

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-113-120

УДК: 621.039.8.002-051:546.798.22+.23

Ключевые аспекты декорпорации плутония и америция в случаях их аварийного поступления персоналу радиационно опасных производств

Соколова А.Б.

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики
Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

В условиях производства по переработке плутония, несмотря на достигнутое улучшение радиационной обстановки на рабочих местах, не исключена вероятность аварийных ситуаций, приводящих к острому ингаляционному поступлению радионуклидов или их поступлению через поврежденные кожные покровы. В таких случаях для предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения применяют хелаты. Цель настоящего исследования – изучить отечественные и зарубежные методические документы и определить степень полноты и достаточности содержащихся в них рекомендаций по выполнению декорпорации плутония и америция хелатными комплексами. Были рассмотрены общие рекомендации по применению хелатных комплексов, представленные в Публикации № 96 Международной комиссии по радиологической защите, документы Международного агентства по атомной энергии, а также документы Национального совета по радиационной защите и измерениям США и отечественные методические указания 2.6.1.034-2014 «Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241». Единые требования к порядку выполнения декорпорации в части кратности введения препарата и продолжительности курса декорпорации данными документами не устанавливаются, также не выработан единый подход к определению критерия для принятия решений о применении хелата и об окончании курса декорпорации. В настоящее время, пока не установлены единые критерии для принятия решения о начале декорпорационной терапии, следует руководствоваться принципом оперативности и начинать декорпорацию в кратчайшие сроки после предполагаемого или известного поступления. В дальнейшем тактика декорпорации должна определяться по мере поступления информации об оценках дозиметрических величин, с учетом состояния здоровья пострадавшего работника, не исключая возможность отложенного применения хелата.

Ключевые слова: плутоний, америций, декорпорация, хелат, пентацин.

Введение

В условиях производства по переработке плутония, несмотря на достигнутое улучшение радиационной обстановки на рабочих местах, не исключена вероятность аварийных ситуаций, приводящих к острому ингаляционному поступлению промышленных соединений плутония или их поступлению через поврежденные кожные покровы. В зависимости от технологических процессов, персонал может сталкиваться с различными по изотопному составу промышленными соединениями плутония, в которых присутствует, в том числе, альфа-активный ^{241}Am . Для предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения, в случаях аварийного поступления плутония и америция применяют хелатные комплексы (комплексные соединения) – соли диэтилентриаминпентауксусной кислоты (ДТПА) [1–3]. Между тем, в настоящее время отсутствуют клинические руководства и методические документы, позволяющие полноценно выполнять мероприятия по декорпорации [4, 5]. Вследствие этого, в 2023 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) инициировала проект, направленный на разработку руководств по оценке и управлению внутренним облучением трансуранными актинидами [4].

При принятии решения о выполнении декорпорации необходимо рассматривать совокупный риск и учитывать все факторы риска. Поступление трансуранных актинидов потенциально может привести к возникновению канцерогенных эффектов [4]. Декорпорационная терапия с использованием ДТПА отличается хорошей терапевтической переносимостью, не вызывая побочных эффектов при применении в рекомендованных дозах, тем не менее, может вызывать отдельные неблагоприятные последствия, такие как снижение в организме некоторых жизненно важных для здоровья элементов, бронхоспазм у пациентов с астмой при ингаляционном их применении, а также аллергическая кожная реакция [6]. Учитывая вышеизложенное, и принятие решения о выполнении декорпорации, и ее тактика должны основываться на совокупной оценке риска и пользы, полученной с привлечением специалистов, обеспечивающих дозиметрическое сопровождение.

Цель исследования – анализ отечественных и зарубежных методических документов для определения степени полноты и достаточности рекомендаций по выполнению декорпорации плутония и америция хелатными комплексами в случаях аварийного поступления персоналу радиационно опасных производств.

Соколова Александра Борисовна

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: sokolova@subi.su

Общие принципы декорпорации радионуклидов

Основной целью защитных мер после выявления повышенного уровня поступления радионуклидов является снижение дозовой нагрузки для предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения [7].

На рисунке схематично представлены общие принципы декорпорации радионуклидов, которые заключаются в предотвращении отложения и перераспределения радионуклида в органах вторичного депонирования и выведении из органов и тканей, в которых радионуклид уже успел отложиться.

