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

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

Южно-Уральский институт биофизики, Челябинская область, Озерск, E-mail: Sypko@subi.su

ΡΕΦΕΡΑΤ

С использованием нейтронно-индуцированного метода измерения проведена количественная оценка микрораспределения плутония в легких у двух бывших работников ПО «Маяк», контактировавших с соединениями плутония, и двух человек, никогда не работавших на ПО «Маяк». Произведено сравнение с результатами аналогичного исследования, проведенного в ЮУрИБФ менее чувствительным авторадиографическим методом измерения. Настоящее исследование показало, что большая часть активности плутония содержится в отделах интерстициального склероза.

Ключевые слова: плутоний-239, нейтронно-индуцированный метод измерения, трековые детекторы, наночастицы, микрораспределение, анатомические отделы легкого, ПО «МАЯК», персонал

Для цитирования: Сыпко С.А., Бобов Г.Н., Введенский В.Э., Назаренкова А.В. Исследование микрораспределения ²³⁹Pu в легких работников ПО «Маяк» с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(4):12-21.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-12-21

Введение

Микродозиметрия описывает картину распределения энергии ионизирующего излучения между микромишенями, например, отдельными клетками, чувствительными объемами клеток или даже участками биомолекул. Из-за дискретного характера передачи энергии ионизирующими частицами в некоторых мишенях может выделяться очень большая энергия, в то время как другие микромишени вообще могут не претерпеть ни одного попадания [1].

Ингаляция атомных аэрозолей приводит к накоплению долгоживущих α-излучающих актинидов в органах основного депонирования, представляющих значительную опасность для здоровья персонала предприятий ядерно-топливного цикла. В результате α-распада актинидов возникают ядра отдачи, взаимодействие которых с атомами кристаллической решетки твердой фазы радиоактивного вещества приводит к образованию свободных наночастиц или кластеров [2]. Характерный размер указанных фрагментов колеблется в пределах от единиц до десятков нанометров.

Собственные исследования ЮУрИБФ дисперсного состава промышленных а-излучающих аэрозолей воздуха рабочих помещений плутониевого и радиохимического заводов ПО «Маяк» показали наличие мелкодисперсной фракции радиоактивных аэрозолей [3]. Исследования статистических характеристик распределения размеров наночастиц диоксида плутония в воздухе отделения оксалатного осаждения радиохимического завода ПО «Маяк» показали, что в суммарную удельную активность промышленных α-излучающих аэрозолей наночастицы вносят значимый вклад [4]. Принимая во внимание различия в распределении по отделам дыхательного тракта частиц микронных и нанометровых размеров [5], следует учитывать вклад последних в общую активность аэрозолей для корректных дозовых оценок, что необходимо для корректной оценки риска возникновения радиационно-индуцированных стохастических и детерминированных эффектов в респираторном тракте человека, а также

для разработки стандартов, регламентирующих внутреннее облучение от инкорпорированного плутония. В настоящее время в эпидемиологических исследованиях оценивается доза, усредненная на всю массу легких. Эта доза не подходит для случаев со значительной неравномерностью облучения органа, характерной для инкорпорированного плутония в легких. Совершенствование модели дыхательного тракта при ингаляции ²³⁹Pu является актуальной научно-практической задачей.

Материал и методы

Для детектирования наночастиц ²³⁹Pu использовался нейтронно-индуцированный метод. Описание метода приведено в работах [6, 7], но в этих работах отсутствует подробное описание метода выполнения измерений и его метрологические характеристики. В ЮУрИБФ данный метод был усовершенствован и оптимизирован [8–11].

Для исследований были использованы аутопсийные парафинированные образцы тканей легких работников плутониевого производства ПО «Маяк»: случай 4118 (содержание плутония в легких — 12,5 Бк) и случай 153 (содержание плутония в легких — 2,4 Бк). И два фоновых образца от персон, никогда не работавших на ПО «Маяк»: случаи 762 и 4097.

От каждого образца в виде парафинированного кусочка ткани легкого отбиралось два последовательных среза толщиной 5 мкм (далее образца). Первый образец исследовали методом нейтронно-индуцированного трекового анализа с дополнительной фазой — приготовлением гистологического микропрепарата, из второго — только приготавливали гистологический микропрепарат. Второй образец являлся дополнительным на случай плохой окраски или потери ткани первого образца. Первый образец тканей легкого помещали на поверхность трекового детектора из сверхчистого синтетического кварца в форме диска диаметром 25 мм. Сборку из нескольких детекторов подвергали облучению потоком тепловых нейтронов. Суммарный флюенс составил 4×10¹⁷ нейтрон/см². В результате деления ядер ²³⁹Pu возникают осколки, которые, взаимодействуя с материалом трекового детектора, оставляют в нем латентные треки деления.

