В дальнейшем по этим границам определяли площадь обсчета и производили расчеты плотности треков.

Плотность треков на периферии срезов во всех трех случаях была различной, что, очевидно, обусловлено различиями в используемых реактивах для проводки (рис. 1). Наибольшая плотность треков на периферии

срезов была отмечена для образца печени из Воронежа (рис. 1в).

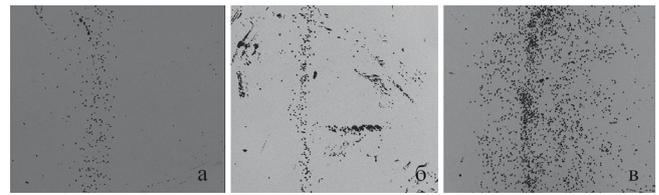


Рис. 1. Треки на границах срезов на детекторах: а – 1306, б – 1410, в – 1414

Fig. 1. Tracks in the edge areas of cuts on detectors: а – 1306; б – 1410; в – 1414

Распределение треков на детекторе 1302, соответствующем случаю 636, было более равномерным: разница между плотностями треков в периферических и центральных областях среза была выражена слабее. Визуально плотность треков была больше плотности треков на детекторах с образцами ткани печени случая 4118 с содержанием плутония в печени, равном 35,15 Бк (рис. 2). Из этого был сделано предположение, что либо сам срез был взят из поверхностного слоя кусочка ткани и был сильно загрязнен фоном от реактивов для проводки, либо был ошибочно взят блок печени другого случая. Детектор был исключен из анализа.

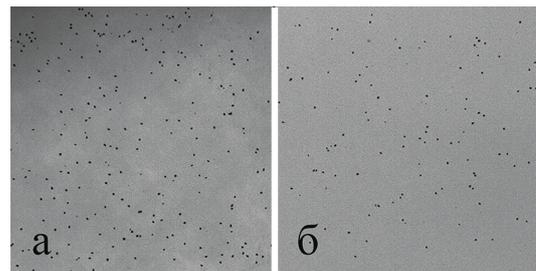


Рис. 2. Различная плотность треков. а – детектор 1302 (случай 636, фоновый), б – детектор 1314 (случай 4118, бывший работник ПО «МАЯК»)

Fig. 2. Different track density: а – detector 1302 (case #636, non-worker of MAYAK PA (background)); б – detector 1314 (case #4118, former MAYAK PA worker)

Для обчисленных детекторов был произведен расчет плотности треков. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Плотность треков на фоновых детекторах
Track density on background detectors

Детектор	Информация о фоновом срезе печени	Плотность треков, мм ⁻²
1306	Случай 4097, Озерск	14
1410	Случай 363, Тобольск	11
1414	Случай 156, Воронеж	8

Как видно из таблицы, плотности треков на срезах печени, взятых из различных регионов, разнятся меньше чем в 2 раза.

Далее был произведен расчет ожидаемой плотности треков от урана, исходя из фонового содержания урана в печени (6 нг/г) [17]. Полученное значение составило 105 треков/мм², что приблизительно на порядок превысило значения, полученные в результате обсчета детекторов.

Обсчет детекторов с образцами печени бывших работников плутониевого производства

Было обчислено 8 детекторов, на которые были нанесены образцы печени бывших работников плутониевого

производства. Информация об обчисленных детекторах представлена в табл. 6 :

Таблица 6

Информация об обчисленных детекторах
Information about processed detectors

Случай	№ блока	№ детектора
4118	21	912
4118	20	1314
153	43	907
153	30	1308
153	39	1309
153	13	1310
196	61	1404
196	57	1403

Границы обсчета определяли по границам фотографий, на которые не попадали периферические области с повышенной плотностью треков. В дальнейшем по этим границам определяли площадь обсчета и производили расчеты плотности треков и содержания плутония в печени.

Обработка детекторов для случая 4118

Для случая 4118 было обчислено два детектора: 912 и 1314.

Результаты обработки детектора 912

Детектор 912 был облучен ранее, облученный срез печени не окрашивался. На рис. 3 представлено панорамное изображение протравленного детектора с отмеченной границей обсчета.

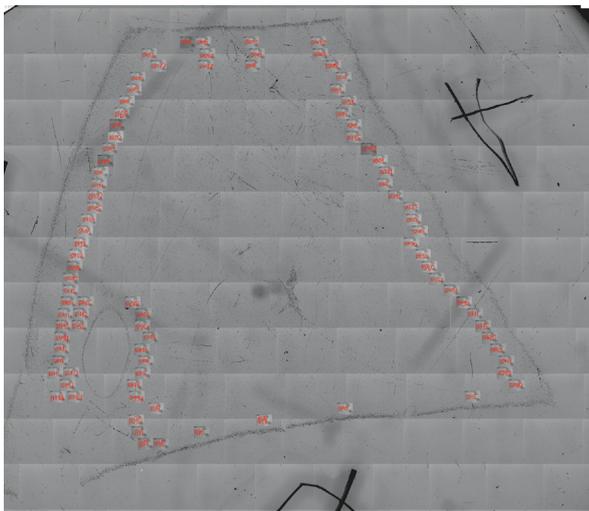


Рис. 3. Треки и граница обсчета на детекторе 912
Fig. 3. Tracks and count border (detector 912)

Определение гистологических структур печени, в которых были обнаружены звезды, осуществлялось по соответствующему микропрепарату (рис. 4).

Всего было найдено 13 звезд. Из них двенадцать – двухтрековые и одна – пятидесятидвухтрековая, которой соответствует частица ²³⁹PuO₂ размером 20 нм (рис. 5). Оценку количества треков в данной звезде производили по результатам девятиминутного травления (рис. 5б).

Результаты обработки детектора 1314

Ниже представлено панорамное изображение окрашенного среза и соответствующая панорама протравленного детектора с отмеченными границами обсчета (рис. 6, 7).

Всего было найдено 25 двухтрековых звезд.



Рис. 4. Панорамное изображение микропрепарата печени, соответствующее срезу на детекторе 912

Fig. 4. Panoramic image of liver microslide that corresponds to the liver cut on detector 912

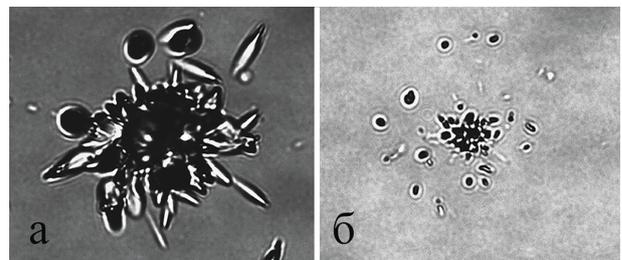


Рис. 5. Звезда на детекторе 912 при различном времени травления. а – 36 мин., б – 9 мин

Fig. 5. A star on detector 912 after: а – 36 minute etching; б – 9 minute etching



Рис. 6. Панорама окрашенного среза печени на детекторе 1314
Fig. 6. Panoramic image of stained liver slide (detector 1314)

Обработка детекторов для случая 153

Для случая 153 было обчислено четыре детектора: 907, 1308, 1309 и 1310.

