

М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, Ю.В. Абрамов, Г.П. Фролов, В.Н. Клочков, Б.А. Кухта, И.К. Теснов
ОПЕРАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОЖИ
В СЛУЧАЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

Контактное лицо: Саленко Юрий Анатольевич, salenkoua@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Разработка рекомендаций по применению в медицинской практике учреждений ФМБА России операционных величин загрязнения радиоактивными веществами (РВ) кожных покровов лиц, пострадавших в случае радиационных аварий (РА).

Материал и методы: В качестве операционных величин использованы легко измеряемые радиационные параметры: мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) γ -излучения, плотность загрязнения кожи γ -, β - и α -излучающими радионуклидами. Значения операционных величин загрязнения кожи РВ оценены на основании описанных в литературе экспериментальных данных и моделей по кинетике транспорта РВ в организме, принятых значений дозовых критериев для детерминированных и стохастических эффектов. Резорбция РВ через кожу оценена по результатам экспериментальных исследований на лабораторных животных (в основном, поросята) для ограниченного набора химических соединений радионуклидов.

Результаты: Представлены значения МАЭД γ -излучения основных дозообразующих радионуклидов, измеряемой на расстоянии 10 см от поверхности кожи в диапазоне значений 10–1000 мкЗв/ч, и соответствующие этим значениям возможные последствия для здоровья в результате облучения кожи и поступления РВ в организм. В рекомендациях МАГАТЭ уровень загрязнения кожи в 1 мкЗв/ч рассматривается как значимая операционная величина по критерию поступления РВ через рот с загрязненной поверхности кистей рук. Однако, по нашему мнению, эта оценка является излишне консервативной и не включена в рекомендуемые значения операционных величин. В случае загрязнения кожи растворами γ - β -излучающих радионуклидов с поверхностной плотностью загрязнения более 10^6 Бк/см² (МАЭД ≥ 1000 мкЗв/ч) требуется проведение, даже в приспособленных условиях, экстренной (в течение ближайших минут после установления факта загрязнения) санитарной обработки (СО) вне очереди. Обязательными показаниями для обследования пострадавших на спектрометре излучений человека (СИЧ) после тщательной СО и проведения биофизических исследований биопроб являются следующие значения операционных величин: МАЭД γ -излучения от кожи > 10 мкЗв/ч; поверхностная плотность загрязнения неповрежденной кожи β -активными нуклидами $> 20\,000$ Бк-час/(см²·мин); поверхностная плотность загрязнения неповрежденной кожи α -активными нуклидами > 200 α -час/(см²·мин).

Заключение: Рекомендуемые значения операционных величин позволяют предварительно и оперативно оценить угрозу для здоровья не только при внешнем (контактном) облучении кожи и подлежащих тканей, но и вследствие поступления растворимых форм РВ в организм через неповрежденную и поврежденную (травмированную) кожу. Учитывая большую степень неопределенности полученных оценок, значения операционных величин следует рассматривать как сугубо консервативные и использовать их только для оценки срочности выполнения СО пострадавших при оказании медицинской помощи в догоспитальный и ранний госпитальный периоды с обязательным проведением дальнейшего дозиметрического обследования для окончательной оценки поглощенной дозы.

Ключевые слова: радиационная авария, радиологический терроризм, загрязнение кожи радиоактивными веществами, операционные величины, санитарная обработка, медицинская помощь

Для цитирования: Грачев М.И., Саленко Ю.А., Абрамов Ю.В., Фролов Г.П., Клочков В.Н., Кухта Б.А., Теснов И.К. Операционные величины радиоактивного загрязнения кожи в случае радиационной аварии. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):20–6.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-20-26

Введение

Загрязнение радиоактивными веществами (РВ) кожных покровов персонала и лиц из населения является значимым фактором радиационного воздействия в случае аварийных ситуаций на производстве, инцидентах, связанных с хищением и нарушением целостности мощных закрытых радионуклидных источников (ЗРНИ). В современных условиях нельзя недооценивать наличие угроз радиологического терроризма, в частности, широко обсуждаемого сценария применения «грязной бомбы» [1].

Важным уроком, свидетельствующим о масштабных радиологических последствиях в результате попадания в селитебную зону бесхозного ЗРНИ, является крупнейший радиационный инцидент с хищением и последующей разгерметизацией источника цезия-137, произошедший в сентябре 1987 г. в бразильском городе Гояния и приведший к высоким уровням загрязнения кожных покровов лиц из населения [2].

Уже в самый начальный период после загрязнения РВ кожи (часы, а при высоких уровнях загрязнения – минуты) важно оценить вероятность не только проявления детерминированных эффектов облучения кожи, но и резорбцию растворимых форм радионуклидов через интактную или поврежденную, в результате механической травмы или ожога, кожу. Высокая плотность загрязнения кожи РВ в случае аварийного выброса является показанием к исследованию содержания радионуклидов внутри организма в результате ингаляционного поступления. При этом вероятность поступления РВ внутрь организма в значимых количествах также косвенно может быть первоначально оценена по загрязнению кожи и слизистых. И, наконец, загрязненная кожа (пальцы рук) может служить источником поступления радионуклидов через рот, особенно у детей.

