

А.В. Ефимов, С.А. Сыпко, А.Б. Соколова, Е.Е. Аладова

## ОБЗОР СЛУЧАЕВ ПОСТУПЛЕНИЯ АКТИНИДОВ ЧЕРЕЗ ПОВРЕЖДЕННУЮ КОЖУ У ЛИЦ ИЗ ПЕРСОНАЛА ФГУП «ПО «МАЯК» за ПЕРИОД с 2010 по 2024 гг.

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики ФМБА России, Озёрск

Контактное лицо: Елена Евгеньевна Аладова, e-mail: aladova@subi.su

### РЕФЕРАТ

**Цель:** Анализ результатов специального дозиметрического контроля случаев раневого поступления актинидов в организм лиц из персонала основных производств ПО «Маяк», произошедших за последние 15 лет.

**Материал и методы:** Дозиметрия актинидов как при текущем индивидуальном дозиметрическом контроле, так и в случаях острого поступления радионуклидов основана на результатах определения содержания радиоактивных веществ в организме двумя методами: прямым методом спектрометрии излучения человека и косвенным методом, основанным на интерпретации результатов измерений активности нуклидов в экскретах.

**Результаты:** За период с 2010 по 2024 гг. выявлено 68 случаев острого поступления актинидов в организм лиц из персонала ФГУП «ПО «Маяк» – как ингаляционного (30% случаев), так и через поврежденные кожные покровы (70% случаев), причем количество случаев поступления через поврежденную кожу преобладает над ингаляционным путем поступления актинидов. При остром ингаляционном поступлении в 25% случаев величина ожидаемой эффективной дозы (ОЭД) превысила предел в 20 мЗв, а при раневом поступлении 11% случаев привели к повышенному облучению, при этом для трех случаев повышенного облучения величина ОЭД превысила 200 мЗв. От времени обнаружения повреждений кожи напрямую зависит эффективность оказания специализированной медицинской помощи и эффективность лечения.

**Заключение:** При формировании доз внутреннего облучения персонала поступление актинидов через поврежденную кожу является не менее значимым по сравнению с ингаляционным. Оптимальная система контроля включает не только оперативное обследование работников в первые часы после повреждения кожи, но и обеспечивает обнаружение латентных ранений, загрязненных радионуклидами. Раннее выявление раневых случаев и получение требуемой информации о дозах внутреннего облучения профессиональных работников чрезвычайно важно для улучшения медицинского реагирования и максимально возможной минимизации последствий радиационного воздействия.

**Ключевые слова:** внутреннее облучение, поступление актинидов, поврежденные кожные покровы, индивидуальный дозиметрический контроль

**Для цитирования:** Ефимов А.В., Сыпко С.А., Соколова А.Б., Аладова Е.Е. Обзор случаев поступления актинидов через поврежденную кожу у лиц из персонала ФГУП «ПО «Маяк» за период с 2010 по 2024 гг. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 3. С. 24–29. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-24-29

A.V. Efimov, S.A. Sypko, A.B. Sokolova, E.E. Aladova

## Review of Actinide Intake Cases Through Damaged Skin in Workers of the Mayak Production Association for the Period from 2010 to 2024

Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

Contact person: E.E. Aladova, e-mail: aladova@subi.su

### ABSTRACT

**Purpose:** Analysis of the results of special dosimetric monitoring of acute actinides intake through the wound into the body for the Mayak PA workers that have occurred over the past 15 years.

**Material and methods:** Actinide dosimetry, both in current individual dosimetric monitoring and in cases of acute radionuclide intake, is based on the results of the nuclide body burden determination by two methods: direct human radiation spectrometry and the interpretation of the measurements results of the nuclide activity in excreta.

**Results:** During the period from 2010 till 2024, 68 cases of acute intake of actinides into the body for the Mayak PA workers were detected, both by inhalation (70% cases) and through damaged skin (30% cases), the number of cases of intake through damaged skin prevails over the inhalation route of intake of actinides. With acute inhalation intake, in 25% of cases, the value of committed effective dose exceeded the limit of 20 mSv, and for wound intake, 11% of cases resulted in increased exposure, while for three cases of increased exposure, the value of committed effective dose exceeded 200 mSv. The effectiveness of specialized medical care and the effectiveness of treatment directly depends on the time of detection of skin damage.