Результаты обработки детектора 907

Ниже представлены панорамное изображение неокрашенного среза и соответствующая панорама протравленного детектора 907 с отмеченными границами обсчета (рис. 8, 9).

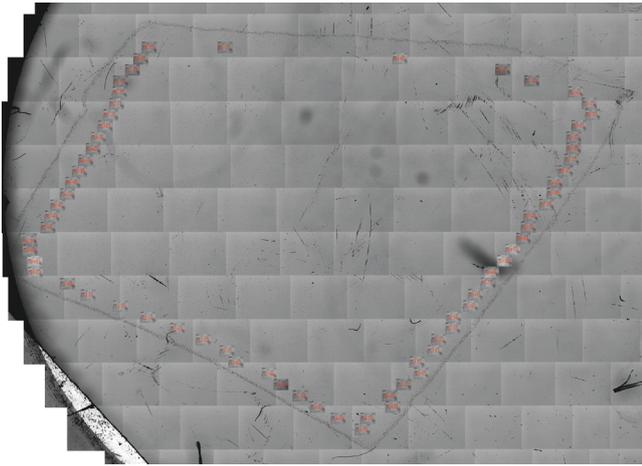


Рис. 7. Треки и граница обсчета на детекторе 1314
Fig. 7. Tracks and count border (detector 1314)



Рис. 8. Панорама неокрашенного среза печени на детекторе 907. Слева, в нижней части среза, расположен разрезанный вдоль сосуд, исключенный из обсчета. Также исключен из обсчета сосуд, разрезанный поперек, расположенный правее центра среза

Fig. 8. Panoramic image of unstained liver slide on detector 907. Areas corresponding to blood vessels (lower part of slide, on the left, and right to the slide center) are excluded from track counting

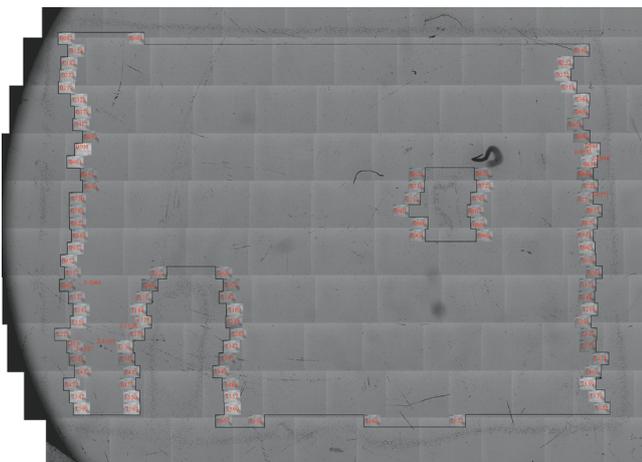


Рис. 9. Треки и граница обсчета на детекторе 907
Fig. 9. Tracks and count border (detector 907)

Всего было найдено 56 звезд. Наибольшее количество треков в обнаруженных звездах – 21, что соответствует частице размером $^{239}\text{PuO}_2$ – 14,6 нм. Звезда из 21

трека обсчитана по результатам девятиминутного травления, т.к. при тридцатиминутном травлении наблюдалось сильное перекрытие треков (рис. 10).

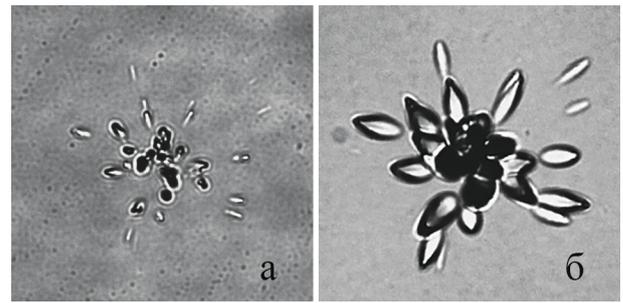


Рис. 10. Детектор 907, звезда из 21 трека. а – вид после 9-минутного травления, б – вид после 36-минутного травления
Fig. 10. A 21-track star on detector 907 after: а – 9 minute etching; б – 36 minute etching

Результаты обработки детектора 1308

Ниже представлены панорамное изображение окрашенного среза и соответствующая панорама протравленного детектора 1308 с отмеченными границами обсчета (рис. 11, 12).

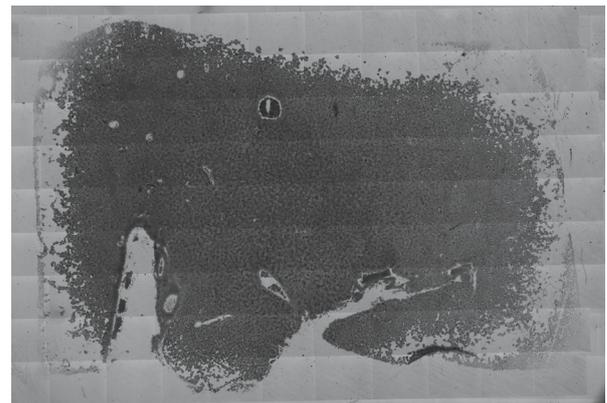


Рис. 11. Панорама окрашенного среза печени на детекторе 1308. В нижней части среза расположены два разрезанных по длине сосуда, исключенные из обсчета

Fig. 11. Panoramic image of stained liver slide on detector 1308. Areas corresponding to blood vessels (lower part of slide) are excluded from track counting

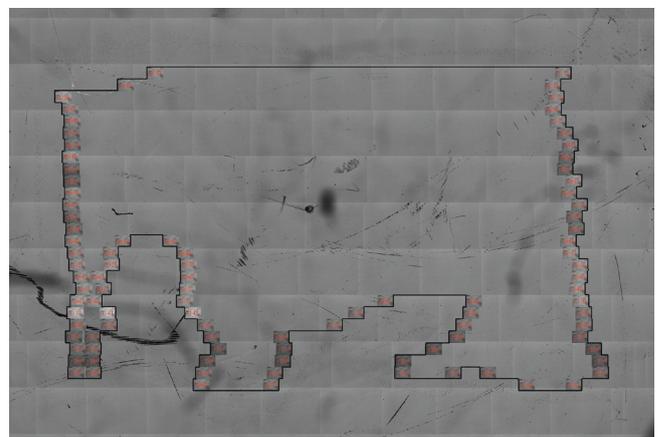


Рис. 12. Треки и граница обсчета на детекторе 1308
Fig. 12. Tracks and count border (detector 1308)

Всего было найдено 14 звезд. Наибольшее количество треков в обнаруженных звездах – 11, что соответствует частице размером $^{239}\text{PuO}_2$ – 11,9 нм.