После облучения и выдержки, необходимой для распада короткоживущих продуктов деления ²³⁹Ри, на детекторы вне области срезов наносили меткицарапины, после чего производили микрофотосъемку среза с получением панорамного изображения. Затем окрашивали срезы гематоксилином и эозином, заключали окрашенный срез под покровное стекло и повторно производили его микрофотосъемку с получением панорамного изображения. На следующем этапе срез ткани с детектора удаляли, детектор подвергали травлению в плавиковой кислоте для визуализации латентных треков и повторно производили его микрофотосъемку с получением панорамного изображения. В результате получили три панорамных изображения одного и того же образца: 1) панорама детектора с неокрашенной тканью; 2) панорама детектора с окрашенной тканью; 3) панорама детектора с визуализированными треками. Затем подсчитывали одиночные треки и звезды (звезда — группа треков, исходящих из одного центра [9]). Звезды с большой плотностью треков подсчитывали в соответствии с методом подсчета треков в сложной звезде [11]. Затем на панорамном изображении детектора с визуализированными треками отмечались звезды. Полученное изображение совмещалось с панорамными изображениями детектора с неокрашенной тканью и детектора с окрашенной тканью. Совмещение производили по меткам-царапинам, нанесенным ранее. Подсчет треков проводился вручную. Определяли локализацию каждой частицы в соответствии с классификацией анатомических отделов легкого [12]. Для фоновых случаев производился обсчет без соотнесения звезд с

анатомическими отделами легкого. Гистологическая характеристика анатомических отделов легкого приведена в табл. 1.

После определения локализации частиц для всех фрагментов совмещенного изображения были получены статистические данные двух видов. Первые данные отражали распределение частиц по количеству треков. Вторые данные были получены после группировки данных по анатомическим отделам и отражали распределение частиц по количеству треков в каждом анатомическом отделе легких.

Гистологическое описание микропрепарата 153 N^o 4. Детектор 1206

На большей площади среза лёгочная ткань безвоздушная: просветы альвеол заполнены воспалительным экссудатом, наблюдается очаг альвеолярного отека. Межальвеолярные перегородки утолщены, разорваны. На всем поле зрения в просветах альвеол наблюдается большое количество гемосидерофагов. В отдельных альвеолах наблюдаются скопления бактерий. Бронхи в срезах не прослеживаются.

Наблюдается застойное полнокровие капилляров межальвеолярных перегородок и сосудов интерстиция. Атеросклероз крупных и мелких кровеносных сосудов. Периваскулярный склероз, небольшой периваскулярный антракоз.

На данном микропрепарате выявлены 3 анатомических отдела легкого [12]: интерстиций паренхимы, просвет проводящих воздухоносных путей паренхимы, интерстициальный склероз респираторного отдела.

На рис. 1 представлены совмещенные изображения, полученные для данного среза ткани.

Таблица 1

Гистологическая характеристика анатомических отделов легкого [12] Histological characteristics of the anatomical parts of the lung [12]

N⁰	Анатомич. отдел	Гистологическая характеристика
1	Плевра	Включает относящуюся к ней соединительную ткань и лимфатические сосуды
2	Бронховаскулярная соедини- тельная ткань бронхов	Включает стенки бронхов, перибронхиальную и периваскулярную соединительную ткань и от- носящиеся к ней стенки сосудов, а также просветы лимфатических сосудов, но не кровеносных сосудов (частицы в просветах кровеносных сосудов не учитывают) и рыхлую соединительную ткань легочных вен, артерий и междольковой перегородки (вокруг бронхов)
3	Соединительная ткань про- водящих бронхиол	Включает стенки проводящих (не респираторных) бронхиол и периваскулярную соединительную ткань около бронхиол
4	Интерстиций паренхимы	Включает соединительную ткань респираторных бронхиол (стенки респираторных бронхиол, периваскулярную соединительную ткань около бронхиол и отно- сящиеся к ней стенки сосудов). Включает междольковую, межсегментарную и периваскулярную со- единительную ткань. Включает межальвеолярные перегородки и перегородки альвеолярных ходов
5	Лимфоидная ткань	Включает всю организованную лимфоидную ткань, т.е. внутрилегочные лимфатические узлы
6	Просвет проводящих возду- хоносных путей и паренхимы	Включает просветы проводящих воздухоносных путей, респираторных бронхиол, альвеолярных ходов и альвеол
7	Интерстициальный склероз респираторного отдела	Склерозированная соединительная ткань, местами гиалинизированная, с искажением строения паренхимы в такой мере, что трудно распознать лежащую в основе структуру. Этот фиброз может быть септальным, периваскулярным или включать респираторные бронхиолы
8	Интерстициальный склероз бронхососудистого дерева	Склерозированная соединительная ткань, местами гиалинизированная, не связанная с паренхи- мой легкого. Этот склероз представлен очаговыми повреждениями, находящимися в рыхлой со- единительной ткани и относящимися к ближайшему бронхососудистому дереву. Их локализация и внешний вид наводят на мысль, что зачастую это склерозированные внутрилегочные лимфати- ческие узлы