**Conclusion:** When forming internal doses of Mayak workers, the intake of actinides through damaged skin is no less significant than inhalation. The optimal control system includes not only prompt examination of workers in the first hours after skin damage, but also ensures the detection of latent wounds contaminated with radionuclides. Early detection of wound cases and obtaining the required information on the internal radiation doses of workers is extremely important to improve the medical response and minimize the adverse effects of radiation as much as possible.

**Keywords:** internal exposure, actinide intake, damaged skin, individual dosimetric monitoring

**For citation:** Efimov AV, Sypko SA, Sokolova AB, Aladova EE. Review of Actinide Intake Cases Through Damaged Skin in Workers of the Mayak Production Association for the Period from 2010 to 2024. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(3):24–29. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-24-29

## Введение

По данным мониторинга нестандартных (раневых) поступлений, на ПО «Маяк» ежегодно регистрируется несколько инцидентов, связанных с загрязнением микротравм кожи актинидами с последующим переходом радиоактивных материалов в организм, причем некоторые из них приводят к облучению персонала в дозах, превышающих основные дозовые пределы, установленные в НРБ-99/2009 [1–3].

Сложность технологий на производствах ядерно-топливного цикла, а также особенности метаболизма изотопов плутония и америция-241 в организме человека, предъявляют особые требования к развитию современной системы аварийного реагирования по предупреждению и сведению к минимуму последствий облучения персонала в случае подобных инцидентов. Неотъемлемой частью радиационной безопасности персонала радиационных объектов является дозиметрический контроль. В отделе радиационной безопасности, который является подразделением ЮУрФНКЦ МБ ФМБА России, создана эффективная система мониторинга внутреннего облучения персонала и населения от широкого спектра дозообразующих радионуклидов. Аппаратурное и методическое оснащение отдела отвечает всем современным требованиям в области решаемых задач, включая контроль текущих уровней облучения, а также экспертные оценки радиационного воздействия в случаях нестандартных условий и путей поступления радиоактивных веществ в организм.

## Материал и методы

В условиях современного производства при работе с открытыми источниками, содержащими изотопы плутония и америция-241, наиболее значимыми путями поступления данных радионуклидов в организм являются ингаляционный путь и поступление через поврежденные кожные покровы.

Мониторинг внутреннего облучения при биофизическом обследовании профессиональных работников как при текущем индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК), так и в случаях острого поступления радионуклидов, реализуется двумя методами:

1. *In vitro* – радиохимический анализ на содержание актинидов в образцах биосубстратов (моча, кал) и интерпретация результатов измерений с использованием биокинетических и дозиметрических моделей,
2. *In vivo* – определение доз внутреннего облучения по результатам прямого метода измерения  $^{241}\text{Am}$  в организме на основе гамма-спектрометрии излучения человека (СИЧ).

Традиционно измерение содержания радионуклидов в биосубстратах в отделе радиационной безопасности ЮУрФНКЦ МБ осуществляется альфа-спектрометрическим методом. Для регистрации энергетических спектров альфа-излучения исследуемых радионуклидов в счетных образцах используется альфа-спектрометр, снабженный полупроводниковыми кремниевыми поверхностно-активными детекторами ORTEC с разрешением 25 кэВ, которые позволяют эффективно разделять изотопы  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$  уровне 0,5 мБк в суточном количестве мочи (СКМ). При этом имеющиеся низкофоновые измерительные каналы обеспечивают производительность более 4 тыс. стандартных измерений в год.

Существенными недостатками метода является длительность времени измерения (до 3 суток) и невозможность разделения  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  из-за близости энергий 5244 и 5256 кэВ соответственно.

С 2021 г. для проведения специального и текущего ИДК персонала ФГУП «ПО «Маяк» используется метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), основанный на измерении отношения массы иона к его заряду. Применение tandemного масс-спектрометра с тройным квадруполем (Agilent-8800) обеспечивает разделение изотопов  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ . При этом нижний предел измерения плутония по сравнению с альфа-спектрометрией уменьшен на порядок, а время измерения проб сокращено с 5 сут до 5 мин, что указывает на перспективу развития данного метода для экспресс-оценки контролируемых величин в случаях острых поступлений, как ингаляционных, так и раневых [4].