Результаты обработки детектора 1309

Ниже представлено панорамное изображение окрашенного среза и соответствующая панорама протравленного детектора 1309 с отмеченными границами об-счета (рис. 13, 14).

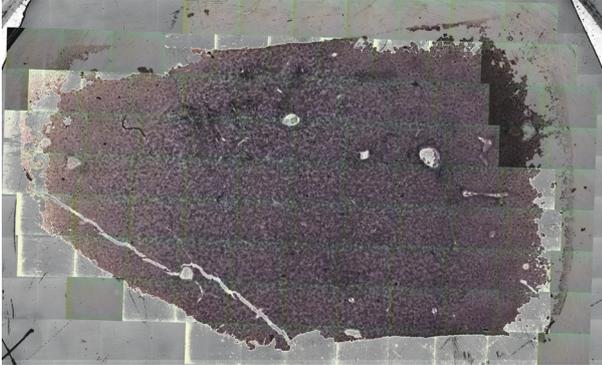


Рис. 13. Панорама окрашенного среза печени на детекторе 1309
Fig. 13. Panoramic image of stained liver slide (detector 1309)

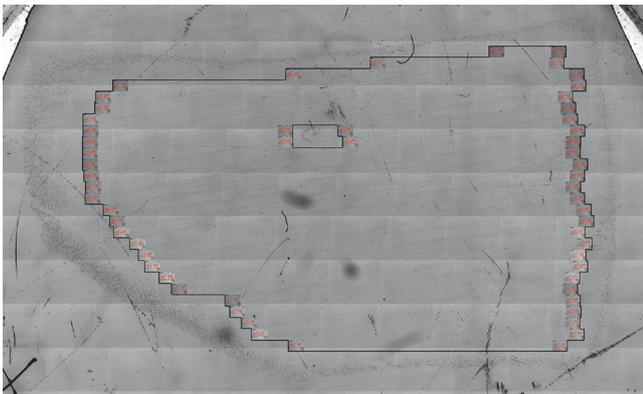


Рис. 14. Треки и граница об-счета на детекторе 1309. В верхней части среза расположен сосуд, исключенный из об-счета
Fig. 14. Tracks and count border (detector 1309). Area corresponding to blood vessel (upper part of slide) is excluded from track counting

Всего было найдено 19 звезд. Наибольшее количество треков в обнаруженных звездах – 20, что соответствует частице размером 14,5 нм. Звезда из 20 треков об-считана по результатам девятиминутного травления, т.к. при тридцатиминутном травлении наблюдалось сильное перекрытие треков (рис. 15).

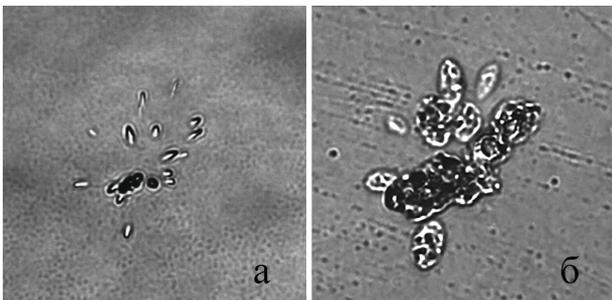


Рис. 15. Детектор 1309, звезда из 20 треков. а – вид после 9-минутного травления, б – вид после 36-минутного травления
Fig. 15. A 20-track star on detector 1309 after: а – 9 minute etching; б – 36 minute etching

Результаты обработки детектора 1310

Ниже представлено панорамное изображение окрашенного среза и соответствующая панорама протравленного детектора 1310 с отмеченными границами об-счета (рис. 16, 17).

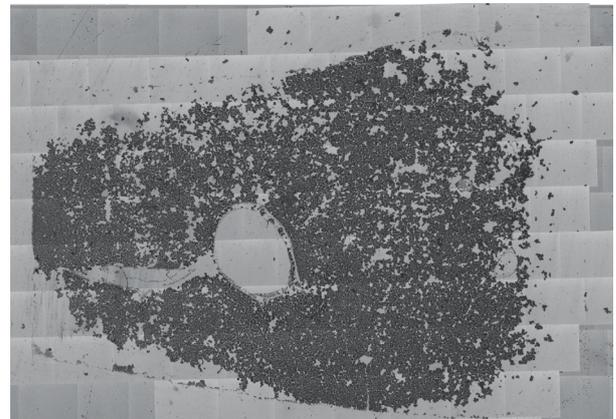


Рис. 16. Панорама окрашенного среза печени на детекторе 1310. Ле-вее центра расположен сосуд, исключенный из об-счета
Fig. 16. Panoramic image of stained liver slide (detector 1310). Area corresponding to blood vessel (left to the center of slide) is excluded from track counting

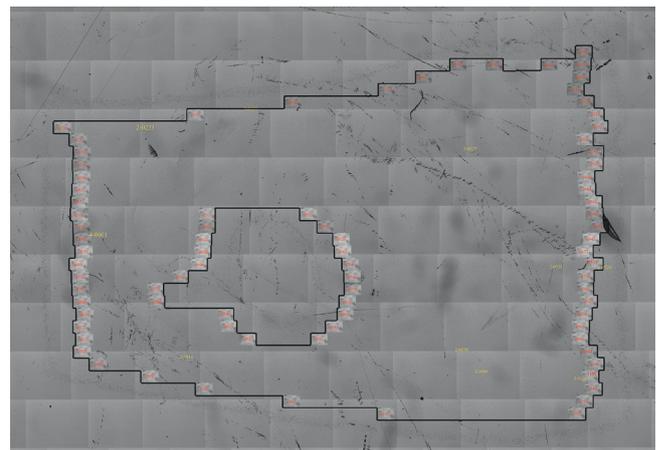


Рис. 17. Треки и граница об-счета на детекторе 1310
Fig. 17. Tracks and count border (detector 1310)

Всего было найдено 10 звезд, из которых одна четы-рехтрековая и остальные двухтрековые. Размер частицы, соответствующей четырехтрековой звезде, 8,1 нм.

Обработка детекторов для случая 196

Для случая 196 было об-считано два детектора: 1404 и 1403. На обоих детекторах была отмечена высокая плотность одиночных треков, что было ожидаемо, учиты-вая, что содержание плутония в печени для случая 196 более чем на два порядка превышало содержание плутония в печени для случая 153. На этих детекторах об-счет производился следующим образом. Внутри грани-ц об-счета об-считывались единичные треки на каж-дом пятом поле зрения, а звезды – на всех фотографиях. Полное число треков складывалось из числа единич-ных треков, пересчитанных на всю площадь об-счета, и звезд.