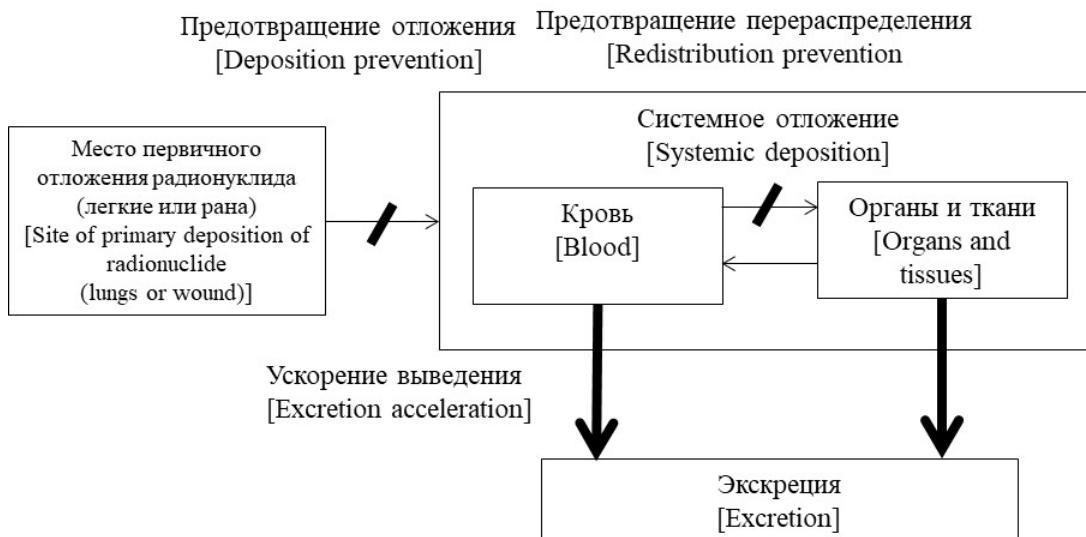


Рис. Общие принципы декорпорации радионуклидов
[Fig. General principles of radionuclide decorporation]

Применение ДТПА в форме соединения кальция или цинка в качестве лечебного препарата рекомендовано для лиц с известным или предполагаемым поступлением плутония и америция [7]. В отечественной практике в настоящее время используется только СадТПА – пентацин [8]. Руководствуясь обширными научными исследованиями, посвященными проблеме декорпорации актинидов с помощью хелатов, и анализом практического обращения со случаями аварийного поступления, можно сформулировать ряд положений, которые являются определяющими в тактике декорпорации:

- принятие первоначального решения о необходимости применения ДТПА на ранней фазе радиационной аварии;
- уровни доз или поступления, при которых принимается решение о применении ДТПА;
- способ введения препарата;
- дозировка препарата;
- кратность введения препарата;
- продолжительность курса.

Актуальные методические документы, содержащие рекомендации по выполнению декорпорации актинидов

Исторически основу для стандартов радиационной безопасности формирует Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), затем, опираясь на научные разработки МКРЗ, Международное агентство по атомной энергии

(МАГАТЭ) разрабатывает практические руководства. Общие рекомендации по применению хелатных комплексов рассмотрены в Публикации № 96 МКРЗ, а практические вопросы применения хелатных комплексов рассматриваются в документе «Общие процедуры медицинского реагирования во время ядерной или радиологической аварийной ситуации», опубликованном МАГАТЭ в рамках серии МАГАТЭ «Готовность и реагирование на аварийные ситуации» [7, 9]. Также в общих чертах эта проблема рассматривается в документе МАГАТЭ «Безопасное обращение с плутонием и его хранение» в пункте «Меры по уменьшению дозы при отложении плутония в организме» и документе «Медицинское обслуживание лиц, подвергшихся внутреннему загрязнению радионуклидами в условиях ядерной или радиационной аварийной ситуации» [10].

В документах Национального совета по радиационной защите и измерениям США (НКРЗ США) также приводятся общие требования к процедуре выполнения декорпорации радионуклидов [11, 12]. Основные положения для выполнения декорпорации (комплексонотерапии) установлены в отечественном методическом документе МУ 2.6.1.034-2014¹ «Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241», который определяет действия персонала в случаях поступления изотопов плутония и америция-241.