Скрининг содержания  $^{241}\text{Am}$  в организме профессиональных работников осуществляется с помощью двух установок СИЧ на базе гамма-спектрометрических трактов полупроводниковых детекторов (ППД) Canberra™, которые позволяют выполнять более 2,5 тыс. стандартных обследований в год.

Обязательным этапом текущего ИДК является контроль кожи кистей рук на наличие ранее незарегистрированных загрязнений актинидами микротравм, возникших задолго до проведения измерений, с использованием индикаторной установки «Рукомер» (рис. 1а).

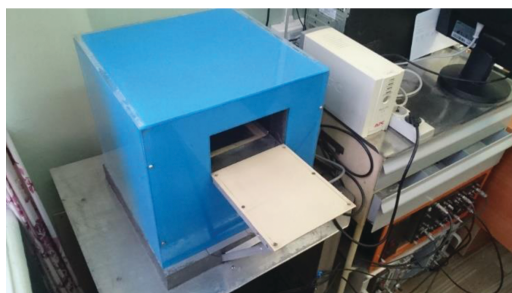
Установка «Рукомер» представляет собой гамма-спектрометр, снабженный сцинтилляционным детектором на основе кристалла NaI(Tl), который размещен в свинцовой защите размером 40×40×40 см, предназначенной для снижения естественного фотонного излучения.

В системе контроля содержания актинидов в месте повреждения кожи задействована установка СИЧ, оборудованная полупроводниковыми детекторами, энергетический диапазон которых позволяет выполнять регистрацию пиков полного поглощения в диапазоне энергий от 10 и более кэВ, что позволяет получать и обрабатывать спектрометрические данные при измерении содержания  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в месте повреждения кожи (рис. 1б).

## Результаты

За последние 15 лет выявлено 68 случаев острого поступления актинидов в организм лиц из персонала ПО «Маяк», как ингаляционного, так и через поврежденные кожные покровы. На рис. 2 показано распределение этих случаев по годам.

Как видно на рис. 2, количество случаев потенциального поступления через поврежденную кожу преобладает над другими путями острого поступления актинидов. Это связано с тем, что до настоящего времени сохранились технологические процессы, требующие выполнения большого количества ручных механических работ с радиоактивными веществами, обладающими высокой удельной активностью, с использованием оборудования, имеющего значительные уровни поверхностного загрязнения, включая проведение ремонтных работ. Микротравмы, наколы, порезы происходят в основном по неосторожности пострадавших, иногда они даже замечают момента травмы.



а



б

Рис. 1. Индикаторная установка «Рукомер» (а) и установка СИЧ, оборудованная полупроводниковыми детекторами (б)

Fig. 1. The indicator installation «Rukomer» (a) and the installation equipped with semiconductor detectors (b)

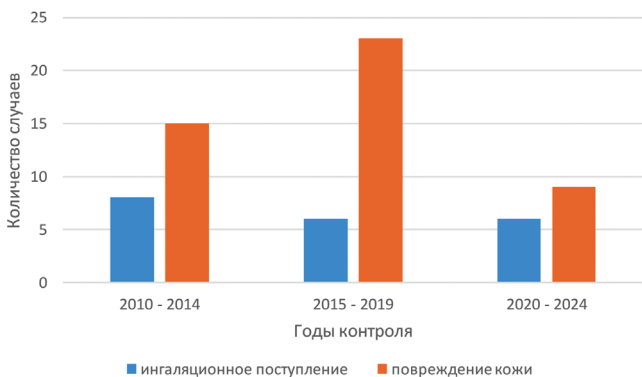


Рис. 2. Количество случаев острого поступления актинидов в организм лиц из персонала ПО «Маяк» с 2010 по 2024 г.

Fig. 2. The number of cases of acute intake of actinides in Mayak PA workers from 2010 to 2024

Как показывают результаты анализа полученных данных, подавляющее большинство раневых случаев приходится на кисти рук. На рис. 3 представлено распределение расположений повреждений кожи по различным частям левой и правой кистей рук. Более трети повреждений кожи кистей рук – это указательные пальцы, причем чаще (60 %) на правой руке. Повреждения других пальцев, поверхности ладоней, тыльной и боковых частей встречались реже.