Дополнительным методом, оценивающим возможное ингаляционное поступление РВ, является радиометрическое исследование мазков из носа.

С практической точки зрения этот метод не имеет каких-либо значимых преимуществ перед экспрессной оценкой результатов измерения загрязненности кожи с помощью приборов или перед использованием расчетных моделей для того или иного сценария аварийного выброса. Необходимо только отметить, что наличие в мазках из носа трансураниевых нуклидов (плутоний, америций) выше 10 Бк должно являться основанием для проведения тщательной обработки ротоглотки, дополнительных биофизических исследований, а также использования неинвазивных методов по предотвращению инкорпорации радионуклидов и ускорению их выведения из организма.

Материал и методы

На основании описанных в литературе экспериментальных данных и моделей по кинетике транспорта РВ в организме лабораторных животных и человека, принятых дозовых критериев детерминированных и стохастических эффектов были оценены значения операционных величин загрязнения кожи РВ. Рекомендуются операционные величины позволяют осуществлять первоначальную (экспрессную) оценку возможных последствий для здоровья лиц, вовлеченных в РА и оперативно принять решение об их СО и дозиметрическом обследовании. В диапазоне оцениваемых значений операционные величины могут быть использованы для основных дозообразующих γ - и β -излучающих нуклидов и их смесей, содержащихся в аварийном выбросе, или в мощных ЗРНИ при их разгерметизации. Кроме того, они обеспечивают достаточный запас (по величине дозы) для принятия решений о срочности (очередности) и дополнительном объеме проведения СО пострадавших, а также о необходимости их дальнейшего дозиметрического обследования.

К основным операционным величинам относятся:

- мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) γ -излучения (мкЗв/ч) на расстоянии 10 см от загрязненного участка кожи;
- плотность потока β -частиц (част/(см²·мин)) на расстоянии 1–2 см от кожи;
- плотность потока α -частиц (част/(см²·мин)) вплотную к коже;
- суммарное содержание изотопов плутония и америция (Бк) в местах повреждения кожных покровов на момент поступления радионуклида в рану.

Измерение МАЭД γ -излучения позволяет первоначально оценить поглощенную дозу в базальном слое эпидермиса или дерме кожи. Данный вид измерений следует применять преимущественно для оценки высоких уровней загрязнения кожи РВ, которые могут обусловить возникновение детерминированных эффектов и развитие местных лучевых поражений (МЛП) различной степени тяжести.

Измерения должны быть проведены в максимально короткие сроки после загрязнения кожи РВ (здравпункт предприятия, сортировочная площадка, специализированное приемное отделение лечебного учреждения) сразу после эвакуации пострадавших и населения из опасной зоны.

Рекомендуемые значения операционных величин были оценены для следующих основных путей облучения:

- облучение эпидермиса (базальный слой на глубине 70 мкм) и дермы (на глубине 300–500 мкм) в результате однократного контактного загрязнения кожи РВ;
- поступление растворимых форм радионуклидов в организм через неповрежденную и поврежденную кожу;
- поступление в организм смеси плутония и америция через колотые раны;
- загрязнение кожи радиоактивными аэрозолями как косвенный показатель, свидетельствующий о возможной ингаляции РВ в случае их оседания из облака выброса или при нахождении в помещении, где произошло диспергирование радиоактивного материала;
- загрязнение кожи РВ как показатель возможного поступления радионуклидов в организм через рот с загрязненной поверхности кожи.

Прогнозируемый уровень облучения кожи, равный 3 Гр за 2 сут, при котором необходимо срочное вмешательство (НРБ-99/2009), был установлен для эритемы, не являющейся опасным детерминированным эффектом. Для оценки облучения базального слоя эпидермиса кожи на глубине 70 мкм в диапазоне поглощенной дозы до 20 Гр и ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы в дерме кожи на глубине ~ 500 мкм в диапазоне 20–30 Гр с учетом вклада от фотонов, конверсионных электронов и β -частиц радионуклида использованы дозовые коэффициенты на единицу активности радионуклида на поверхности кожи [3].

Оценка загрязнения кожи растворимыми формами РВ при поступлении нуклидов через неповрежденную кожу была проведена на основе экспериментальных исследований по метаболизму продуктов ядерного деления в организме лабораторных животных [4, 5]. Для кожи, поврежденной в результате механической травмы, термического и химического ожога принималось, что все РВ, находящиеся в ране, поступят в кровь и в места депонирования.

Загрязнение кожи α -излучающими радионуклидами имеет значение в случае нарушения целостности кожи. В последние годы в статистике инцидентов (аварий) на радиационно опасных предприятиях значимое место занимают случаи нестандартного (раневого) поступления смеси изотопов плутония-239 и америция-241 в организм работников. В этом случае происходит быстрое (в течение 1–5 сут) поступление радионуклидов в лимфатическую систему и кровь с последующим отложением их в печени и скелете, в результате чего основная дозовая нагрузка приходится на печень, а также на клетки эндоста и, как следствие, – на красный костный мозг.