¹ МУ 2.6.1.034-2014. Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241. [Methodological Guidelines 2.6.1.034-2014. Order of Interaction between enterprises of State Atomic Energy Corporation "Rosatom" and organs and organizations of FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and accidental inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes. (In Russ.)]

Согласно позиции МКРЗ и МАГАТЭ, декорпорация радионуклидов после их поступления в подавляющем большинстве случаев выполняется для снижения риска долгосрочных последствий, а не для лечения острого радиационного поражения [10, 13]. Так как первичные оценки доз и поступления на основании результатов измерения активности в экскретах не могут быть получены немедленно, в большинстве случаев требуется принимать решение о начале декорпорации на основании либо оценок с большой неопределенностью, либо руководствуясь лишь предположениями о возможности и величине поступления. Следует помнить, что при поступлении изотопов плутония и америция наиболее эффективными являются оперативные действия [10]. Все вышеперечисленные документы МКРЗ и МАГАТЭ рекомендуют принимать меры по декорпорации «как можно скорее» после предполагаемого или известного поступления. Учитывая необходимость оперативного введения хелатного

комплекса, отечественным методическим документом МУ 2.6.1.034-2014, предусмотрено введение пентацина на здравпункте предприятия на этапе оказания доврачебной помощи¹. Тем не менее, при любом применении лекарственных средств должно рассматриваться соотношение пользы и риска. Каждый случай аварийного поступления должен быть обеспечен дозиметрическим и медицинским сопровождением.

В таблице приведены рекомендации к проведению декорпорации плутония и америция хелатами, изложенные в международных и отечественных¹ методических документах [9–12, 14]. Как видно из таблицы, четкие требования к порядку выполнения декорпорации в части продолжительности курса декорпорации не устанавливаются. Какие-либо рекомендации касательно кратности введения препарата в рассматриваемых документах не приводятся, рекомендуемая дозировка составляет от 0,5 до 1,0 г на инъекцию.

Таблица

Рекомендации к проведению курса декорпорации

[Table]

Recommendations for conducting a decorporation course]

Методический документ [Methodological document]	Рекомендации к выполнению декорпорации [Recommendations for performing decorporation]		
	Принятие первоначального решения [The initial decision]	Уровни вмешательства [Levels of intervention]	Продолжительность [Duration]
Безопасное обращение с плутонием и его хранение [Safe Handling and Storage of Plutonium][14]	Как можно скорее после возможного поступления плутония, желательно в течение одного часа [as soon as possible after the suspected intake and preferably within one hour]	Не устанавливается [not established]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
Общие процедуры медицинского реагирования при ядерной или радиологической аварийной ситуации [Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency, Emergency Preparedness and Response] [9]	Не устанавливается [not established]	Не устанавливается [not established]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
Медицинское обслуживание лиц, подвергшихся внутреннему загрязнению радионуклидами в условиях ядерной или радиационной аварийной ситуации [Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency] [10]	Как можно скорее после известного или предполагаемого поступления [as soon as possible after known or suspected internal contamination]	Не устанавливается [not established]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
Отчет НКРЗ № 156 Разработка биокинетической модели для загрязненных радионуклидами ран и методики оценки, дозиметрии и лечения [NCRP REPORT No. 156 Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment] [14]	Как можно скорее [as soon as possible]	Если «сохраненная» доза превышает годовой предел в 1-10 раз [saved doses on the order of 1 to 10 times the annual limit]	Через пять дней лечения по результатам измерений активности плутония в СКМ принять решение о необходимости продолжения лечения; общая продолжительность не устанавливается [by the fifth day, evaluate bioassay data for intake/uptake estimation and decide whether further chelation is necessary; the total duration is not established]

Методический документ [Methodological document]	Рекомендации к выполнению декорпорации [Recommendations for performing decontamination]		
	Принятие первоначального решения [The initial decision]	Уровни вмешательства [Levels of intervention]	Продолжительность [Duration]
Отчет НКРЗ № 161 Контроль лиц, загрязненных радионуклидами: справочник [NCRP REPORT No. 161 Management of persons contaminated with radionuclides: handbook] [11]	Как можно скорее [as soon as possible]	Если поступление превышает Clinical Decision Guide* [if the intake exceeds Clinical Decision Guide]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]
МУ 2.6.1.034-2014 ¹ «Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241» [Methodological Guidelines 2.6.1.034-2014. Order of Interaction between enterprises of State Atomic Energy Corporation “Rosatom” and organs and organizations of FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and accidental inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes]	1–1,5 часа [within 1–1.5 hour]	ОЭД 5-50 мЗв [expected effective dose 5-50 mSv]	Общая продолжительность не устанавливается [the total duration is not established]

* Поступление, удовлетворяющее ограничениям по дозе как для стохастических, так и для детерминированных эффектов [Intake that satisfies dose limitation for both stochastic and deterministic effects].