Каждый случай поступления радионуклидов в организм через поврежденные кожные покровы является чрезвычайной ситуацией, поскольку может привести к



Рис. 3. Топография мест расположения микротравм, полученных работниками ФГУП «ПО «Маяк»

Fig. 3. Locations topography of the of microtraumas received by Mayak PA workers

значительным дозам внутреннего облучения, особенно при поступлении изотопов плутония и америция. Опасные количества радионуклидов могут поступить не только через колотые или резаные раны, но и через небольшие царапины и ссадины, всасывание через которые в сотни раз превышает резорбцию через неповрежденную кожу.

При повреждении кожных покровов защитные свойства кожи нарушаются, и при её загрязнении радионуклидами, последние могут легко проникать из места ранения в лимфатическую систему и кровь. Количество и скорость перемещения актинидов из места травмы зависит от характера ранения (порез, накол, рваная рана) и размеров самой раны, а также от физико-химического состояния и состава вещества, в структуре которого находится радионуклид. Труднорастворимые соединения, такие как диоксид  $^{239}\text{Pu}$ , после отложения в ране могут фиксироваться в струпе, после чего их резорбция в кровь практически отсутствует. Напротив, азотнокислый  $^{239}\text{Pu}$  достаточно быстро всасывается из места ранения в кровь и откладывается в органах депонирования [5].

Анализ общей статистики случаев ранений по отдельным участкам ПО «Маяк» показал, что большая часть ранений кожных покровов (84%) была зарегистрирована у работников химико-металлургического производства, на радиохимическое производство приходится 16% случаев (рис. 4).

Наибольшее количество ранений кожных покровов среди персонала химико-металлургического производства за анализируемый период было зафиксировано у основного персонала и работников, выполняющих ремонтные работы (рис. 5). Очевидно, что данная категория персонала имеет большую вероятность получения дозы внутреннего облучения выше установленного предела за счет поступления актинидов через поврежденную кожу вследствие выполнения работ с повышенной возможностью травмирования кожных покровов.

Попавшие в рану актиниды создают практически точечное загрязнение повышенной удельной активности с поражением ткани в месте отложения. В дополнение к этому создается опасность резорбции радионуклида из места травмы в кровь и отложения в других органах и тканях. Предел дозы 20 мЗв, установленный в НРБ-99/2009, превышает при попадании в кровь малых количеств долгоживущих альфа-активных радионуклидов. Так, для  $^{239}\text{Pu}$  расчеты по модели обмена, рекомендованной в Публикации 67 МКРЗ, показывают, что достиже-



Рис. 4. Распределение по основным производствам ПО «Маяк» случаев специального ИДК при раневом поступлении за период 2010–2024 гг.

Fig. 4. Distribution of wound cases special individual dosimetry control by the main facilities of Mayak PA for the period 2010–2024

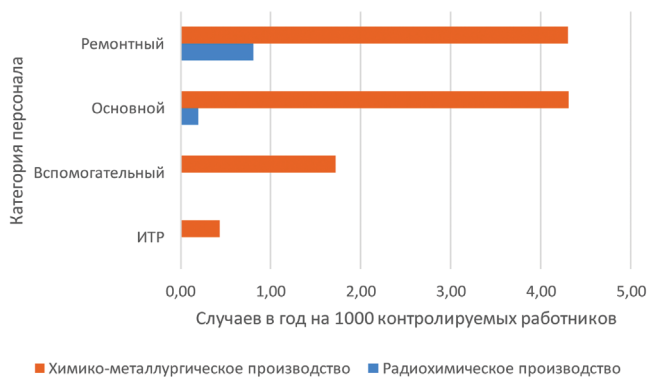


Рис. 5. Частота случаев повреждения кожных покровов среди различных категорий персонала основных производств ПО «Маяк» за период 2010–2024 гг.

Fig. 5. Frequency of skin lesions among various categories of Mayak PA workers from the main production facilities for the period 2010–2024

ние предела дозы происходит при однократном поступлении в кровь уже 40 Бк этого радионуклида [3, 6]. Это означает, что даже незначительное загрязнение ран и микротравм радиоактивными веществами может привести к серьезному нарушению действующих стандартов радиационной безопасности.

На рис. 6 показано количество случаев возникновения угроз, связанных с возможным повышенным облучением и их реализации в зависимости от пути поступления у персонала основных производств ПО «Маяк» за период 2010–2024 гг. При остром ингаляционном поступлении в 25% случаев величина ОЭД превысила предел в 20 мЗв, а при раневом поступлении 11% случаев привели к повышенному облучению (рис. 6). При этом для трех случаев повышенного облучения величина ОЭД превысила 200 мЗв (рис. 7).