Результаты обработки детектора 1404

На рис. 18, 19 представлены панорамные изобра-жения детектора 1404 с окрашенным срезом и протравлен-ного детектора с отмеченными границами об-счета.

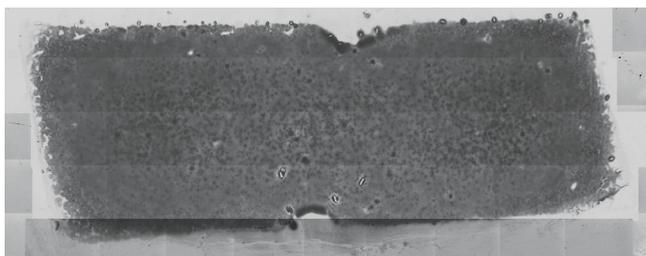


Рис. 18. Панорама окрашенного среза печени на детекторе 1404
Fig. 18. Panoramic image of stained liver slide (detector 1404)

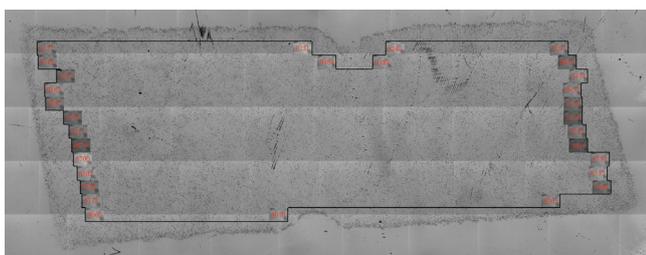


Рис. 19. Треки и граница обсчета на детекторе 1404
Fig. 19. Tracks and count border (detector 1404)

Всего было обнаружено 412 звезд. Количество треков в звездах детекторе 1404 не превышало 4 (соответствующий размер частицы $^{239}\text{PuO}_2 - 8,1 \text{ нм}$).

Результаты обработки детектора 1403

На детекторе 1403 был срез печени, содержащий два сосуда, границы которых были исключены из обсчета. На рис. 20 представлено панорамное изображение среза печени, нанесенного на детектор 1403. На рис. 21 представлен протравленный детектор 1403 с отмеченной границей обсчета. Желтым подписаны фотографии, по которым были выставлены границы обсчета. Красным подписаны обсчитанные фотографии, представляющие собой каждое пятое поле зрения.

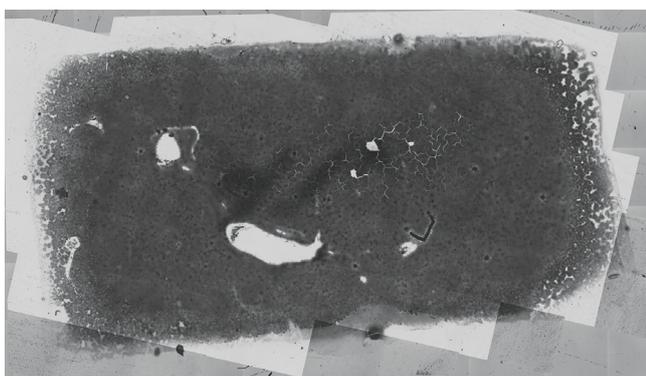


Рис. 20. Панорамное изображение окрашенного среза печени на детекторе 1403
Fig. 20. Panoramic image of stained liver slide (detector 1403)

Всего было обнаружено 439 звезд. Наибольшее количество треков в обнаруженных звездах – 16, что соответствует частице размером 13,5 нм.

Сравнение распределения одиночных треков

Для детекторов, на которые были нанесены срезы печени бывших работников плутониевого производства, был произведен расчет плотности треков. Результаты приведены в табл. 7.

Средние значения плотностей треков соотносятся для случаев 153, 4118 и 196 как 1:1,7:14, а соотношение

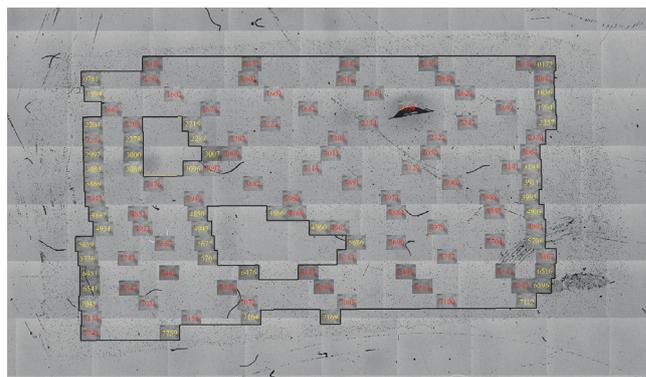


Рис. 21. Треки и граница обсчета на детекторе 1403
Fig. 21. Tracks and count border (detector 1403)

Таблица 7

Плотность треков на детекторах с нанесенными срезами печени бывших работников плутониевого производства
Track density on detectors with slides of former workers of plutonium facility

Детектор	Информация о срезе печени	Плотность треков, мм ⁻²
907	153 печень (блок №43)	100
1308	153 печень (блок №30)	55
1309	153 печень (блок №39)	81
1310	153 печень (блок №13)	80
912	4118 печень (блок №21)	133
1314	4118 печень (блок №20)	133
1404	196 печень (блок №61)	1233
1403	196 печень (блок №57)	992

удельных активностей плутония в печени как 1:9,3:94,5, хотя, допуская, что плотность печени для всех трех случаев одинакова, соотношения должны быть приблизительно равными. По-видимому, причиной таких существенных различий является использование различных методов определения соответствующих показателей.

Топологическая привязка частиц к биологическим тканям

Различение гистологических структур печени

В предыдущих исследованиях было обнаружено, что поверхность детекторов после облучения загрязнена клеем из липкой ленты, использовавшейся для фиксации детекторов между собой. Данное загрязнение как минимум затрудняло, а в некоторых случаях и делало невозможным, определение гистологических структур, в которых локализованы частицы. Учитывая этот опыт, мы не использовали клейкую ленту для фиксации между собой детекторов с нанесенными образцами печени. Для этого была использована пищевая пленка. Тем не менее, при разборе коробки с облученными детекторами было обнаружено, что детекторы загрязнены аналогичным образом. В условиях облучения и повышенной температуры в реакторе пищевая пленка расплавилась, смочив находящиеся на детекторах срезы печени. На рис. 22 представлены ожидаемый (на основе микропрепарата) и фактический виды окрашенной облученной ткани печени.

Данный факт сделал невозможным различение гистологических структур печени на некоторых участках срезов. В частности, было невозможно выделить структуры печеночных долек, например, клетки Купфера и синусоиды.