По результатам исследований ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России в качестве операционных величин загрязнения кожи суммой изотопов плутония и америция принимаются значения активности нуклидов в области раны, которые могут при поступлении в организм сформировать годовую ожидаемую эффективную дозу (ОЭД) в диапазоне от 5 до 200 мЗв [6, 7].

В случае оседания радиоактивных аэрозолей из облака выброса плотность поверхностного загрязнения открытых участков кожи может быть использована для оценки вероятности поступления радиоактивных аэрозолей в организм через органы дыхания. Для

оценки операционных величин загрязнения кожи РВ были приняты исходные данные, приводящие к наибольшим дозовым нагрузкам.

Эффективная доза 5 мЗв за первый год для ограничения потребления загрязненных пищевых продуктов в случае РА была использована в качестве критерия для оценки перорального поступления РВ в организм (НРБ-99/2009). Консервативно предполагается, что около 1 % радионуклидов, находящихся на коже, поступит через рот с загрязненных кистей рук. В качестве дозовых коэффициентов (Зв/Бк) использованы значения при поступлении РВ с пищей [8].

В табл. 1 представлены дозовые критерии и принятые допущения для оценки операционной величины загрязнения кожи РВ с учетом возможности формирования легких и тяжелых форм детерминированных эффектов облучения кожи и подлежащих мягких тканей.

Сравнительно новым подходом является использование результатов измерения загрязнения кожи РВ как показателя для предварительной оценки поступления радионуклидов в организм. В последнем случае в качестве дозовых критериев были использованы соответствующие значения эквивалентных доз

Таблица 1

Дозовые критерии и допущения для оценки облучения кожи и уровней ее радиоактивного загрязнения
Dose criteria and assumptions for assessing skin exposure and levels of radiation contamination

Доза/время облучения	Критерии	Методы расчета и допущения
3 Гр за 2-е сут (базальный слой эпидермиса)	Преходящая эритема	Для оценки контактного облучения кожи использованы дозовые коэффициенты (Гр/(Бк·с/см ²)) для базального слоя кожи на глубине 70 мкм (7 мг/см ²) [3]. Для оценки МАЭД γ -излучения площадь участка загрязнения кожи принята равной 100 см ² . Загрязнение носит однократный характер. Консервативно принимается, что оно сохраняется в течение 5 ч
8–12 Гр за 5 ч (базальный слой эпидермиса)	Первичная эритема. Основная (вторая волна) эритема. Сухая десквамация	
15–20 Гр за 5 ч (базальный слой эпидермиса)	Основная (вторая волна) эритема. Отек кожи и подкожно-жировой клетчатки, пузыри. Влажная десквамация	
25–30 Гр (дерма) за 5 ч	Отек, болевой синдром. Первичные радиационные язвы. Глубокие язвы не заживают без оперативного лечения	Для оценки облучения дермы использованы дозовые коэффициенты мощности ОБЭ-взвешенной дозы в дерме на единицу поверхностной активности радионуклида [3]. Значения использованных коэффициентов рассчитаны с учетом вклада от дискретных фотонов и их выходом на единицу ядерного распада, выхода конверсионных электронов и β -частиц с максимальной энергией. Оценка проведена из условия облучения 100 см ² кожи на глубине 400 мкм (40 мг/см ²)
≥30 Гр (дерма) за 5 ч	Отек, болевой синдром, местные кровоизлияния, первичный лучевой некроз	
50 мЗв/год (все тело, гонады, красный костный мозг); 150 мЗв/год (щитовидная железа, печень, почки, селезенка); 300 мЗв/год (костная ткань)	Эквивалентная доза в органе в результате резорбции растворимых форм радионуклидов через неповрежденную кожу и раневые поверхности с повреждением дермы, для оценки которой необходимо проведение дополнительных дозиметрических исследований	При попадании на кожу высокоактивных растворов радионуклидов уровни загрязнения поверхности кожи с учетом возможности резорбции в организм были оценены исходя из следующих допущений. Интakтная кожа: площадь загрязнения 100 см ² , характер загрязнения – однократное в течение 1 ч, коэффициенты резорбции (отношение активности на поверхности кожи к активности на глубине дермы 1000 мкм консервативно оценены по экспериментальным данным на животных [4]. Принимается, что все радионуклиды, находящиеся в толще дермы, поступят с кровью и лимфой в органы депонирования Поврежденная кожа: открытая механическая травма (ссадина) или термический ожог, площадь загрязнения (участок раны) 100 см ² , все радионуклиды, находящаяся в ране, однократно поступят в кровь в течение 1 ч. Оценки дозы проведены консервативно без учета выведения, что дополнительно может давать запас в величину оцениваемой дозы
5–50 мЗв/год	ОЭД в результате поступления изотопов плутония и америция через поврежденную кожу (наколы), используемая в качестве критерия оценки суммарной активности α -излучателей в области раны, при которой принимается решение об использовании метода комплекснотерапии (пентацин) [6] для ограничения облучения работника	
20–200 мЗв/год	ОЭД в результате поступления изотопов плутония и америция через поврежденную кожу (наколы), используемая в качестве критерия оценки суммарной активности α -излучателей в области раны, при которой принимается решение об использовании метода хирургического иссечения тканей [6] для ограничения облучения работника	
100 мЗв (~ за 10 сут)	Эффективная доза в результате ингаляции радиоактивных аэрозолей, оцениваемая по плотности загрязнения открытых участков тела (кожа шеи и лица), для оценки которой необходимо проведение дополнительных дозиметрических исследований	В случае попадания пострадавших под облако выброса, загрязнение РВ открытых участков кожи (шея, лицо) и одежды может быть использовано для приблизительных оценок значимости поступления радиоактивных аэрозолей в организм через органы дыхания. Значение эффективной дозы 100 мЗв было принято в качестве критерия, рекомендуемого международными нормами [9] для принятия решений о защитных мерах для населения, главным образом, для данного типа сценария радиологической ситуации. Консервативно были приняты исходные данные, приводящие к наибольшим дозовым нагрузкам. Расчеты проведены с использованием сертифицированной компьютерной программы RECASS NT (разработчик НПО «Тайфун»)
5 мЗв в первый год	Эффективная доза в результате попадания радионуклидов с поверхности загрязненных пальцев рук через рот. Данное значение является критерием для ограничения потребления продуктов питания в случае РА	Значение эффективной дозы 5 мЗв было принято в качестве критерия при пероральном поступлении радионуклидов. Консервативно предполагается, что около 1 % радионуклидов, находящихся на коже, поступит через рот с загрязненных пальцев рук. В качестве дозовых коэффициентов (Зв/Бк) использованы значения при поступлении с пищей для критических групп населения [9]