Доля случаев реализации риска формирования ожидаемой эффективной дозы выше установленного предела при повреждении кожных покровов более чем в два раза ниже, чем в случаях ингаляционного поступления (рис. 6). Отчасти это связано с избыточным реагированием на ситуацию, при которой любое выявленное по-

вреждение кожи инициирует программу аварийного (специального) ИДК, в рамках которого только в ~40% случаев подтверждается факт поступления изотопов плутония и <sup>241</sup>Am на регистрируемом уровне.

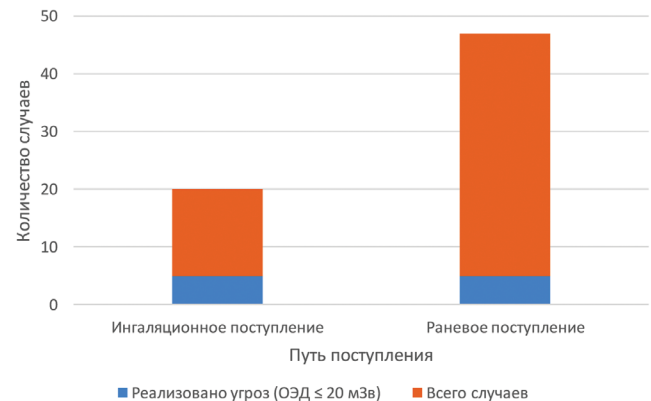


Рис. 6. Количество случаев возникновения угроз, связанных с возможным повышенным облучением и их реализации в зависимости от пути поступления у персонала основных производств ПО «Маяк» за период 2010–2024 гг.

Fig. 6. The number of cases of threats related to possible increased exposure and their implementation, depending on the intake route for Mayak PA workers from the main production facilities for the period 2010–2024

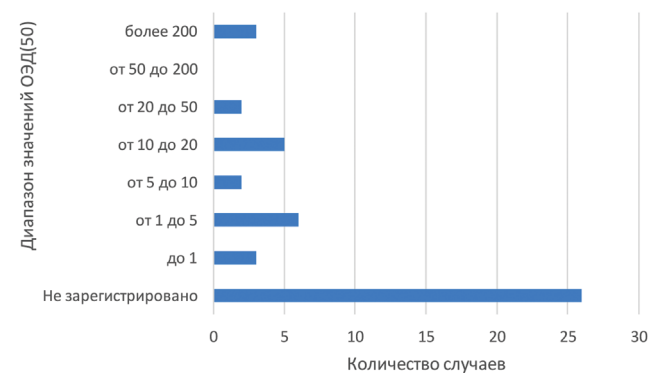


Рис. 7. Распределение случаев по величине ОЭД при поступлении актинидов через поврежденную кожу у персонала основных производств ПО «Маяк» за период 2010–2024 гг.

Fig. 7. Committed effective dose distribution for intake through damaged skin cases of the main production facilities Mayak PA workers for the period 2010–2024

В случае отсроченного выявления ситуации, потенциально ведущей к незапланированному повышенному облучению в результате поступления изотопов плутония и <sup>241</sup>Am через поврежденную кожу, частота реализации угроз на порядок выше, чем в случаях немедленного реагирования (рис. 8).

От времени обнаружения микротравмы напрямую зависит эффективность оказания специализированной медицинской помощи и эффективность лечения [7–9]. Наибольшая эффективность достигается, если микротравма обнаружена непосредственно в момент ее получения, однако зачастую работники обращаются за помощью спустя сутки и более после инцидента.

Оптимальная система контроля включает не только оперативное обследование работников в первые часы после повреждения кожи, но и обеспечивает обнаружение латентных ранений, загрязненных радионуклидами, не зафиксированных службами радиационной безопас-