Радиационная медицина



Рис. 1. а) совмещенное изображение детектора с неокрашенной тканью и детектора с визуализированными треками деления; б) совмещенное изображение детектора с окрашенной тканью и детектора с визуализированными треками деления

Fig. 1. a) Aligned image of the detector with unstained tissue and detector with visualized fission tracks; 6) Aligned image of the detector with stained tissue and visualized fission tracks

Распределение треков на детекторе 1206

Распределение треков на детекторе было относительно равномерным. Повышенная плотность треков была отмечена в районе стенок кровеносных сосудов. Отсутствовали участки повышенной плотности расположения звезд. Причиной такого распределения одиночных треков и звезд, очевидно, явилась гистологическая структура среза — бо́льшая часть среза представляла собой «кашу» из слущенных клеток. Ниже представлен участок ткани легкого с кровеносным сосудом со склерозированной стенкой (рис. 2а). На соответствующем участке детектора с визуализированными треками (рис. 26) видно увеличение плотности треков на участке, соответствующем стенке кровеносного сосуда (2). Плотность треков на участке с кровью (3) немного меньше, чем на участке со слущенными клетками (1).

Гистологическое описание микропрепарата 153 Nº 2. Детектор 1208

Участки альвеолярной эмфиземы с деформацией межальвеолярных перегородок чередуются с участками безвоздушной легочной ткани: альвеолы склерозированы, заполнены слущенным эпителием, лейкоцитами. На всем поле зрения в просветах альвеол наблюдается большое количество гемосидерофагов. Диффузный склероз легочной паренхимы.

Наблюдается застойное полнокровие капилляров межальвеолярных перегородок и сосудов интерстиция. Атеросклероз крупных и мелких кровеносных сосудов. Периваскулярный склероз.

В срезах представлены бронхи среднего калибра с субтотальной и тотальной десквамацией мерцательного эпителия. Во всей строме стенки наблюдается лимфоцитарная инфильтрация, эпителий концевых отделов желез частично слущен. Перибронхиальный склероз. Мелкие бронхи без признаков склероза, с тотальной десквамацией мерцательного эпителия, просветы заполнены гнойным экссудатом. Периваскулярный и перибронхиальный антракоз.

На данном микропрепарате выявлены 4 анатомических отдела легкого [12]: интерстиций паренхимы, просвет проводящих воздухоносных путей паренхимы, бронховаскулярная соединительная ткань бронхов, интерстициальный склероз респираторного отдела.

На рис. 3 представлены совмещенные изображения, полученные для данного среза ткани.



Рис. 2. а) участок окрашенной ткани легкого с кровеносным сосудом, б) соответствующий участок детектора с визуализированными треками. 1— участки слущенных клеток, 2— стенки кровеносного сосуда, 3— кровь в сосуде. Точками обозначены звезды

Fig. 2. a) a section of stained lung tissue with a blood vessel, 6) the corresponding section of the detector with visualized tracks. 1 — areas with exfoliated cells, 2 — blood vessel walls, 3 — blood in the vessel. Dots represent stars



Рис. 3. а) совмещенное изображение детектора с неокрашенной тканью и детектора с визуализированными треками деления; б) совмещенное изображение детектора с окрашенной тканью и детектора с визуализированными треками деления

Fig. 3. a) Aligned image of the detector with unstained tissue and detector with visualized fission tracks; 6) Aligned image of the detector with stained tissue and visualized fission tracks

Распределение треков на детекторе 1208

Распределение треков на детекторе было неравномерным. На некоторых участках отмечалось визуальное изменение плотности распределения треков, совпадавшее с определенными тканевыми структурами. Увеличенная плотность треков отмечалась на участках детектора, соответствовавших стенкам кровеносного сосуда, стенке бронха, антракозу и хрящам. Ниже представлен участок среза (рис. 4а). На соответствующем участке детектора с визуализированными треками (рис. 4б) видно увеличение плотности треков на участках, соответствующих указанным выше структурам. На рис. 4 также видно, что плотность звезд в антракозе выше, чем в прилегающей к нему ткани.