Ключевые вопросы для разработки тактики декорпорации

Уровни доз или поступления, при которых принимается решение о применении хелата, в рекомендациях МКРЗ и МАГАТЭ не оговариваются [7, 10]. В литературных источниках приводятся рекомендации, основанные на экспертных оценках, опирающихся на концепцию «сохраненной дозы» (“saved dose”) или концепцию риска. В работе R. Wood et al. при подтвержденном поступлении, приводящем к ОЭД в интервале 20–200 мЗв, рекомендовано проведение единичного или непродолжительного введения пентацина, что основано на концепции риска: избыточный риск стохастических эффектов при дозе 20 мЗв составляет 0,15 %, при 200 мЗв – 1,5 % [15]. В руководстве по лечению работников с инкорпорацией радионуклидов, подготовленной Министерством энергетики США (United States Department of Energy, DOE), при дозе 20 мЗв рекомендовано применение ДТПА, при уровне 200 мЗв лечение является строго обязательным [16]. В работе Toohey et al., на основании критерия для проведения медицинских мер публикации 156 НКРЗ США при поступлении через поврежденные кожные покровы, определены значения DRG (Derived Regulatory Guidance) – активности в ране, которая может привести к дозе 20 или 50 мЗв [12, 17]. Критерием для проведения медицинских мер служит концепция “saved dose” (снижение дозы за счет лечения): если сохраненная доза превышает годовой предел в 1–10 раз – рекомендована хелатотерапия, если более чем в 10 раз – хирургическое вмешательство и хелатотерапия [12]. В публикации 161 НКРЗ США рекомендуемой величиной для принятия клинического решения является поступление CDG (Clinical Decision Guide),

приводящее к ожидаемой эффективной дозе (ОЭД) в 0,25 Зв (250 мЗв). Для персонала при поступлении, эквивалентном величине CDG, рекомендуется хелатотерапия, и при поступлении, превышающем CDG в два раза выполнение хелатотерапии обязательно. CDG для ингаляционного поступления ^{239}Pu – $7,6 \times 10^3$ Бк (тип П) и $3,0 \times 10^4$ Бк (тип S) [11]. В руководстве, разработанном для персонала дозиметрической поддержки Хэнфорда, рекомендуемой величиной для обязательного выполнения хелатотерапии является ОЭД 200 мЗв [18]. В МУ 2.6.1.034-2014¹ при ингаляционном поступлении введение пентацина рекомендовано при значениях предварительной оценки ОЭД от 5 мЗв, при раневом поступлении – при суммарной активности радионуклидов в ране работника 40 Бк.

Рекомендуемым способом введения препарата является внутривенный, при ингаляционном поступлении вместе с внутривенным введением рекомендованы ингаляции пентацином. Ингаляции наиболее эффективны в ранние сроки после поступления, так как процессы фиксации радионуклида в легких происходят довольно быстро. Наиболее подробно рекомендации по выполнению ингаляций пентацином приведены в МУ 2.6.1.034-2014¹:

- при значениях предварительной оценки ОЭД от 5 до 50 мЗв сразу после госпитализации работника рекомендованы ингаляция раствора пентацина (при условии, что она не была проведена в здравпункте) и далее один раз в сутки (не менее 3 процедур) и внутривенное введение пентацина (при условии, что инъекция не была проведена в здравпункте). Повторное введение пентацина проводится через 12 ч после выявления инцидента и в дальнейшем – один раз в сутки при учете результатов биофизического обследования;

– при значениях предварительной оценки ОЭД от 50 до 200 мЗв сразу после госпитализации работника рекомендованы ингаляция раствора пентацина (при условии, что она не была проведена в здравпункте) и далее один раз в сутки (не менее 7 процедур) и внутривенное введение пентацина (при условии, что инъекция не была проведена в здравпункте). Повторное введение пентацина проводится через 12 ч после выявления инцидента и в дальнейшем – один раз в сутки при учете результатов биофизического обследования;

– при значениях предварительной оценки ОЭД от 200 мЗв сразу после госпитализации работника рекомендованы ингаляция раствора пентацина (при условии, что она не была проведена в здравпункте) и через 6 ч после выявления инцидента при условии, что она была проведена, и далее – один раз в сутки (не менее 10 процедур) и внутривенное введение пентацина (при условии, что инъекция не была проведена в здравпункте). Повторное введение пентацина проводится через 12 ч после выявления инцидента и в дальнейшем – один раз в сутки при учете результатов биофизического обследования.