Таблица 2

Плотность поверхностного загрязнения кожи и соответствующие значения МАЭД γ -излучения на расстоянии 10 см от поверхности кожи, при которых в течение 5 ч поглощенная доза в базальном слое эпидермиса составит 1 Гр*

The density of surface contamination of the skin and the corresponding AEDR** values of gamma radiation at a distance of 10 cm from the skin surface, at which the absorbed dose in the basal layer of the epidermis will be 1 Gy for 5 hours*

Нуклид	Плотность загрязнения, создающая дозу в базальном слое эпидермиса 1 Гр за 5 ч, Бк/см ²	МАЭД от пятна 100 см ² на 10 см, мкЗв/ч
Cr-51	1,99E+08	1,18E+04
Co-60	1,92E+05	5,67E+02
Sr-90	6,32E+04	–
Zr-95	1,68E+05	1,60E+02
Ru-103	3,09E+05	2,12E+02
Ru-106	1,13E+05	3,01E+01
Cs-134	1,85E+05	3,72E+02
Cs-137	1,26E+05	9,42E+01
Ce-141	1,16E+05	1,15E+01
Ir-192	1,24E+05	1,31E+02
Ba-133	2,06E+06	1,39E+03
Cd-109	3,97E+05	1,63E+02
Hg-203	2,22E+05	6,61E+01
I-131	1,39E+05	6,89E+01
Te-132	8,42E+04	2,82E+02
Zn-65	8,30E+06	5,83E+03

Примечание: * В табл. 2 и 3 использованы дозовые коэффициенты из публикации МАГАТЭ [3]

** AEDR – ambient equivalent dose rate

или ОЭД, являющиеся пределом дозы для персонала или используемые в качестве уровней вмешательства для населения в случае РА.

Для проведения соответствующих оценок в табл. 2 и табл. 3 приведены значения плотности поверхностного загрязнения кожи γ -, β -излучающими нуклидами и МАЭД γ -излучения, создающие за 5 ч дозу 1 Гр (поглощенную в эпидермисе и ОБЭ-взвешенную поглощенную в дерме).

Результаты и обсуждение

В табл. 4 содержатся рекомендуемые значения операционных величин для предварительной оценки возможных последствий для здоровья в результате загрязнения РВ кожных покровов.

Для оценки дозы облучения кожи консервативно принималось, что РВ находятся на коже в течение 5 ч до начала проведения СО. Высокие и сверхвысокие (≥ 1000 мкЗв/ч) уровни радиационного воздействия, обусловленного загрязнением РВ кожи, могут иметь место у персонала и участников аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР). Необходимо учитывать возможные последствия внешнего и внутреннего облучения и другие, опасные для здоровья и жизни факторы РА (травмы, ожоги, отравление продуктами горения и др.). Так, имеющийся опыт лечения больных, пострадавших при аварии на ЧАЭС, свидетельствует, что местные лучевые поражения (МЛП) на-

Таблица 3

Плотность поверхностного загрязнения кожи и соответствующие значения МАЭД γ -излучения на расстоянии 10 см от поверхности кожи, при которых в течение 5 ч поглощенная доза в дерме кожи составит 1 Гр