Антракоз был обнаружен в интерстициальном склерозе респираторного отдела (ИСРО), интерстициальном склерозе бронхососудистого дерева (ИСБД) и в участках, определить анатомический отдел которых было невозможно. Звезды располагались преимущественно вне антракоза. Соотношение количества звезд и количества треков звезд в антракозе и вне его представлены в табл. 2.

Гистологическое описание микропрепарата 4118 Nº 2. Детектор 1102

Ткань легкого с выраженной эмфиземой, наблюдается альвеолярный отек, диффузный пневмосклероз. Межальвеолярные перегородки утолщены, обнаруживаются участки с альвеолами, заполненными слущенным эпителием, лейкоцитами и макрофагами. Застойное полнокровие капилляров межальвеолярных перегородок и сосудов интерстиция. Периваскулярный склероз. Атеросклероз крупных и мелких кровеносных сосудов. Периваскулярный антракоз.

В срезе представлены бронхи среднего калибра. Бронхи с тотальной десквамацией мерцательного эпителия, просветы бронхов заполнены массой слущенного эпителия. Стенки бронхов склерозированы,



Рис. 4. a) участок стенки бронха; б) соответствующий участок детектора с визуализированными треками. 1 просвет бронха, 2— хрящи, 3— антракоз, 4— стенка кровеносного сосуда. Точками обозначены звезды Fig. 4. (a) a section of the bronchial wall; 6) the corresponding section of the detector with visualized tracks. 1— bronchial lumen, 2— cartilage, 3— anthracosis, 4— blood vessel wall. Dots represent stars

Таблица 2

ИСРО ИСБД Не определяется Без антракоза Антракоз Без антракоза Антракоз Без антракоза Антракоз Количество звезд 189 39 79 5 354 26 Доля 0,83 0,17 0,94 0,06 0,93 0,07 Количество треков 1316 710 8730 1177 248 486 0,65 0,35 0.88 0,12 Доля 0,34 0,66

Соотношение количества звезд и треков в звездах для антракоза The ratio of the number of stars and tracks in stars for anthracosis

с лимфоцитарной инфильтрацией. Во всей стенке бронха наблюдаются очаги жировой дистрофии, дистрофия эпителия концевых отделов желез и склероз средних кровеносных сосудов. Небольшой антракоз перибронхиальной ткани.

В срезе наблюдаются небольшие лимфатические узлы с выраженным антракозом, участками склероза и застойным полнокровием кровеносных сосудов.

На данном микропрепарате выявлены три анатомических отдела легкого [12]: интерстициальный склероз респираторного отдела, интерстициальный склероз бронхососудистого дерева, лимфоидная ткань.

На рис. 5 представлены совмещенные изображения, полученные для данного среза ткани. Видны потери ткани, произошедшие при окрашивании среза.

Распределение треков на детекторе 1102

Распределение треков на детекторе было неравномерным. Отмечалось визуальное изменение плотности распределения треков, совпадавшее с определенными тканевыми структурами. Распределение звезд также было неравномерным. Участки с антракозом характеризовались повышенной плотностью звезд. Ниже представлен участок ткани легкого с лимфоидной тканью (рис. 6а). На соответствующем участке детектора с визуализированными треками (рис. 6б) видно увеличение плотности единичных треков и звезд в антракозе.

Антракоз был обнаружен в трех анатомических отделах легкого: лимфоидной ткани, ИСРО и ИСБД. Для первых двух отделов звезды в антракозе несколько





Рис. 6. а) участок окрашенной ткани легкого, содержащий лимфоидную ткань с выраженным антракозом (темные вкрапления),
б) соответствующий участок детектора с визуализированными треками. Точками обозначены звезды
Fig. 6. (a) a section of stained lung tissue containing lymphoid tissue with pronounced anthracosis (dark inclusions),
6) the corresponding section of the detector with visualized tracks. Dots represent stars

Таблица З

Соотношение количества звезд и треков в звездах для антракоза The ratio of the number of stars and tracks in stars for anthracosis

	Лимфоид	ная ткань	ИС	РО	ИСБД		
	Без антракоза	Антракоз	Без антракоза	Антракоз	Без антракоза	Антракоз	
Количество звезд	23	28	145	172	62	29	
Доля	0,45	0,55	0,46	0,54	0,68	0,32	
Количество треков в звездах	1722	1779	12020	19434	6692	1827	
Доля	0,49	0,51	0,38	0,62	0,79	0,21	

преобладали. Соотношение количества звезд и количества треков звезд в антракозе и вне его представлены в табл. 3.