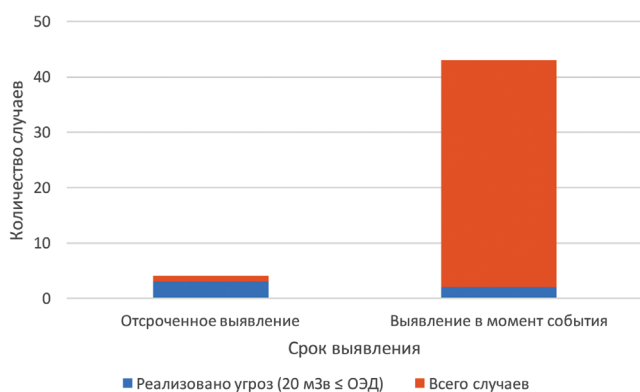


Рис. 8. Количество случаев возникновения угроз, связанных с возможным повышенным облучением при поступлении изотопов плутония и  $^{241}\text{Am}$  через поврежденную кожу и их реализация в зависимости от сроков реагирования на угрозу

Fig. 8. The number of threats associated with possible increased exposure to plutonium and  $^{241}\text{Am}$  isotopes through damaged skin and their implementation, depending on the timing of the response to the threat

ности предприятия, поскольку по статистике такие случаи встречаются достаточно часто.

### Обсуждение

За последние 10 лет специалистами отдела радиационной безопасности ЮУрФНКЦ МБ ФМБА России решен ряд важных организационных и методических вопросов ИДК внутреннего облучения при поступлении актинидов через поврежденную кожу: разработаны и внедрены методики выполнения измерений и выполнения расчетов; разработаны порядки действий и взаимодействия Госкорпорации «Росатом» и организаций ФМБА России в случаях поступления актинидов через поврежденную кожу. В настоящее время актуализируются локальные порядки ИДК, где рассматриваются вопросы профилактических мероприятий по выявлению радиоактивного загрязнения и микротравм, а также действий персонала при повреждении кожных покровов. Для своевременного выявления радиоактивного загрязнения и повреждения кожных покровов на радиационно опасных объектах вводятся в эксплуатацию современные измерительные установки.

Вместе с тем, недостаточно проработанным остается вопрос отсутствия средств измерений, обеспечивающих воспроизводимость позиционирования в требуемой гео-

метрии измерения, а также отсутствия мобильных/переносных установок для выполнения измерений в медицинском учреждении в ходе иссечения тканей в месте расположения раны для контроля эффективности проводимого лечения. Кроме того, не до конца решены вопросы утилизации медицинских и радиоактивных отходов, образующихся при хирургическом вмешательстве с иссечением загрязненных тканей.

На ближайшую перспективу актуальными остаются вопросы по совершенствованию моделей, описывающих поступление соединений актинидов через поврежденную кожу, в том числе, определение исходной формы их нахождения в месте ранения (растворимые, коллоиды, частицы, фрагменты); а также совершенствование схемы хелатотерапии, сопровождающей случаи поступления актинидов через поврежденную кожу, для ускорения выведения радионуклидов из организма.

### Заключение

До настоящего времени регистрируются случаи поступления актинидов в организм персонала через микротравмы кожи, приводящие к внутреннему облучению выше установленных НРБ-99/2009 дозовых пределов, при работе в регламентных, соответствующих принятым нормам радиационной безопасности, условиях. Наибольшее количество случаев раневого поступления со значительными уровнями внутреннего облучения зарегистрировано при поступлении изотопов плутония и америция на радиохимических и плутониевых производствах.

В условиях современного производства раневой путь поступления является не менее значимым для формирования доз внутреннего облучения персонала, по сравнению с ингаляционным, в связи с чем проблеме предупреждения и ограничения последствий микротравматизма на радиационно опасных предприятиях должно уделяться самое пристальное внимание.

С точки зрения радиационной безопасности чрезвычайно важными задачами являются повышение эффективности системы дозиметрического контроля, раннее выявление подобных случаев и получение требуемой информации о дозах внутреннего облучения профессиональных работников, вовлеченных в ситуации, связанные с поступлением радионуклидов в организм через поврежденные кожные покровы, с целью улучшения медицинского реагирования на эти ситуации и максимально возможной минимизации неблагоприятного радиационного воздействия на персонал.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
2. Соколова А.Б., Ефимов А.В. Современное состояние системы дозиметрического сопровождения случаев острого поступления актинидов у работников ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2018. №3. С. 56-65.
3. Щадилев А.Е. Контроль поступления актинидов в организм персонала ПО «Маяк» через поврежденные покровы кожи // Источники и эффекты облучения работников ПО «Маяк» и населения, проживающего в зоне влияния предприятия. Озерск: ФМБА Южно-Уральский институт биофизики, 2009. С. 94-126.
4. Баталов В.Р., Ишунина М.В., Ефимов А.В., Соколова А.Б. Сравнительный анализ методов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и альфа-спектрометрии для измерения активности плутония в биосубстратах // Радиационная гигиена. 2024. Т.17. №4. С. 88-95. Doi: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-88-95. EDN LOCWKS.
5. NCRP Report No.156. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment // National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda (MD). 2006.
6. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part II Ingestion Dose Coefficient // ICRP Publication 67. Ann ICRP 23 (3-4). Oxford: Pergamon press, 1993. 164 p.
7. Хохряков В.Ф., Беляев А.П., Кудрявцева Т.И. и др. Эффективность неотложной ДТРА терапии при поступлении плутония через кожу // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2001. Т.46. №5. С. 56-60.
8. Соколова А.Б., Ефимов А.В. Эффективность неотложной хелатотерапии для работников ПО «Маяк» в случае по-