Классификация гистологических структур печени

После обсчета детекторов на панорамном изображении детектора с визуализированными треками отмечались звезды – скопления треков, соответствующие

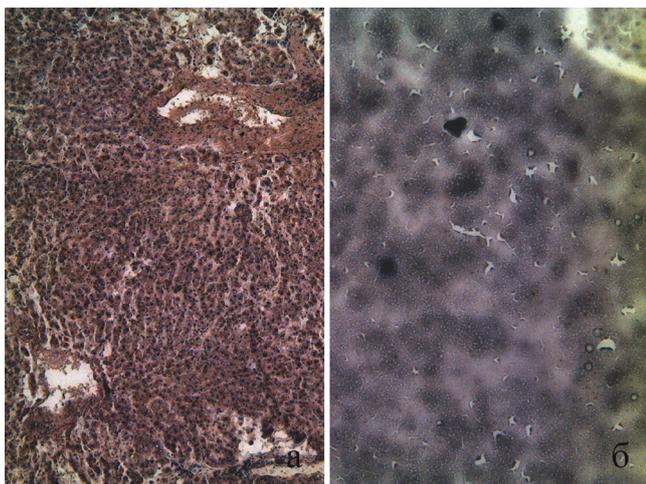


Рис. 22. Внешний вид среза печени, 50х. а – ожидаемый, б – фактический.

Fig. 22. The view of liver slide, 50x: а – expected; б – actual

наночастицам. Полученное изображение совмещалось с панорамными изображениями детектора с неокрашенной тканью и детектора с окрашенной тканью. Совмещение производили по меткам-царапинам, нанесенным на область детектора, находящуюся вне среза ткани, после облучения детекторов. Локализация каждой частицы определялась в соответствии с классификацией гистологических структур печени, приведенной в табл. 8 [11]. Структуры печеночной дольки были объединены в одну, поскольку было невозможно их различить.

Таблица 8
Классификация гистологических структур печени
Classification of histological liver structures

Наименование структуры		Гистологическое описание
Печеночная долька	Печеночная балка	Концевой секреторный отдел, образованный двумя рядами гепатоцитов; включает желчный капилляр
	Синусоид	Внутридольковый гемокапилляр
	Клетка Купфера	Макрофаг, локализуется в синусоидах; может мигрировать с током крови
Портальный тракт (печеночная триада)	Строма	Рыхлая соединительная ткань
	Желчный проток	Тубулярное образование; образован однослойным кубическим эпителием и рыхлой соединительной тканью
	Междольковая артерия	Кровеносные сосуды типичного строения
Междольковая вена		

После определения локализации звезд были получены статистические данные двух видов. Первые данные отражали распределение частиц по количеству треков. Вторые данные были получены после группировки данных по гистологическим структурам печени и отражали распределение частиц по количеству треков в каждой гистологической структуре.

Получение первичных данных о микрораспределении плутония-239 в тканях печени

Результаты обсчета фоновых детекторов

Результаты обработки детектора 1306

Гистологическое описание микропрепарата 4097

№ 21. Детектор 1306

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Полнокровие центральных вен и вен портальных трактов.

Балочно-радиальное строение долек стерто на фоне выраженного некроза гепатоцитов.

Портальные тракты слабо расширены за счет склероза без лимфоцитарной инфильтрации.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1306

Внутри границ обсчета было обнаружено 1266 одиночных треков и 5 звезд, четыре из которых двухтрековые и одна – пятитрековая. Все звезды были локализованы в печеночных дольках.

Результаты обработки детектора 1302

Гистологическое описание микропрепарата 636

№ 4. Детектор 1302

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Просветы центральных вен и вен портальных трактов преимущественно пустые.

Балочно-радиальное строение долек стирается на фоне выраженной жировой дистрофии гепатоцитов.

Отдельные портальные тракты расширены за счет склероза.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1302

Распределение треков на детекторе было относительно равномерным: разница между плотностями треков в периферических и центральных областях среза была выражена слабее. Визуально плотность треков была больше плотности треков на детекторах с образцами ткани печени случая 4118 с содержанием плутония в печени, равном 35,15 Бк. Из этого был сделано предположение, что либо сам срез был взят из поверхностного слоя кусочка ткани и был сильно загрязнен фоном от реактивов для проводки, либо был ошибочно взят блок печени другого случая. Детектор не обсчитывался.

Результаты обработки детектора 1410

Гистологическое описание микропрепарата 363

(Тоб.). Детектор 1410

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Различное кровенаполнение центральных вен (от пустых просветов до умеренного полнокровия). Полнокровие ряда вен портальных трактов.

Балочно-радиальное строение долек стирается на фоне выраженной крупнокапельной жировой дистрофии гепатоцитов.

Отдельные портальные тракты незначительно расширены. В их строме слабая лимфоцитарная инфильтрация.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1410

Внутри границ обсчета было обнаружено 630 одиночных треков и две двухтрековые звезды. Определить локализацию звезд было невозможно из-за стертости балочно-радиального строения долек на фоне выраженной жировой дистрофии гепатоцитов.

Результаты обработки детектора 1414

Гистологическое описание микропрепарата 156

(ВРН). Детектор 1414

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Выраженное полнокровие синусоидных капилляров. Полнокровие центральных вен и вен портальных трактов.

Портальные тракты практически не расширены, но в строме некоторых из них наблюдается лимфоцитарная инфильтрация.

Балочно-радиальное строение долек выражено четко. Капсула печени на срезе не представлена.

Распределение треков на детекторе 1414

Внутри границ обсчета было обнаружено 389 одиночных трека и две звезды – 10 и 32 трека. Звезды располагались на расстоянии порядка 0,9 мм друг от друга. Звезды были локализованы в печеночных дольках. Учитывая отсутствие на детекторе звезд с меньшим количеством треков, предполагаем, что данные звезды были образованы от частиц, содержащих делящиеся при облучении нейтронами радионуклиды, случайно попавших на срез.

Результаты обсчета детекторов с образцами печени бывших работников плутониевого производства

Обработка детекторов для случая 4118

Результаты обработки детектора 912

Гистологическое описание микропрепарата 4118

№ 21. Детектор 912

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Просветы центральных вен преимущественно пустые. Полнокровие некоторых вен портальных трактов.

Наблюдается дисконплексаия печеночных балок и выраженная зернистая дистрофия печени.

Отдельные портальные тракты значительно расширены за счет склероза.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 912

Внутри границ обсчета было обнаружено 14160 одиночных треков и 13 звезд. Из них двенадцать – двухтрековые и одна – пятидесятидвухтрековая, которой соответствует частица $^{239}\text{PuO}_2$ размером 20 нм.

Определение гистологических структур печени, в которых были обнаружены звезды, осуществлялось по соответствующему микропрепарату.

Данные по распределению звезд по гистологическим структурам печени представлены в табл. 9.