Гистологическое описание микропрепарата 4118 № 14. Детектор 914

На срезе представлен участок стенки трахеи. Большая часть среза занята хрящом, обнаруживается дистрофия эпителия концевых отделов желез, липоматоз, очаги лейкоцитарной инфильтрации.

Наблюдается застойное полнокровие и склероз мелких и средних кровеносных сосудов.

На рис. 7 представлены совмещенные изображения, полученные для данного среза ткани. Видны потери ткани, произошедшие при окрашивании среза. На рис. 7 (выше и ниже верхнего среза трахеи) видны следы клея, использованного для фиксации детекторов между собой. На рис. 7а просматривается срез ткани легкого, находившегося на детекторе 913 под детектором 914. На рис. 76 видны произошедшие при окрашивании потери ткани.

Распределение треков на детекторе 914

Распределение треков на детекторе было неравномерным. Наибольшая плотность треков была отмечена на участках, соответствовавших кровеносным сосудам. Схожая картина наблюдалась на аналогичных участках детекторов с облученными легкими. На рис. 8 можно увидеть различия в плотности треков между гистологическими структурами трахеи. Из рис. 8 вид-



Рис. 7. а) совмещенное изображение детектора с неокрашенной тканью и детектора с визуализированными треками деления; б) совмещенное изображение детектора с окрашенной тканью и детектора с визуализированными треками деления

Fig. 7. a) aligned image of the detector with unstained tissue and detector with visualized fission tracks; 6) aligned image of the detector with stained tissue and visualized fission tracks



Рис. 8. a) участок окрашенной ткани трахеи; б) соответствующий участок детектора с визуализированными треками. 1 — железы, 2 — соединительная ткань, 3 — хрящ, 4 — просвет между хрящом и надхрящницей, 5 — просвет трахеи Fig. 8. (a) a section of stained tracheal tissue; 6) the corresponding section of the detector with visualized tracks. 1 — secretory tissue, 2 connective tissue, 3 — cartilage, 4 — the lumen between the cartilage and the supra-cartilage, 5 — the lumen of the trachea

но, что плотность треков на участках, соответствовавших соединительной ткани 2, ниже, чем на участках, соответствовавших железам 1. Распределение треков в хряще 3 отличается неравномерностью. Так, на участках, соответствовавших центральной области хряща, треков почти нет — они сосредоточены на участках, соответствовавших наружной области хряща. При этом плотность треков на участке, соответствовавшем поверхности хряща, обращенной к просвету трахеи 5, выше, чем на участке, соответствовавшем его противоположной стороне. Распределение треков в хряще связано, очевидно, с особенностями формирования хрящевой ткани трахеи. Распределение звезд по гистологическим структурам трахеи представлено в табл. 4.

Обработка фоновых детекторов

Гистологическое описание микропрепарата 4097 N^o 5. Детектор 1106

На большей площади среза лёгочная ткань безвоздушная: межальвеолярные перегородки утолщены, склерозированы, местами разорваны. Лейкоцитарная инфильтрация межальвеолярных перегородок. На всем поле зрения в просветах альвеол наблюдается большое количество гемосидерофагов и макрофагов. Диффузный склероз легочной паренхимы.

Бронхи в срезах не прослеживаются.

Наблюдается застойное полнокровие капилляров межальвеолярных перегородок и сосудов интерстиция. Атеросклероз крупных и мелких кровеносных сосудов. Периваскулярный склероз, периваскулярный антракоз.

Гистологическое описание микропрепарата 762 № 2. Детектор 1112

На большей площади среза лёгочная ткань безвоздушная: наблюдается очаги альвеолярного отека, диффузного пневмосклероза, кровоизлияний. Межальвеолярные перегородки местами утолщены, разорваны.