The density of surface contamination of the skin and the corresponding AEDR values of gamma radiation at a distance of 10 cm from the skin surface, at which the absorbed dose in the dermis of the skin will be 1 Gy for 5 hours

Нуклид	Плотность загрязнения, создающая дозу в дерме 1 Гр за 5 ч, Бк/см ²	МАЭД от пятна 100 см ² на 10 см, мкЗв/ч
Na-24	1,54E+05	6,44E+02
Cr-51	1,43E+07	8,46E+02
Mn-54	4,28E+06	4,54E+03
Co-60	1,64E+06	4,83E+03
Sr-90	1,11E+05	0,00E+00
Zr-95	1,18E+06	1,13E+03
Ru-103	5,56E+06	3,81E+03
Ru-106	1,24E+05	3,27E+01
Cs-134	5,05E+05	1,01E+03
Cs-137	3,97E+05	2,96E+02
Ce-141	9,93E+05	9,89E+01
Ir-192	4,28E+05	4,53E+02
Ba-133	3,71E+06	2,50E+03
Cd-109	1,54E+07	6,92E+03
Ce-139	1,09E+07	2,95E+03
Co-58	2,93E+06	4,53E+03
Fe-59	1,24E+06	1,76E+03
Hg-203	3,09E+06	9,18E+02
I-131	5,05E+05	2,51E+02
Na-22	6,18E+05	1,68E+03
Sb-126	2,53E+05	8,66E+02
Te-132	1,85E+05	6,20E+02
Zn-65	5,56E+06	3,91E+03

блюдались в сочетании с радиационным поражением костного мозга [11] и в ряде случаев – в комбинации с термическими ожогами.

В ситуациях неконтролируемого загрязнения территории в случае разгерметизации мощного ЗРНИ или при использовании источников ионизирующего излучения с террористическими или криминальными целями также нельзя исключать опасные для здоровья и даже жизни высокие уровни загрязнения кожи РВ у лиц из населения.

Обязательными показаниями для проведения дозиметрического обследования пострадавших на СИЧ и проведения биофизических исследований биопроб являются:

- МАЭД γ -излучения от кожи > 10 мкЗв/ч;
- плотность поверхностного загрязнения¹ неповрежденной кожи β -излучающими нуклидами $> 20\,000$ β -част/(см²·мин) [10];
- плотность поверхностного загрязнения > 200 α -част/(см²·мин) для неповрежденной кожи [10].

В случае загрязнения кожи растворами γ - β -излучающих радионуклидов $\sim 10^6$ Бк/см² (МАЭД свыше 1000 мкЗв/ч) требуется проведение экстренной (в течение ближайших минут) СО по жизненным показателям.

¹Представительным значением является 200 000 β -част/(см²·мин), однако с учетом верхнего предела измерений большинства приборов, ограниченного, как правило 40–60 тыс. β -част/(см²·мин) предлагается использовать значение 20 000 β -част/(см²·мин).

Таблица 4

Операционные величины и уровни загрязнения кожи, в случае превышения которых возможны значимые последствия для здоровья

Operational values and levels of skin contamination, if exceeded, may have significant health consequences