Кратность введения препарата в методических документах не устанавливается, в МУ 2.6.1.034-2014¹ рекомендовано определять тактику и объем медицинской помощи в зависимости от результатов предварительных оценок величины внутреннего поступления радионуклидов и ОЭД.

И последним, немаловажным аспектом для определения тактики декорпорации, является вопрос, когда же следует прекращать применение ДТПА и каким критерием при этом следует руководствоваться. В методической документации и доступных литературных источниках не приводится однозначного ответа. В публикации 156 НКРЗ США рекомендуется через пять дней лечения оценить содержание в организме на основе измерений активности ²³⁹Pu в суточной порции мочи и принять решение о необходимости продолжения лечения [12]. В работе G.N. Stradling et al. предлагается прекращать терапию: 1) в случае, когда очевидно, что экскреция радионуклида незначительна в сравнении с начальным отложением; или 2) в случае, когда ОЭД снижена до приемлемых уровней [19]. В работе Л.А. Плотниковой с соавт. показана целесообразность проведения курса,ключающего не более 20 инъекций ДТПА [20].

Следует также обратить внимание на вопрос об отложенном начале декорпорации, так как выявление случаев повышенного поступления радионуклидов может происходить не сразу, а через некоторое, даже значительное время [21]. В Публикации №156 НКРЗ США отмечено, что хотя рекомендуется начинать лечение в течение нескольких часов после радиационного инцидента, применение ДТПА позволяет снизить дозы, даже если лечение было начато спустя несколько недель [12]. Зависимость эффективности применения хелата от времени начала декорпорации доказана как в экспериментальных исследованиях на животных [22–24], так и при применении пентацина для декорпорации в случаях острого поступления у работников радиационно-опасных производств [21, 25]. Доказано, что чем раньше применяется хелат, тем выше его эффективность. Отложенное применение хелата менее эффективно, тем не менее показано, что для ингаляционного поступления америция и отложенной хелатотерапии (через несколько месяцев после поступления) можно достичь снижения ОЭД на 40 % [26].

Заключение

Изучение отечественных и зарубежных документов, содержащих положения и рекомендации для выполнения декорпорации плутония и америция хелатными комплексами, показало, что в них не сформулированы необходимые требования к порядку выполнения декорпорации. Не регламентированы основные положения, такие как принятие первоначального решения о необходимости начала декорпорации, критерий принятия решения, кратность введения препарата и продолжительность курса.

Пока не установлены единые критерии для принятия решения о начале декорпорационной терапии, следует руководствоваться принципом оперативности и начинать декорпорацию в кратчайшие сроки после предполагаемого или известного поступления. В реальных условиях достоверная оценка величины поступления и дозы внутреннего облучения с приемлемой неопределенностью не может быть получена немедленно после произошедшей аварии, а недостаток информации о физико-химических свойствах поступившего соединения может вносить значительную неопределенность при получении первичных оценок. Поэтому дальнейшая тактика декорпорации, включая кратность введения препарата и его дозировку, должна определяться по мере поступления информации об оценках дозиметрических величин, на основании результатов дозиметрического обследования и с учетом состояния здоровья пострадавшего работника. В качестве критерии для прекращения декорпорации можно рассматривать как снижение дозы до приемлемых уровней, так и объективные свидетельства о прекращении ускорения выведения актинидов с мочой – результаты биофизического обследования.

Несмотря на снижение эффективности хелатов при отложенном начале декорпорации, не следует отказываться от проведения курса декорпорации, так как применение ДТПА позволяет снизить дозу внутреннего облучения даже спустя несколько недель и месяцев.

Благодарности

Автор благодарит рецензентов за тщательный анализ статьи.