В срезе представлен бронх среднего калибра с тотальной десквамацией мерцательного эпителия. Во Таблица 4

Распределение звезд по гистологическим структурам трахеи (детектор 914) Distribution of stars by histological structures of the trachea

Количество треков	Частота	Доля треков
Жел	езы	0,16
2	2	
5	1	
Жи	0,38	
2	3	
15	1	
Склероз	0,04	
2	1	
Соединител	ьная ткань	0,29
2	8	
Хря	0,14	
2	1	
6	1	

всей строме стенки наблюдается лимфоцитарная инфильтрация, дистрофия эпителия концевых отделов желез, периваскулярный антракоз мелких кровеносных сосудов, склероз и полнокровие сосудов.

В срезе наблюдаются лимфоузлы с выраженным антракозом, полнокровием кровеносных сосудов и очагами кровоизлияний.

Наблюдается застойное полнокровие капилляров межальвеолярных перегородок и сосудов интерстиция. Атеросклероз крупных и мелких кровеносных сосудов. Периваскулярный склероз, периваскулярный антракоз, периваскулярная лейкоцитарная инфильтрация.

Результаты и обсуждение

В табл. 5 представлены сводные данные о детекторах. В табл. 6 представлены процентные соотношения

Таблица 5

Сводные данные о детекторах Summary of detectors

Детектор	Блок	Информация о ткани	Площадь среза, мм ²	Количество треков	Доля единичных треков	Доля треков в звездах	Плотность треков, мм ⁻²	Плотность единичных треков, мм ⁻²				
1102	4118-2	Долевой бронх (средняя доля)	207	179239	0,75	0,25	866	651				
1101	4118-3	Бронхи (нижняя доля)	164	106227	0,86	0,14	647	556				
1213	4118-5	Бронхиолы (верхняя доля)	142	265500	0,32	0,68	1870	601				
1212	4118-6	Ткань легкого (средняя доля)	250	419102	0,31	0,69	1675	513				
914	4118-14	Трахея	91	22753	0,998	0,002	250	250				
1209	153-1	Предположительно, долевой бронх (средняя доля)	85	40301	0,98	0,02	472	463				
1207	153-3	Долевой бронх	162	103128	0,92	0,08	636	587				
1206	153-4	Ткань легкого	120	83417	0,97	0,03	696	677				
1208	153-2	Долевой бронх	212	154581	0,92	0,08	729	667				
1106	4097-5 (фон)	Ткань легкого (нижняя доля)	100	24958	0,99	0,01	250	247				
1112	762-2 (фон)	Ткань легкого	132	10827	0,94	0,06	82	77				

Таблица 6

Распределение треков в звездах по анатомическим отделам легкого, % Distribution of tracks in stars by anatomical parts of the lung, %

		Анатомический отдел легкого									
Детектор	Плевра	Бронховаску- лярная соеди- нительная ткань бронхов	Соедини- тельная ткань проводящих бронхиол	Интер- стиций паренхимы	Лимфоидная ткань	Просвет проводя- щих воздухо- носных путей и паренхимы	ИСРО	ИСБД	Не опре- деляется		
1101	_	_	_	21,28	_	0,22	37,20	41,24	0,06		
1102	_	—	_	—	8,05	_	72,35	19,6	_		
1213	_	—	_	57,76	_	18,22	11,55	—	12,47		
1212	1,02	—	_	44,51		10,38	28,28	10,33	5,48		
1209	_	—	_	—		_	96,65	—	3,35		
1207	_	—	_	2,53		0,20	53,43	43,84	—		
1206	_	—	_	0		0	0	—	100		
1208	_		_	_		0,02	15,99	5,79	78,20		

Таблица 7

Oсновные сведения о регистранте 080 [12] Basic information about the registrant 080 [12]

Basic information about the registrant 080	12	4			
--	----	---	--	--	--

Код	Пол	Возраст, лет на момент смерти	Период кон- такта с Ри на ПО «Маяк»	История курения, пачек/день	Содержание Ри в организ- ме, Бк	Содержание Ри в легких, Бк	Доза внешнего облучения, сГр	Патолого- анатомический диагноз
080	М	56	1951-59	2/3	740	270	1,7	ИБС, ОКН

Таблица 8

Распределение плутония по различным анатомическим отделам легкого для регистранта 080, % [12] Distribution of plutonium in various anatomical parts of the lung for the registrant 080, % [12]

		Анатомический отдел легкого								
Случай	Плевра	Бронхо- васкулярный интерстиций	Проводящие бронхиолы	Паренхима	Лимфоид- ная ткань	Просветы воздухонос- ных путей	ИСРО	ИСБД	Не опреде- ляется	
080	4,2	3,9	10,9	21,0	0,5	5,2	49,9	4,4	_	

распределения треков в звездах по анатомическим отделам легкого.