Таблица 9

Распределение звезд по гистологическим структурам печени для детектора 912

Distribution of stars by histological liver structures (detector 912)

Количество треков	Частота	Доля треков
Суммарно по всем структурам		
2	11	0,30
52	1	0,70
Печеночная долька		
2	9	0,24
52	1	0,70
Желчный проток		
2	1	0,03
Междольковая артерия		
2	1	0,03

Результаты обработки детектора 1314

Гистологическое описание микропрепарата 4118

№ 20. Детектор 1314

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Различное кровенаполнение центральных вен и вен портальных трактов (от пустых просветов до умеренного полнокровия).

Наблюдается дисконплексаия печеночных балок и выраженная зернистая дистрофия печени.

Отдельные портальные тракты расширены за счет склероза и слабой лимфоцитарной инфильтрации.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1314

Внутри границ обсчета было обнаружено 18297 одиночных треков и 25 двухтрековых звезд. Одна звезда была обнаружена в центральной вене, не попадающей в приведенную выше классификацию гистологических структур печени, остальные – в печеночных дольках.

Данные по распределению звезд по гистологическим структурам печени представлены в табл. 10.

Таблица 10

Распределение звезд по гистологическим структурам печени для детектора 1314

Distribution of stars by histological liver structures (detector 1314)

Количество треков	Частота	Доля треков
Суммарно по всем структурам		
2	25	1
Печеночная долька		
2	24	0,96
Другое		
2	1	0,04

Обработка детекторов для случая 153

Результаты обработки детектора 907

Гистологическое описание микропрепарата 153

№ 43. Детектор 907

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Различное кровенаполнение центральных вен (от пустых просветов до умеренного полнокровия). Полнокровие вен портальных трактов.

Отдельные портальные тракты расширены за счет склероза. В строме большинства портальных трактов слабая лимфоцитарная инфильтрация.

Балочно-радиальное строение печеночных долек нарушено за счет выраженной лимфоцитарной инфильтрации синусоидных капилляров.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 907

Внутри границ обсчета было обнаружено 14797 одиночных треков и 56 звезд с количеством треков от 2 до 21 (размер соответствующей частицы $^{239}\text{PuO}_2$ – 14,6 нм). Шесть звезд были локализованы в центральных венах и сосудах, не попадающих под приведенную выше классификацию гистологических структур печени, положение четырех звезд определить не удалось, одна звезда была обнаружена в междольковой артерии, остальные были обнаружены в печеночных дольках.

Данные по распределению звезд по гистологическим структурам печени представлены в табл. 11.

Результаты обработки детектора 1308

Гистологическое описание микропрепарата 153

№ 30. Детектор 1308

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Различное кровенаполнение центральных вен (от пустых просветов до умеренного полнокровия). Полнокровие вен портальных трактов.

Отдельные портальные тракты незначительно расширены. В строме большинства портальных трактов слабая лимфоцитарная инфильтрация.

Балочно-радиальное строение печеночных долек нарушено за счет выраженной лимфоцитарной инфильтрации синусоидных капилляров.

Встречаются редкие небольшие участки жировой дистрофии гепатоцитов.

Капсула печени на срезе не представлена.

Таблица 11

Распределение звезд по гистологическим структурам печени для детектора 907**Distribution of stars by histological liver structures (detector 907)**

Количество треков	Частота	Доля треков
Суммарно по всем структурам		
2	48	0,66
3	5	0,10
7	2	0,10
21	1	0,14
Печеночная долька		
2	39	0,53
3	4	0,08
7	2	0,10
Междольковая артерия		
2	1	0,01
Самостоятельный сосуд		
2	5	0,07
21	1	0,14
Не определяется		
2	3	0,04
3	1	0,02

Распределение треков на детекторе 1308

Внутри границ обсчета было обнаружено 6528 одиночных треков и 13 звезд с количеством треков от 2 до 11 (размер соответствующей частицы $^{239}\text{PuO}_2$ – 11,9 нм). Четыре звезды были локализованы в центральных венах и сосудах, не попадающих под приведенную выше классификацию гистологических структур печени, остальные – в печеночных дольках.

Данные по распределению звезд по гистологическим структурам печени представлены в табл. 12.

Таблица 12

Распределение звезд по гистологическим структурам печени для детектора 1308**Distribution of stars by histological liver structures (detector 1308)**

Количество треков	Частота	Доля треков
Суммарно по всем структурам		
2	9	0,43
4	2	0,19
5	1	0,12
11	1	0,26
Печеночная долька		
2	6	0,29
4	1	0,10
5	1	0,12
11	1	0,26
Другое		
2	3	0,14
4	1	0,10

Результаты обработки детектора 1309**Гистологическое описание микропрепарата 153****№ 39. Детектор 1309**

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Различное кровенаполнение центральных вен (от пустых просветов до умеренного полнокровия). Полнокровие вен портальных трактов.

Отдельные портальные тракты незначительно расширены. В строме большинства портальных трактов слабая лимфоцитарная инфильтрация.

Балочно-радиальное строение печеночных долек нарушено за счет выраженной лимфоцитарной инфильтрации синусоидных капилляров.

Встречаются редкие небольшие участки жировой дистрофии гепатоцитов.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1309

Внутри границ обсчета было обнаружено 9747 одиночных треков и 19 звезд с количеством треков от 2 до 20 (размер соответствующей частицы $^{239}\text{PuO}_2$ – 14,5 нм). Одна двухтрековая звезда была локализована в междольковой артерии, две двухтрековых – в междольковой вене, остальные – в печеночных дольках.

Данные по распределению звезд по гистологическим структурам печени представлены в табл. 13.

Таблица 13

Распределение звезд по гистологическим структурам печени для детектора 1309**Distribution of stars by histological liver structures (detector 1309)**

Количество треков	Частота	Доля треков
Суммарно по всем структурам		
2	15	0,41
4	1	0,05
5	1	0,07
14	1	0,19
20	1	0,27
Печеночная долька		
2	12	0,33
4	1	0,05
5	1	0,07
14	1	0,19
20	1	0,27
Междольковая вена		
2	2	0,05
Междольковая артерия		
2	1	0,03

Результаты обработки детектора 1310**Гистологическое описание микропрепарата 153****№ 13. Детектор 1310**

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Полнокровие центральных вен. Полнокровие вен портальных трактов.

Отдельные портальные тракты незначительно расширены. В строме большинства портальных трактов выраженная лимфоцитарная инфильтрация.

Балочно-радиальное строение печеночных долек нарушено за счет выраженной лимфоцитарной инфильтрации синусоидных капилляров.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1310

Внутри границ обсчета было обнаружено 9271 одиночных треков и 10 звезд с количеством треков 2 и 4 (размер соответствующей частицы $^{239}\text{PuO}_2$ – 8,1 нм). Распределение звезд по гистологическим структурам печени не производилось.

Обработка детекторов для случая 196**Результаты обработки детектора 1404****Гистологическое описание микропрепарата 196****№ 61. Детектор 1404**

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Просветы центральных вен и вен портальных трактов преимущественно пустые.