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках Государственного контракта от 15.06.2025 № 11.314.25.2 «Техногенное облучение и его отдаленные медицинские последствия» шифр «Последствия 25-27», финансируемого ФМБА России.

Литература

1. Rump A., Stricklin D., Lamkowsski A. et al. Reconsidering current decorporation strategies after incorporation of radionuclides // Health Physics. 2016. Vol. 111, No 2. P. 204-211.
2. Singh V.K., Romaine P.L.P., Seed T.M. Medical countermeasures for radiation exposure and related injuries: characterization of medicines, FDA-approval status and inclusion into the strategic national stockpile // Health Physics. 2015. Vol. 108, No 6. P. 607-630.

3. Menetrier F., Grappin L., Raynaud P. et al. Treatment of accidental intakes of plutonium and americium: Guidance notes // Applied Radiation and Isotopes. 2005. Vol. 62, No 6. P. 829–846.
4. Li C., Kenbayeva Z., Dainiak N. et al. Development of Evidence-based Guidelines on Assessment and Management of Internal Contamination with Transuranic Actinides // Disaster Medicine and Public Health Preparedness. 2025. Vol. 19. P. 156.
5. Reis A., Sampaio C., Sousa W. et al. Key topics for making decisions on decontamination therapies // Radiation Protection Dosimetry. 2024. Vol. 200, No 7. P. 707–714.
6. Grappin L., Berard P., Menetrier F. et al. Treatment of actinide exposure: a review of Ca-DTPA injections inside CEA-COGEMA plants // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 435–439.
7. ICRP. Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack. ICRP Publication 96 // Annals of the ICRP. 2005. Vol. 35, No 1.
8. Ковтун В.Ю., Гладких В.Д., Давидович Ю.А. и др. К вопросу об использовании лекарственных форм пентацина и цинкцина // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60, № 1. С. 45–53.
9. МАГАТЭ. Аварийная готовность и реагирование. Общие процедуры медицинского реагирования при ядерной или радиологической аварийной ситуации. Вена, 2009. 343 с.
10. IAEA Series EPR-Internal Contamination. Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA: Vienna, 2018. 116 p.
11. NCRP REPORT No. 161. Management of persons contaminated with radionuclides. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda (MD), 2008. 411 p.
12. 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. 286 p.
13. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2–4.
14. МАГАТЭ. Серия по Безопасности № 9. Безопасное обращение с плутонием и его хранение. Международное агентство по атомной энергии. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2000. 123 с.
15. Wood R., Sharp C., Gourmelon P. et al. Decontamination treatment – medical overview // Radiation Protection Dosimetry. 2000. Vol. 87, No 1. P. 51–57.
16. Gerber G.B., Thomas R.G. Guidebook for the Treatment of Accidental Internal Radionuclide Contamination of Workers (joint publication for the Commission of the European Communities Directorate-General for Science, Research and Development, Radiation Protection Program, and the US Department of Energy) // Radiation Protection Dosimetry. 1992. Vol. 41, No 1. P. 27–36.
17. Toohey R.E., Bertelli L., Sugarman S. L. et al. Dose coefficients for intakes of radionuclides via contaminated wounds // Health Physics. 2011. Vol. 100, No 5. P. 508–514.
18. Carbaugh E.H., Decker W.A., Swint M.J. Medical and health physics management of a plutonium wound // Radiation Protection Dosimetry. 1989. Vol. 26, No 1. P. 345–349.
19. Stradling G.N., Taylor D. M., Henge-Napoli M-H. et al. Treatment for actinide-bearing industrial dusts and aerosols // Radiation Protection Dosimetry. 2000. Vol. 87, No 1. P. 41–50.
20. Плотникова Л.А., Байсоголов Г.Д. Влияние пентацина и тетоксацина на ускорение выведения плутония из организма человека (Сообщение II) // Бюллетень радиационной медицины. 1963. № 1-а. С. 83–86.
21. Соколова 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.
22. Foreman H. The Effect of Diethylenetriaminepentaacetic Acid (DTPA) on Acceleration of Excretion of Actinide Elements // Health Physics. 1962. Vol. 8, No 6. P. 735–737.
23. Любчанский Э.Р. Применение Na₂CaDTPA (пентацина) для удаления Pu²³⁹ из организма крыс при ингаляционном поражении // Медицинская радиология. 1965. № 1. С. 45–49.
24. Ballou J.E., Lloyd G.E., McDonald K.E., Buschbom R.L. Influence of inhaled Ca-DTPA on the long-term effects of inhaled Pu nitrate // Health Physics. 1977. Vol. 32 (June). P. 479–487.
25. Соколова А.Б., Ефимов А.В. Эффективность неотложной хелатотерапии для работников ПО «Маяк» в случае поступления актинидов через поврежденные покровы кожи // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 3. С. 74–82.
26. Roedler H.D., Nobke D., Ohlenschlager L. et al. Incorporation of ²⁴¹Am: effectiveness of late DTPA chelation therapy // Radiation Protection Dosimetry. 1989. Vol. 26, No 1/4. P. 377–379.