В работе [12] приведено распределение плутония по различным анатомическим отделам легкого работника плутониевого завода ПО «Маяк» (регистрант 080 табл. 7).

Работник контактировал с труднорастворимыми оксидом и металлическим плутонием. С момента прекращения ингаляционного поступления до смерти прошло около 20 лет. В [12] были проанализированы авторадиограммы с 90-дневной экспозицией. Частицы на всех срезах на стеклах были посчитаны и распределены по восьми различным анатомическим отделам легкого. Распределение плутония по различным анатомическим отделам представлено в табл. 8.

Сравнение распределения плутония по различным анатомическим отделам легкого от общей активности в легких для случая 080 [12] и для среднего по случаям 4181 и 153 приведено на рис. 9. Стоит отметить, что активность в легких у регистранта 080 более чем в 20 раз больше, чем у регистранта 4118, и более чем в 112 раз больше, чем у регистранта 153.

В настоящем исследовании бронховаскулярный интерстиций и проводящие бронхиолы не попали в

исследование. У регистранта 153 достаточно большой процент активности не отнесен к анатомическим отделам. У регистранта 4118 активность содержится в интерстиции паренхимы легкого и лимфоидной ткани. Настоящее исследование, как и исследование [12], показало, что бо́льшая активность содержится в отделах интерстициального склероза. Также видны различия между результатами этих исследований. В отличие от [12], в настоящем исследовании не найдено значимой активности в плевре.

Заключение

Проведена количественная оценка микрораспределения плутония в аутопсийных образцах легких у двух бывших работников ПО «Маяк», контактировавших с соединениями плутония, у двух человек, не работавших на ПО «Маяк». Оценена доля содержания плутония в различных анатомических отделах легкого. Данные в табл. 5, 6 указывают на неравномерность распределения наночастиц диоксида плутония в легких. Плотность единичных треков для фоновых срезов легкого заметно ниже (77–247 мм⁻²), чем плотность единичных треков срезов легкого профессиональных работников (463–677 мм⁻²).



Рис. 9. Распределение плутония по различным анатомическим отделам легкого от общей активности в легких для случая 080 [12] и для среднего по случаям 4181 и 153

Fig. 9. Distribution of plutonium in various anatomical parts of the lung from the total activity in the lungs for case 080 [12] and for the average for cases 4181 and 153

Произведено сравнение с результатами аналогичного исследования [12]. Настоящее исследование, как и исследование [12], показало, что бо́льшая часть активности ²³⁹Pu содержится в отделах интерстициального склероза. В [12] использовался менее чувствительный метод, поэтому активность в легких у регистранта 080 из исследования [12] более чем в 20 раз больше, чем у регистранта 4118, и более чем в 112 раз больше, чем у регистранта 153. Вполне возможно, что именно это повлияло на получение несколько различных результатов (рис. 9).

Необходимы дальнейшие исследования микрораспределения плутония в легких для реконструкции доз внутреннего облучения легких от инкорпорированного плутония.

Radiation Medicine

Medical Radiology and Radiation Safety. 2020. Vol. 65. No. 4. P. 12-21

Study of ²³⁹Pu Microdistribution in Lung of Mayak Workers Using Neutron-Activated Measurement Method

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

Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Russia E-mail: Sypko@subi.su

ABSTRACT

This study quantitatively compares ²³⁹Pu microdistribution in lung of two deceased former Mayak PA workers who were exposed to ²³⁹Pu by inhalation and two deceased subject who had been never employed at Mayak PA. 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 ²³⁹Pu activity in lung is concentrated in areas of interstitial sclerosis.

Key words: Plutonium-239, neutron-activation measurement method, track detectors, nanoparticles, microdistribution, Anatomical regions of the lung, Mayak PA, personnel

For citation: Sypko SA, Bobov GN, Vvedensky VE, Nazarenkova AV. Study of ²³⁹Pu Microdistribution in Lung of Mayak Workers Using Neutron-Activated Measurement Method. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(4):12-21 (In Russ.). DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-12-21

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Рябухин ЮС. Низкие уровни ионизирующего облучения и здоровье: Системный подход (Аналитический обзор). Медицинская радиология. 2000;(4):5-45. [Ryabukhin YuS. Low levels of ionizing radiation and health: a Systematic approach (Analytical review). Medical Radiology. 2000;(4):5-45. (In Russ.)].
- Хохряков ВВ, Некрасов КА. О механизме образования наночастиц диоксида плутония. Вопросы радиационной без-

опасности. 2015(1):55-68. [Khokhryakov VV, Nekrasov KA. On the mechanism of formation of plutonium dioxide nanoparticles. Radiation Safety Issues. 2015(1):55-68. (In Russ.)].