В строме портальных трактов слабая лимфоцитарная инфильтрация.

Наблюдается дисконфлексация печеночных балок и выраженная зернистая дистрофия печени.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1404

Внутри границ обсчета было обнаружено 412 звезд. Количество треков в звездах детекторе 1404 не превышало 4 (соответствующий размер частицы $^{239}\text{PuO}_2$ – 8,1 нм). Количество одиночных треков, обнаруженных на обсчитанных фотографиях, составило 13181. В пересчете на всю площадь обсчета – 69629 одиночных треков.

Данные по распределению звезд по количеству треков представлены в табл. 14.

Таблица 14

Распределение звезд по количеству треков на детекторе 1404
Distribution of stars by number of tracks (detector 1404)

Количество треков	Частота	Доля треков
Суммарно по всем структурам		
2	393	0,93
3	16	0,06
4	3	0,01

*Результаты обработки детектора 1403**Гистологическое описание микропрепарата 196**№ 57. Детектор 1403*

Препарат печени человека, окраска гематоксилином и эозином.

Просветы центральных вен и вен портальных трактов преимущественно пустые.

В строме портальных трактов слабая лимфоцитарная инфильтрация.

Наблюдается дисконфлексация печеночных балок и выраженная зернистая дистрофия печени.

Капсула печени на срезе представлена.

Распределение треков на детекторе 1403

Внутри границ обсчета было обнаружено 439 звезд. Количество треков в звездах детекторе 1403 варьировалось от 2 до 36 (соответствующий размер наибольшей частицы $^{239}\text{PuO}_2$ – 17,8 нм). Количество одиночных треков, обнаруженных на обсчитанных фотографиях, составило 12404. В пересчете на всю площадь обсчета – 60984 одиночных треков.

Данные по распределению звезд по количеству треков представлены в табл. 15.

Таблица 15

Распределение звезд по количеству треков на детекторе 1403
Distribution of stars by number of tracks (detector 1404)

Количество треков	Частота	Доля треков
Суммарно по всем структурам		
2	401	0,85
3	29	0,09
4	5	0,02
5	3	0,02
16	1	0,02

Сравнение распределения звезд по гистологическим структурам

Данные по распределению звезд по гистологическим структурам представлены в табл. 16.

Таблица 16

Относительное микрораспределение активности частиц плутония в печени, %

Relative microdistribution of activity of plutonium particles in liver, %

№ детектора	№ случая	Гистологическая структура					
		Печеночная доля, %	Триада (портальный тракт)				Другое*
			Строма	Желчный проток	Печеночная артерия	Печеночная вена	
912	4118	94	–	3	3	–	–
1314	4118	96	–	–	–	–	4
907	153	71	–	–	1	–	27
1308	153	76	–	–	–	–	24
1309	153	92	–	–	3	5	–

Примечание: * – Другие гистологические структуры печени, не относящиеся к печеночной доле и триаде, такие как центральная вена, внепеченочный желчный проток, долевые и сегментарные артерии и вены. Для детектора 907 сюда также включены звезды, местоположение которых определить не удалось (их доля составляет 6 % от общего числа треков в звездах)

Полученные данные хорошо согласуются с аналогичными исследованиями [11], в которых использовался метод гистоавторадиографии, и рассчитывалось относительное микрораспределение активности плутония в печени по одиночным трекам. В указанных исследованиях на долю печеночной долики приходилось от 82 до 100 % активности плутония при отсутствии опухоли печени и 49 до 66 % при наличии.

Заключение

Были проведены исследования по изучению микрораспределения плутония в тканях печени работников ПО «Маяк», имевших контакт с открытыми источниками ионизирующего излучения. Размеры обнаруженных в печени частиц $^{239}\text{PuO}_2$ не превысили 20 нм.

Были проведены исследования содержания природного урана и плутония образцов печени жителей Озерска, Тобольска, Воронежа, не работавших с делящимися материалами. Плотности треков, обусловленных преимущественно или полностью делением природного урана, содержащегося в биологических тканях, на трех детекторах различались не более чем в 2 раза.

Все полученные данные по распределению диаметров частиц $^{239}\text{PuO}_2$ «привязаны» к морфологическим структурам печени. Полученные данные хорошо согласуются с аналогичными исследованиями, в которых использовался метод гистоавторадиографии.

Собранная информация в дальнейшем будет способствовать развитию научно-методической базы дозиметрии внутреннего облучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мелентьева Р.В., Бадьян В.И., Третьяков Ф.Д., Воронин П.Ф., Лызлов А.Ф. Сравнительная характеристика дисперсности радиоактивных аэрозолей на некоторых предприятиях атомной промышленности // Бюллетень Радиационной Медицины. 1976. № 4. С. 6-10.
2. Donaldson K., Aitken R., Tran L., Stone R., Duffin R., Forrest G., Alexander A. Carbon Nanotubes: A Review of Their Properties in Relation to Pulmonary Toxicology and Workplace Safety // Toxicol. Science. 2006. No. 92. P. 5-22.
3. Хохлаков В.В., Сыпко С.А. Исследования дисперсного состава альфа-излучающих аэрозолей в воздухе рабочих помещений ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 4. С. 73-80.
4. Сыпко С.А., Бобов Г.Н., Введенский В.Э., Назаренкова А.В. Исследование микрораспределения ^{239}Pu в легких работников ПО «Маяк» с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. № 4. С. 12-21.