ступления актинидов через поврежденные покровы кожи // Вопросы радиационной безопасности. 2019. №3. С. 74-82.

9. Соловова А.Б., Ефимов А.В. Декорпорация плутония: эффективность отложенной хелатотерапии в случаях острого

поступления через поврежденные покровы кожи у работников ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2021. №2. С. 70-80.

## REFERENCES

1. *Normy Radiatsionnoy Bezopasnosti (NRB-99/2009)* = Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). Sanitary Rules SanPiN 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal'nyy Tsentr Gigiyeny i Epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. 100 p. (In Russ.).
2. Sokolova A.B., Yefimov A.V. Current State of the Dosimetric Monitoring System for Cases of Acute Actinide Intake among Workers at Mayak Production Association. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Radiation Safety Problems. 2018;3:56-65 (In Russ.).
3. Shchadilov A.Ye. Monitoring Actinide Intake by Mayak PA Personnel through Damaged Skin. *Istochniki i Effekty Oblucheniya Rabotnikov PO "Mayak" i Naseleniya, Prozhivayushchego v Zone Vliyaniya Predpriyatiya* = Sources and Effects of Irradiation of Mayak PA Workers and the Population Living in the Enterprise's Influence Zone. Ozersk, FMBA Yuzhno-Ural'skiy Institut Biofiziki Publ., 2009. P. 94-126 (In Russ.).
4. Batalov V.R., Ishunina M.V., Yefimov A.V., Sokolova A.B. Comparative Analysis of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry and Alpha Spectrometry Methods for Measuring Plutonium Activity in Biosubstrates. *Radiatsionnaya Gigiyena* = Radiation Hygiene. 2024;17;4:88-95 (In Russ.). Doi: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-88-95. EDN LOCWKS.
5. NCRP Report No.156. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda (MD). 2006.
6. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part II Ingestion Dose Coefficient. ICRP Publication 67. Ann ICRP 23 (3-4). Oxford, Pergamon press, 1993. 164 p.
7. Khokhryakov V.F., Belyayev A.P., Kudryavtseva T.I., et al. Efficiency of Emergency DTPA Therapy in Case of Plutonium Intake through the Skin. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2001;46;5:56-60 (In Russ.).
8. Sokolova A.B., Yefimov A.V. Efficiency of Emergency Chelation Therapy for Workers of the Mayak Production Association in Case of Actinide Intake through Damaged Skin. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Radiation Safety Problems. 2019;3:74-82 (In Russ.).
9. Sokolova A.B., Yefimov A.V. Plutonium Decorporation: the Effectiveness of Delayed Chelation Therapy in Cases of Acute Intake through Damaged Skin in Workers of the Mayak Production Association. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Radiation Safety Problems. 2021;2:70-80 (In Russ.).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта № 10.002.25.2 от 10.06.2025 по теме «Анализ перспективных направлений совершенствования противоаварийной готовности ЮУРАМДЦ и медицинских организаций ФМБА России в зоне ответственности ЮУРАМДЦ», финансируемого ФМБА России по ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 г. - 2020 г. и на период до 2035 года».

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.

**Поступила:** 20.02.2026. Принята к публикации: 25.03.2026.

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

**Financing.** The work was financing by Federal Medical and Biological Agency within the framework of the Federal Target Program "Ensuring nuclear and radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2035".

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

**Article received:** 20.02.2026. Accepted for publication: 25.03.2026.