 Хохряков ВВ, Сыпко СА. Исследования дисперсного состава альфа-излучающих аэрозолей в воздухе рабочих помещений ПО «Маяк». Вопросы радиационной безопасности. 2019(4):73-80. [Khokhryakov VV, Sypko CA. Studies of the dispersed composition of alpha-emitting aerosols in the air of the working premises of the PA Mayak. Radiation Safety Issues. 2019(4):73-80. (In Russ.)].

- 4. Сыпко СА, Введенский ВЭ, Бобов ГН. Исследования статистических характеристик распределения размеров наночастиц ²³⁹PuO₂ в воздухе отделения оксалатного осаждения завода регенерации топлива ПО «Маяк» с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения. Вопросы радиационной безопасности. 2019(2):71-9. [Sypko SA, Vvedensky VE, Bobov GN. Studies of statistical characteristics of the size distribution of ²³⁹PuO₂ nanoparticles in the air of the oxalate deposition Department of the PA Mayak fuel recovery plant using a neutron-induced measurement method. Radiation Safety Issues. 2019(2):71-9. (In Russ.)].
- 5. Sturm R. Radioactivity and lung cancer-mathematical models of radionuclide deposition in the human lungs. J Thorac Dis. 2011;3:231-43. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2011.04.01.
- Fleischer RL, Raabe OG. On the Mechanism of "Dissolution" in Liquids of PuO₂ by Alpha Decay. Health Phys. October 1978;35:545-8.
- Fleischer RL, Raabe OG. Fragmentation of respirable PuO₂ particles in Water by Alpha Decay-a Mode of "Dissolution". Health Phys. April 1977;32:253-7.
- Методика выполнения измерений плутония-239, содержащегося в промышленных альфа-излучающих наночастицах. Свидетельство об аттестации методики радиационного контроля N° 4390.2.П397 от 27.09.2012. ФР.1.38.2012.13346. [Method for performing measurements of plutonium-239 contained in industrial alpha-emitting nanoparticles. Certificate of certification of radiation control methods N° 4390.2.P397 27.09.2012. FR.1.38.2012.13346. (In Russ.)].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

- 9. Хохряков ВВ, Введенский ВЭ, Сыпко СА, Бобов ГН, Корпачев АВ, Хохряков ИВ. Результаты исследований по разработке нейтронно-индуцированного метода измерения размеров наночастиц диоксида ²³⁹Pu. Вопросы радиационной безопасности. 2014;(3):69-81. [Khokhryakov VV, Vvedensky VE, Sypko SA, Bobov GN, Korpachev AB, Khokhryakov IV. Results of research on the development of a neutron-induced method for measuring the size of ²³⁹Pu dioxide nanoparticles. Radiation Safety Issues. 2014;(3):69-81. (In Russ.)].
- 10. Введенский ВЭ, Сыпко СА, Бобов ГН. Совершенствование нейтронно-индуцированного метода измерений размеров наночастиц диоксида ²³⁹Pu. АНРИ. 2019;(2):79-90. [Vvedensky VE, Sypko SA, Bobov GN. Improvement of the neutron-induced method for measuring the size of ²³⁹Pu dioxide nanoparticles. ANRI. 2019;(2):79-90. (In Russ.)].
- 11. Введенский ВЭ, Сыпко СА, Бобов ГН. Определение диаметра наночастицы ²³⁹PuO₂ с использованием нейтронноиндуцированного метода и расчет стандартной неопределенности диаметра наночастицы. АНРИ. 2019;(4):38-50. [Vvedensky VE, Sypko SA, Bobov GN. Determination of the diameter of the ²³⁹PuO₂ nanoparticle using the neutroninduced method and calculation of the standard uncertainty of the nanoparticle diameter. ANRI. 2019;(4):38-50. [In Russ.]].
- 12. Романов СА. Микрораспределение плутония в легких как основа коррекции дозиметрических моделей. М. Дисс. канд. биол. наук. 2003. 113 с. [Romanov SA. Microdistribution of plutonium in lungs as a basis for correction of dosimetric models. Biol. Sci. Moscow. 2003. 113 p. (In Russ.)].

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 27.08.2020. Принята к публикации: 31.08.2020. Article received: 27.08.2020. Accepted for publication: 31.08.2020.