Операционная величина и ее значение	Последствия для здоровья
МАЭД* на расстоянии 10 см от поверхности кожи равна 1000 мкЗв/ч	Необходимо учитывать возможное внешнее облучение, а также поступление РВ в организм персонала и лиц, вовлеченных в РА. При наличии на коже РВ в течение нескольких часов имеется высокая вероятность серьезных детерминированных эффектов облучения кожи с развитием МЛП средней и тяжелой степени тяжести (МЛП II – МЛП III). Крайне тяжелые поражения (глубокие некрозы с повреждением подкожной клетчатки, мышц, костей, а также внутренних органов) ожидаются при непосредственном, прямом и длительном контакте локальных участков тела с ЗРНИ. При значительной площади загрязнения РВ (свыше 1/3 поверхности тела) может развиваться ожоговая болезнь с ее типичными проявлениями и осложнениями. При вдыхании радиоактивных аэрозолей возможно облучение отдельных органов и тканей в дозах, превышающих пороги детерминированных эффектов. При резорбции растворимых форм нуклидов через локальный участок поврежденной кожи (~100 см ²) доза облучения органов и тканей может достигать значений порогов детерминированных эффектов; в случае неповрежденной кожи – ОЭД не превысит 50 мЗв/год. При наличии в выбросе радиоактивного йода поглощенная доза в щитовидной железе (ЩЖ) в результате ингаляции может достигнуть 10 Гр. У населения при поступлении РВ в организм с загрязненной кожи рук через рот возможно формирование ОЭД на уровне десятков мЗв/год
МАЭД на расстоянии 10 см от поверхности кожи равна 100 мкЗв/ч	Необходимо учитывать возможное внешнее облучение, а также поступление РВ в организм и внутреннее облучение персонала и лиц, вовлеченных в РА. При наличии на коже РВ в течение нескольких часов возможно развитие МЛП I – II степени тяжести. При вдыхании радиоактивных аэрозолей возможно облучение отдельных органов и тканей в дозах на уровне порогов детерминированных эффектов. При резорбции растворимых форм нуклидов через поврежденную кожу в зависимости от характера и площади повреждения ОЭД может превысить 100 мЗв/год. При наличии в выбросе радиоактивного йода поглощенная доза в ЩЖ в результате ингаляции может достигнуть 1 Гр. У населения (особенно у детей) необходимо учитывать возможность поступления РВ в организм с загрязненной кожи через рот. Консервативно оцениваемая ОЭД может превысить 5 мЗв/год
МАЭД на расстоянии 10 см от поверхности кожи равна 10 мкЗв/ч	Наличие РВ на коже в течение нескольких дней может обусловить возникновение легкой эритемы на наиболее загрязненных и/или чувствительных участках кожи. ОЭД в результате ингаляции может до двух раз превысить 100 мЗв. В случае нахождения в выбросе радиоактивного йода, поглощенная доза в ЩЖ может достигнуть или незначительно превысить 100 мГр. При резорбции растворимых форм нуклидов через поврежденную кожу ОЭД не превысит 20–50 мЗв/год. Необходимо учитывать возможность поступления РВ в организм с загрязненной кожи через рот
Уровень загрязнения кожи равен 20 000 β-част/(см ² ·мин) (~1мкЗв/ч)	Наличие РВ на коже в течение нескольких дней может привести к формированию дозы на базальный слой эпидермиса на уровне пределов доз для персонала. При наличии радиоактивного йода в составе газо-аэрозольного выброса, осевшего на открытые участки кожи, нельзя исключить формирование дозы на ЩЖ выше 50 мЗв. Сохраняется потенциальная опасность формирования дозы внутреннего облучения при попадании на поврежденную кожу растворимых форм РВ. Данный уровень загрязнения является показанием для неотложной (в течение 45 минут от момента загрязнения), специальной медицинской обработки раны [10]. Необходимо учитывать возможность поступления РВ в организм с загрязненной кожи через рот. Показано назначение соответствующих комплексобразователей, антагонистов и слабительных
Суммарная активность изотопов плутония и америция в ране составляет 10–100 Бк	В случае попадания РВ в организм через рану и наколы оцененные значения ОЭД находятся в диапазоне 5–50 мЗв/год [6]
Суммарная активность изотопов плутония и америция в ране составляет 40–400 Бк	В случае попадания РВ в организм через рану и наколы оцененные значения ОЭД находятся в диапазоне 20–200 мЗв/год [6]

Примечание: * — значение МАЭД 10 000 мкЗв/ч рассматривается как уровень загрязнения кожи РВ, представляющий угрозу для жизни

ниям сразу после установления факта загрязнения². В случае невозможности проведения полной СО, в том числе в связи с тяжелым состоянием пострадавшего – выполняется частичная СО открытых участков тела и снятие (срезание) загрязненной одежды одновременно с оказанием неотложной медицинской помощи. Полная СО выполняется на следующем этапе оказания медицинской помощи как можно скорее. Отсрочка (более 15 мин) в проведении частичной СО

в связи с необходимостью транспортирования пострадавшего в санпропускник не оправдана.

В случае раневого поступления α-излучающих радионуклидов превышение 10 Бк по суммарной активности плутония и америция в ране является основанием (показанием) для проведения специальных медицинских мероприятий по обработке раны и предотвращению поступления радионуклидов в кровь. Суммарная (оцененная) активность радионуклидов в ране свыше 40 Бк является показаниями к инвазивным методам декорпорации, включая иссечение

² 1 Бк/см² ~ 25 част/(см²·мин)

Таблица 5

Уровни радиоактивного загрязнения открытых участков кожных покровов для ограничения разнеса радиоактивных веществ

Levels of radioactive contamination of exposed areas of the skin to limit the spread of radioactive substances