Поступила: 18.09.2025

Соколова Александра Борисовна - кандидат биологических наук, главный научный сотрудник, курирующий вопросы радиационной безопасности, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: sokolova@subi.su
ORCID: 0000-0002-6036-4178

Для цитирования: Соколова А.Б. Ключевые аспекты декорпорации плутония и америция в случаях их аварийного поступления персоналу радиационно опасных производств // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 4. С. 113–120. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-113-120

Key aspects of decapsulation of plutonium and americium in cases of emergency intake by personnel of radiation hazardous production facilities

Alexandra B. Sokolova

Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

In conditions of plutonium processing production, despite the achieved improvement of the radiation situation in the workplace, the probability of emergency situations leading to acute inhalation of radionuclides or their entry through damaged skin cannot be ruled out. In such cases, chelates are used to prevent radiation injuries or reduce the risk of their occurrence. The aim of this study was to examine domestic and foreign methodological documents and to determine the degree of completeness and sufficiency of the recommendations contained therein for the decapsulation of plutonium and americium with chelate. General recommendations for the use of chelate complexes presented in Publication No. 96 of the International Commission on Radiological Protection, documents of the International Atomic Energy Agency, as well as documents of the National Council on Radiation Protection and Measurements of the United States, and domestic Methodological Guidelines 2.6.1.034-2014 "Order of Interaction between enterprises of State Atomic Energy Corporation "Rosatom" and organs and organizations of FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and accidental inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes" were reviewed. Uniform requirements for the procedure for performing decapsulation in terms of the frequency of drug administration and the duration of the decapsulation course are not established by these documents; also, a uniform approach to determining the criterion for making a decision on the use of a chelate and the end of the decapsulation course has not been developed. At present, until uniform criteria for making a decision on the initiation of decapsulation therapy have been established, it is proposed to be guided by the principle of promptness and to begin decapsulation as soon as possible after the expected or known intake. Then, decapsulation tactics should be determined as information on dosimetric assessments becomes available, taking into account the health status of the affected worker, without excluding the possibility of delayed use of the chelate.

Key words: plutonium, americium, decapsulation, chelate, pentacine.

Acknowledgments

The author would like to thank the reviewers for their thorough analysis of the article.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interest in the conducting of the work and preparation of this article.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the Government contract "Industrial radiation and its long-term medical consequences" and the population of adjacent territories" №11.001.22.800 from 15.06.2025 code "Consequences 25–27", funded by the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

References

1. Rump A, Stricklin D, Lamkowsski A, Eder S, Abend M, Port M. Reconsidering current decapsulation strategies after incorporation of radionuclides. *Health Physics*. 2016;111(2): 204-211.
2. Singh VK, Romaine PLP, Seed TM. Medical countermeasures for radiation exposure and related injuries: characterization of medicines, FDA-approval status and inclusion into the strategic national stockpile. *Health Physics*. 2015;108(6): 607-630.
3. Ménétrier F, Grappin L, Raynaud P, Courtay C, Wood R, Joussineau S. Treatment of accidental intakes of plutonium and americium: Guidance notes. *Applied Radiation and Isotopes*. 2005;62(6): 829–846.
4. Li C, Kenbayeva Z, Dainiak N, Yepes-Nunez JJ, Zeeb H, Gill S. Development of Evidence-based Guidelines on Assessment and Management of Internal Contamination with Transuranic Actinides. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*. 2025;19: 156. DOI 10.1017/dmp.2025.10091.
5. Reis A, Sampaio C, Sousa W, Aguiar L, Bertelli L. Key topics for making decisions on decapsulation therapies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2024;200(7): 707-714. DOI 10.1093/rpd/ncae097.
6. Grappin L, Berard P, Menetrier F, Carbone L, Courtay C, Castagnet X. Treatment of actinide exposure: a review of Ca-DTPA injections inside CEA-COGEMA plants. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127(1-4): 435-439.
7. ICRP. Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack. ICRP Publication 96. *Annals of the ICRP*. 2005;35(1).
8. Kovtun VYu, Gladkikh VD, Davidovich YuA, Zhorova ES, Ogorodnikova VV, Belyaev IK, et al. On the use of dosage forms of pentacin and zincacine. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2015;60(1): 45-53 (In Russian).
9. IAEA. Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency, Emergency Preparedness and Response. EPR-MEDICAL. Vienna; 2005.
10. IAEA. Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency. Series EPR-Internal Contamination. Vienna; 2018.
11. NCRP REPORT No. 161. Management of persons contaminated with radionuclides. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (MD); 2008.