5. Fleischer R.L., Raabe O.G. On the Mechanism of "Dissolution" in Liquids of PuO₂ by Alpha Decay // Health Physics. 1978. No. 35. P. 545–548.
6. Fleischer R.L., Raabe O.G. Fragmentation of Respirable PuO₂ Particles in Water by Alpha Decay—a Mode of "Dissolution" // Health Physics. 1977. No. 32. P. 253–257.
7. Методика выполнения измерений плутония-239, содержащегося в промышленных альфа-излучающих наночастицах. Свидетельство об аттестации методики радиационного контроля № 4390.2.П397 от 27.09.2012. ФР.1.38.2012.13346.
8. Хохряков В.В., Введенский В.Э., Сыпко С.А., Бобов Г.Н., Корпачев А.В., Хохряков И.В. Результаты исследований по разработке нейтронно-индуцированного метода измерения размеров наночастиц диоксида ²³⁹Pu // Вопросы радиационной безопасности. 2014. № 3. С. 69–81.
9. Введенский В.Э., Сыпко С.А., Бобов Г.Н. Совершенствование нейтронно-индуцированного метода измерений размеров наночастиц диоксида ²³⁹Pu // АНРИ. 2019. № 2. С. 79–90.
10. Введенский В.Э., Сыпко С. А., Бобов Г. Н. Определение диаметра наночастицы ²³⁹PuO₂ с использованием нейтронно индуцированного метода и расчет стандартной неопределенности диаметра наночастицы // АНРИ. 2019. № 4. С. 38–50.
11. Левкина Е.В. Количественная оценка микрораспределения плутония в органах основного депонирования: Дис. ... канд. биологических наук. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2012. Moscow, A.I. Burnazyana FMBC Publ.,
12. Левкина Е.В., Белосохов М.В. Количественное микрораспределение плутония в печени бывших работников ПО «МАЯК» // Медицинские и экологические эффекты ионизирующего излучения (МЕЕИР-V): Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной 10-летию создания Северского биофизического научного центра ФМБА России. 2010. С. 133.
13. Лёвкина Е.В., Белосохов М.В., Аладова Е.Е., Киселёва О.И., Романов С.А. Количественное микрораспределение плутония в печени работников радиохимического производства // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2010. Т.55, № 4. С. 31–36.
14. Меркулов Г.А. Курс патологистологической техники. Л.: Медицина, 1969. 424 с.
15. Введенский В.Э. Способ определения количества ядер радиоактивного нуклида частицы, включающий облучение частицы в поле тепловых нейтронов при воздушной среде между частицей и мишенью: Патент на изобретение RU 2733491 C2.
16. Райст П. Аэрозоли, введение в теорию. М.: Мир, 1987. 278 с.
17. Бекман И.Н. Радиационная безопасность. Электронный ресурс: <http://www.profbeckman.narod.ru/Uran.files/Glava10.pdf>. (Дата обращения 25.07.2023).

REFERENCES

1. Melentyeva R.V., Badin V.I., Tretyakov F.D., Voronin P.F., Lyzlov A.F. Comparative Characteristics of the Dispersion of Radioactive Aerosols at Some Nuclear Industry Enterprises. Byulleten Radiacionnoy Mediciny. 1976;4:6-10 (In Russ.).
2. Donaldson K., Aitken R., Tran L., Stone R., Duffin R., Forrest G., Alexander A. Carbon Nanotubes: A Review of Their Properties in Relation to Pulmonary Toxicology and Workplace Safety. Toxicol. Science. 2006;92:5-22.
3. Khokhryakov V.V., Sypko S.A. Analysis of Particle-Size Distribution of Alpha-Emitting Aerosols in Air of the Production Rooms at Mayak Pa. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Journal of Radiation Safety Issues. 2019;4:73-80 (In Russ.).
4. Sypko S.A., Bobov G.N., Vvedenskiy V.E., Nazarenkova A.V. Study of ²³⁹Pu Microdistribution in Lung of Mayak Workers Using Neutron-Activated Measurement Method. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;4:12-21 (In Russ.).
5. Fleischer R.L., Raabe O.G. On the Mechanism of "Dissolution" in Liquids of PuO₂ by Alpha Decay. Health Physics. 1978;35:545–548.
6. Fleischer R.L., Raabe O.G. Fragmentation of Respirable PuO₂ Particles in Water by Alpha Decay—a Mode of "Dissolution". Health Physics. 1977;32:253–257.
7. Methodology for Performing Measurements of Plutonium-239 Contained in Industrial Alpha-Emitting Nanoparticles. Certificate of Certification of Radiation Monitoring Methodology No. 4390.2.P397 dated September 27, 2012. FR.1.38.2012.13346 (In Russ.).
8. Khokhryakov V.V., Vvedenskiy V.E., Sypko S.A., Bobov G.N., Korpachev A.V., Khokhryakov I.V. Results of Research on the Development of a Neutron-Induced Method for Measuring the Size of ²³⁹Pu Dioxide Nanoparticles. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Journal of Radiation Safety Issues. 2014;3:69–81 (In Russ.).
9. Vvedenskiy V., Sypko S., Bobov G. Improvement of Neutron-Induced Technique for Measuring Size of ²³⁹Pu Dioxide Nanoparticles. *Apparatura i Novosti Radiatsionnykh Izmereniy* = ANRI. 2019;2:79-90 (In Russ.).
10. Vvedenskiy V., Sypko S., Bobov G. Measurement of Diameter of ²³⁹PuO₂ Nanoparticle by Neutron-Induced Method and Calculation of Standard Uncertainty of a Nanoparticle Diameter. *Apparatura i Novosti Radiatsionnykh Izmereniy* = ANRI. 2019;4:38-50 (In Russ.).
11. Levkina E.V. *Kolichestvennaya Otsenka Mikroraspredeleniya Plutoniya v Organakh Osnovnogo Deponirovaniya* = Quantitative Assessment of Plutonium Microdistribution in the Main Depository Organs. Candidate's thesis in Biological Sciences. Moscow, A.I. Burnazyana FMBC Publ., 2012 (In Russ.).
12. Levkina E.V., Belosokhov M.V. Quantitative Microdistribution of Plutonium in the Liver of Former Employees of the Mayak PA. *Kolichestvennoye mikroraspredeleniye plutoniya v pecheni byvshikh rabotnikov PO «МАЯК». Meditsinskiye i ekologicheskiye efekty ioniziruyushchego izlucheniya (MEEIR-V)* = Medical and Environmental Effects of Ionizing Radiation (MEEIR-V): Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 10th Anniversary of the Creation of the Seversk Biophysical Research Center of the FMBA of Russia. 2010. P. 133 (In Russ.).
13. Levkina E.V., Belosokhov M.V., Aladova E.E., Kiseleva O.I., Romanov S.A. Quantitative Microdistribution of Plutonium in the Liver of Radiochemical Production Workers. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2010;55;4:31-36 (In Russ.).
14. Merkulov G.A. *Kurs Patologogistologicheskoy Tekhniki* = Pathological Technique Course. Leningrad, Meditsina Publ., 1969. 424 p. (In Russ.).
15. Vvedenskiy V.E. *Sposob Opredeleniya Kolichestva Yader Radioaktivnogo Nuklida Chastitsy, Vklyuchayushchiy Oblucheniye Chastitsy v Pole Teplovykh Neytronov pri Vozdushnoy Srede Mezhdru Chastitsy i Mishenyu* = A Method for Determining the Number of Nuclei of a Radioactive Nuclide of a Particle, Including Irradiating the Particle in a Field Of Thermal Neutrons in an Air Environment between the Particle and the Target: Patent for Invention RU 2733491 C2 (In Russ.).
16. Rayst P. *Aerozoli, Vvedeniye v Teoriyu* = Aerosols, Introduction to Theory. Moscow Publ., 1987. 278 p. (In Russ.).
17. Bekman I.N. Radiation Safety. URL: <http://www.profbeckman.narod.ru/Uran.files/Glava10.pdf>. (Date of Access: 25.07.2023) (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.10.2023. Принята к публикации: 27.11.2023.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.10.2023. Accepted for publication: 27.11.2023.