Уровни радиоактивного загрязнения кожных покровов, β -част/(см ² ·мин)	Основные медико-санитарные мероприятия
До 20 000 и выше	Лицам из населения, имеющим данный уровень радиоактивного загрязнения кожи и одежды, должно быть обеспечено первоочередное прохождение СО и полное переодевание в здравпункте, в пункте специальной обработки (ПУСО) или в специально оборудованных помещениях и площадках. Стандартом следует считать проведение полной или частичной (с переодеванием) СО не позднее 1–2 ч после загрязнения (выявления загрязнения) РВ, возникшего в результате газо-аэрозольного выброса или диспергирования РВ. При загрязнении кожи растворами РВ полная СО проводится как можно быстрее (не позднее 15 мин после загрязнения, вне очереди). При наличии травм и обширных повреждений кожи СО проводится при участии и под контролем медицинского персонала после или одновременно с оказанием неотложной медицинской помощи. На догоспитальных этапах откладывать оказание неотложной медицинской помощи пострадавшим до момента окончания процедур первоначального радиационного контроля и СО является недопустимым. Окончательная оценка загрязнения РВ ран проводится в медицинском учреждении с последующей специальной обработкой ран и проведением в случае необходимости дальнейших мероприятий по декорпорации РВ. Целесообразно проведение клинко-дозиметрического обследования в специализированном медицинском учреждении (с учетом условий, при которых произошло загрязнение РВ кожи). При наличии в составе газо-аэрозольного выброса радиоактивного йода необходимо провести йодную профилактику*. Снять и поместить в пластиковый контейнер одежду, отправить ее на дополнительное исследование
До 2000	Лица из населения, имеющие данный уровень радиоактивного загрязнения кожи и одежды, в обязательном порядке проходят СО и замену загрязненной одежды и обуви в здравпункте, в пункте специальной обработки (ПУСО) или в специально оборудованных помещениях и площадках. СО персонала, включая персонал, участвующий в проведении АСДНР, проводится в конце рабочей смены. При загрязнении кожи и/или спецодежды растворами РВ, персонал прекращает работу и направляется на СО не позднее 1 ч после загрязнения. СО тяжело пострадавших может проводиться непосредственно в медицинском учреждении. Оценка загрязнения РВ ран проводится в медицинском учреждении с последующей специальной обработкой ран (при необходимости)
До 200	В случае большого количества людей, подвергшихся загрязнению РВ, и невозможности проведения СО в централизованном порядке часть лиц из населения может выйти за пределы установленной зоны и пройти СО дома. При этом им должны быть даны рекомендации о сроках и способе ее проведения

Примечание: * – Йодная профилактика имеет приемлемую эффективность спустя 2–4 ч и может сохраняться до 24 ч после ингаляции радиоактивного йода. Наибольшая эффективность наблюдается в случае приема внутрь йодистого калия (таблетка 0,125 г для взрослых) за 1–2 ч до начала ингаляции

загрязнённых тканей, а при неэффективности иссечения – к ампутации (в случае травмирования дистальных фаланг кистей рук).

В табл. 5 даны уровни загрязнения кожи РВ, при которых следует проводить мероприятия по ограничению распространения (разнеса) радиоактивного загрязнения и принимать решения о необходимости дополнительного дозиметрического обследования пострадавших.

Регламентируемые допустимые уровни (НРБ-99/2009) радиоактивного загрязнения неповрежденных кожных покровов персонала (200 β -част/(см²·мин) для β -активных нуклидов³ и 2 α -част/(см²·мин) для α -активных нуклидов) следует рассматривать в качестве значений загрязнения РВ для аварийных условий, не требующих проведения СО после переодевания.

Заключение

Рекомендуемые значения операционных величин позволяют предварительно и оперативно оценить угрозу для здоровья не только при внешнем (контактном) облучении кожи и подлежащих тканей, но и вследствие поступления РВ растворимых форм в организм через неповрежденную и поврежденную кожу. Учитывая большую степень неопределенности полученных оценок, значения операционных величин следует рассматривать как сугубо консервативные и использовать их только для оценки срочности выпол-

нения СО пострадавших при оказании медицинской помощи в догоспитальный и ранний госпитальный периоды с обязательным проведением дальнейшего дозиметрического обследования для окончательной оценки формируемой дозы.

На основании результатов измерений и сравнения их с рекомендуемыми значениями операционных величин медицинский персонал должен:

- выполнить назначение соответствующих медицинских процедур;
- определить индивидуальные рекомендации по мерам профилактики радиационных поражений и порядок эвакуации на следующий этап оказания медицинской помощи;
- определить порядок санитарно-пропускного режима в палатах (отделениях), где находятся пострадавшие;
- выработать дальнейшую тактику обследования пострадавших с учетом консультаций со специалистами по радиационной безопасности;
- сформулировать предварительный диагноз и подготовить экстренное извещение, особенно в случае вероятности облучения в результате поступления РВ в организм.

Все вышеперечисленные срочные (неотложные) и первоочередные санитарно-гигиенические и медицинские мероприятия должны быть выполнены на соответствующих этапах оказания первичной медико-санитарной помощи пострадавшим в полном объеме и в оптимальные сроки.

³ Для ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y 40 част/(см²·мин)

Operational Values of Radioactive Skin Contamination in the Case of Radiological Accident

M.I. Grachev, Yu.A. Salenko, Yu.V. Abramov, G.P. Frolov, V.N. Klochkov, B.A. Kukhta, I.K. Tesnov

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: Development of recommendations on the use in medical practice of institutions under FMBA of Russia of operational values of radioactive skin contamination in the event of radiological accidents.

Material and methods: The easily measured radiation parameters were used as operational values: ambient dose equivalent rate (ADER) of γ -radiation, density of skin contamination with γ -, β - and α -emitting radionuclides. Operational values of skin contamination were estimated on the basis of experimental data described in the literature and models on the kinetics of radioactive substances transport in the body, accepted values of dose criteria for deterministic and stochastic effects. The estimation of radioactive material resorption through the skin was based on the results of experimental studies in laboratory animals (mainly piglets) for a limited set of chemical compounds of radionuclides.