Alexandra B. Sokolova

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

Address for correspondence: 19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: sokolova@subi.su

12. 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.
13. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4).
14. IAEA. Safe Handling and Storage of Plutonium. Safety Reports Series No. 9. Vienna; 1998.
15. Wood R, Sharp C, Gourmelon P, Le Guen B, Stradling GN, Taylor DM, et al. Decorporation treatment – medical overview. *Radiation Protection Dosimetry*. 2000;87(1): 51-57.
16. Gerber GB, Thomas RG. Guidebook for the Treatment of Accidental Internal Radionuclide Contamination of Workers (joint publication for the Commission of the European Communities Directorate-General for Science, Research and Development, Radiation Protection Program, and the US Department of Energy). *Radiation Protection Dosimetry*. 1992;41(1): 27-36.
17. Toohey RE, Bertelli L, Sugarman SL, Wiley AL, Christensen DM. Dose coefficients for intakes of radionuclides via contaminated wounds. *Health Physics*. 2011;100(5): 508-514.
18. Carbaugh EH, Decker WA, Swint MJ. Medical and health physics management of a plutonium wound. *Radiation Protection Dosimetry*. 1989;26(1): 345-349.
19. Stradling GN, Taylor DM, Henge-Napoli M-H, Wood R, Silk TJ. Treatment for actinide-bearing industrial dusts and aerosols. *Radiation Protection Dosimetry*. 2000;87(1): 41-50.
20. Plotnikova LA, Baysogolov GD. The effect of pentacin and toxacin on the acceleration of plutonium elimination from the human body (Communication II). *Byulleten' radiatsionnoy meditsiny = Bulletin of Radiation Medicine*. 1963;1-a: 83-86 (In Russian).
21. Sokolova AB, Efimov AV. 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 Issues*. 2021;2: 70-80 (In Russian).
22. Foreman H. The Effect of Diethylenetriaminepentaacetic Acid (DTPA) on Acceleration of Excretion of Actinide Elements. *Health Physics*. 1962;8(6): 735-737.
23. Lyubchansky ER. Use of Na_3CaDTPA (pentacin) to remove Pu^{239} from the body of rats with inhalation damage. *Meditsinskaya radiologiya = Medical Radiology*. 1965;1: 45-49 (In Russian).
24. Ballou JE, Lloyd GE, McDonald KE, Buschbom RL. Influence of inhaled Ca-DTPA on the long-term effects of inhaled Pu nitrate. *Health Physics*. 1977;32(June): 479-487.
25. Sokolova AB, Efimov AV. Effectiveness of emergency chelation therapy for the Mayak PA personnel in case of actinide intake via damaged skin. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2019;3: 74-82 (In Russian).
26. Roedler HD, Nobke D, Ohlenschlager L, Schieferdecker H, Doerfel H, Renz K. Incorporation of ^{241}Am : effectiveness of late DTPA chelation therapy. *Radiation Protection Dosimetry*. 1989;26(1/4): 377-379.

Received: September 18, 2025

For correspondence: Alexandra B. Sokolova – Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher in Charge of Radiation Safety Issues, Science Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: sokolova@subi.su)
ORCID: 0000-0002-6036-4178

For citation: Sokolova A.B. Key aspects of decorporation of plutonium and americium in cases of emergency intake by personnel of radiation hazardous production facilities. *Radiatsionnaya Gygiene = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 4. P. 113–120. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-113-120