Results: The values of γ -ADER of the main dose-forming radionuclides measured at a distance of 10 cm from the skin surface in the range of 10–1000 $\mu\text{Sv/h}$ and the possible health effects due to the skin exposure and the intake of radioactive substances into the body were presented. In the IAEA recommendations, the level of skin contamination at 1 $\mu\text{Sv/h}$ is considered as a significant operational value according to the criterion of radioactive substances intake through the mouth from the contaminated surface of the hands. However, in our opinion, this estimate is excessively conservative; therefore it is not included in the recommended operational values. If the skin is contaminated with γ - β -emitting radionuclide solutions at a surface contamination higher than 10^6 Bq/cm^2 ($\text{ADER} \geq 1000 \mu\text{Sv/h}$), the out of turn emergency decontamination should be carried out. Obligatory indications for the whole body counter examination after thorough decontamination and conducting biophysical analysis of bioassay are the following operational values: γ -ADER from the skin $> 10 \mu\text{Sv/h}$; surface contamination of intact skin with β -active radionuclides $> 20\,000 \beta\text{-part./cm}^2\cdot\text{min}$; surface contamination of intact skin with α -active radionuclides $> 200 \alpha\text{-part./cm}^2\cdot\text{min}$.

Conclusion: The recommended operational values allow preliminarily and promptly to assess the health risk not only in the case of external (contact) exposure of the skin and underlying tissues, but also due to the intake of soluble radioactive substances into the body through intact and damaged (injured) skin. Taking into account the high degree of uncertainty of the estimates obtained, the operational values should be considered as strictly conservative. They should be used only to determinate of urgency of decontamination carrying out for the provision of medical care during the prehospital and early hospital periods with the obligatory follow-up dosimetry examination for the final assessment of absorbed dose.

Key words: radiological accident, radiological terrorism, radioactive skin contamination, operational values, decontamination, medical assistance

For citation: Grachev MI, Salenko YuA, Abramov YuV, Frolov GP, Klochkov VN, Kukhta BA, Tesnov IK. Operational Values of Radioactive Skin Contamination in the Case of Radiological Accident. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):20–6. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-20-26

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Грачев М.И. и др. Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму. Под ред. Л.А. Ильина. М. 2018. 392 с. [Grachev MI, et al. Medical Aspects of Countering Radiological and Nuclear Terrorism. Moscow. 2018. 392 p. (In Russ.).]
2. The Radiological Accident in Goiania. Vienna: IAEA. 1988. 149 p.
3. Dangerous Quantities of Radioactive Material (D-values). Vienna: IAEA. 2006. 145 p.
4. Ильин Л.А. и др. Радиоактивные вещества и кожа (метаболизм и дезактивация). М.: Атомиздат. 1972. 304 с. [Ilyin LA, et al. Radioactive substances and skin (metabolism and decontamination). Moscow. 1972. 304 p. (In Russ.).]
5. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Под ред. В.С. Калистратовой. М. 2012. 464 с. [Kalistratova VS, ed. Radiobiology of incorporated radionuclides. Moscow. 2012. 464 p. (In Russ.).]
6. МУ 2.6.5.029–2016. Индивидуальный дозиметрический контроль при раневом поступлении плутония и америция. Общие требования. Методические указания. [MU 2.6.5.029–2016. Individual dosimetric control in the event plutonium and americium enter the wound. General requirements. Guidelines. (In Russ.).]
7. 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. Методические указания. [MU 2.6.1.034–2014. The procedure for interaction between the enterprises of Rosatom State Corporation and the bodies and organizations of the FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and emergency inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes. Guidelines. (In Russ.).]
8. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Requirements No. GSR Part 7. Vienna: IAEA. 2015. 102 p.
9. General procedures for assessment and response during a radiological emergency. IAEA-TECDOC-1162. Emended version, 2013. Vienna: IAEA. 2000. 183 p.
10. Операционные радиационные и медицинские критерии для введения неотложных мер защиты в случае радиационной аварии на ФГУП «СевРАО». Методические рекомендации. 2008. [Operational radiation and medical criteria for urgent protective measures in the event of a radiation accident at FSUE SevRAO. Guidelines. 2008. (In Russ.).]
11. Петушков В.Н. и др. Хирургические проблемы лечения больных, пострадавших в аварии на ЧАЭС. Ближайшие и отдаленные последствия радиационной аварии на Чернобыльской АЭС. Сб. м-в Всесоюз. симпозиума, 25–26.06.1987. М. 1987. 521–5. [Petushkov VN, et al Surgical problems of treating patients affected by the Chernobyl accident. In: Immediate and long-term consequences of a radiation accident at the Chernobyl NPP: Proceed. of the All-Union Symposium, June 25–26; 1987. М. 1987. 521–5. (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.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов. **Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 17.09.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020. **Article received:** 17.09.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.