

DOI: 10.21870/0131-3878-2016-25-4-111-125

Облучение экспериментальных животных активированной нейтронами радиоактивной пылью: разработка и реализация метода – первые результаты международного многоцентрового исследования

Степаненко В.Ф.¹, Рахыпбеков Т.К.², Каприн А.Д.³, Иванов С.А.¹, Отани К.⁴, Эндо С.⁴, Сато К.⁴, Кавано Н.⁴, Такатсуджи Т.⁵, Накашима М.⁵, Шичиджо К.⁵, Сакагучи А.⁶, Като Х.⁶, Онда Ю.⁶, Фуджимото Н.⁴, Тойода Ш.⁷, Сато Х.⁸, Колыженков Т.В.¹, Петухов А.Д.¹, Дюсупов А.А.², Чайжунусова Н.Ж.², Сайкенов Н.Б.², Узбеков Д.Е.², Саимова А.Ж.², Шабдарбаева Д.М.², Пивина Л.Н.², Скаков М.К.⁹, Вурим А.Д.⁹, Гныря В.С.⁹, Азимханов А.С.⁹, Колбаенков А.Н.⁹, Жумадилов К.С.¹⁰, Кайрханова Ы.О.², Яськова Е.К.¹, Белуха И.Г.¹, Скворцов В.Г.¹, Иванников А.И.¹, Хайлов А.М.¹, Ахмедова У.А.¹, Богачева В.В.¹, Анохин Ю.Н.¹, Орленко С.П.¹, Хоши М.⁴

¹ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, Обнинск;

² Государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Республики Казахстан, Семей, Республика Казахстан;

³ ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, Обнинск;

⁴ Университет Хиросимы, Хиросима, Япония;

⁵ Университет Нагасаки, Нагасаки, Япония;

⁶ Университет Цукубы, Цукуба, Япония;

⁷ Университет науки Окаямы, Окаяма, Япония;

⁸ Университет медицинских наук префектуры Ибараки, Ибараки, Япония;

⁹ Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан;

¹⁰ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан

При ядерных испытаниях в нижних слоях атмосферы, а также при атомной бомбардировке, в результате нейтронной активации химических элементов в составе почвы образуются бета- и гамма-излучающие радионуклиды. Радионуклид ^{56}Mn ($T_{1/2}=2,58$ ч) – один из основных нейтронно-активированных бета-излучателей в течение первых часов после нейтронной активации частиц почвенной пыли, поднявшейся в момент ядерного взрыва. Эффекты облучения остаточной радиоактивностью, образовавшейся в результате ядерных взрывов, являются предметом обсуждения и исследований последствий ядерных испытаний и атомных бомбардировок. Экспериментальное моделирование облучения лабораторных животных остаточной радиоактивностью в пылевых частицах почвы можно осуществить с использованием нейтронно-активированного ^{56}Mn в виде порошка. Нейтронная активация порошкообразного MnO_2 проведена на ядерном реакторе ИВГ.1М (экспериментальная установка «Байкал-1», Курчатов, Казахстан) при флюенсе нейтронов 4×10^{14} н/см². Полученный активированный порошок с ^{56}Mn был распылён пневматической системой над экспериментальными животными (крысы линии Вистар), которые находились в специальном боксе. Начальная активность распылённого порошка была равна $2,74 \times 10^8$ Бк. Облучение проведено в двух вариантах – в первом из них в боксе имелся только воздушный фильтр для обеспечения дыхания животных. Во втором варианте была осуществлена принудительная вентиляция бокса. После распыления порошка было выполнено измерение активности ^{56}Mn в органах и тканях экспериментальных крыс. Применённое оборудование было откалибровано в МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России (Обнинск) с использованием стандартного источника ^{56}Mn , полученного путём нейтронной активации на исследовательском ядерном реакторе. Расчёт поглощённых долей энергии в органах и тканях крыс был проведён в МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России (Обнинск) с помощью програм-

Степаненко В.Ф.* – зав. лаб., д.б.н., проф.; Иванов С.А. – зам. директора по научн. и лечебн. работе, д.м.н.; Колыженков Т.В. – с.н.с., к.б.н.; Петухов А.Д. – н.с.; Яськова Е.К. – в.н.с., к.б.н.; Белуха И.Г. – в.н.с., к.б.н.; Скворцов В.Г. – зав. лаб., к.б.н.; Иванников А.И. – в.н.с., к.ф.-м.н.; Хайлов А.М. – с.н.с., к.т.н.; Ахмедова У.А. – инж.; Богачева В.В. – инж.; Анохин Ю.Н. – с.н.с., к.м.н.; Орленко С.П. – н.с. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России. Каприн А.Д. – ген. директор, чл.-корр. РАН, д.м.н., проф. ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России. Рахыпбеков Т.К. – ректор, д.м.н., проф.; Дюсупов А.А. – проректор по научно-клинической работе, к.м.н.; Чайжунусова Н.Ж. – д.м.н., проф.; Сайкенов Н.Б. – доцент, к.м.н.; Узбеков Д.Е. – н.с., к.м.н.; Саимова А.Ж. – н.с., к.м.н.; Шабдарбаева Д.М. – зав. кафедрой, д.м.н., проф.; Пивина Л.Н. – ассоциированный проф., к.м.н.; Кайрханова Ы.О. – н.с., к.м.н. ГМУ Минздрава РК. Отани К. – проф.; Эндо С. – проф.; Сато К. – проф.; Кавано Н. – проф.; Фуджимото Н. – проф.; Хоши М. – проф. Университет Хиросимы, Япония. Такатсуджи Т. – проф.; Накашима М. – проф.; Шичиджо К. – проф. Университет Нагасаки, Япония. Сакагучи А. – проф.; Като Х. – проф.; Онда Ю. – проф. Университет Цукубы, Япония. Тойода Ш. – проф. Университет науки Окаямы, Япония. Сато Х. – проф. Университет мед. наук префектуры Ибараки, Япония. Скаков М.К. – зам. ген. директора по науке, д.ф.-м.н., проф., академик КазНАЕН; Вурим А.Д. – зам. директора по испытаниям, к.ф.-м.н.; Гныря В.С. – начальник КИР «Байкал-1»; Азимханов А.С. – зам. начальника КИР «Байкал-1»; Колбаенков А.Н. – гл. специалист по реакторам и техническим вопросам. НЯЦ РК. Жумадилов К.С. – проф. ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, РК.

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 4. Тел.: (484) 399-70-02; e-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru.

мы Монте-Карло (версия MCNP-4C) с соответствующими библиотеками ядерных констант для электронов и гамма-квантов и математического фантома экспериментальной крысы. Оценки доз внутреннего облучения были выполнены на основе результатов измерений активности ^{56}Mn в органах и тканях экспериментальных животных и рассчитанных величин поглощённых долей внутреннего облучения фотонами и электронами. Первые результаты этого международного многоцентрового исследования показали, что наиболее облучаемые органы и ткани экспериментальных крыс следующие: толстый кишечник, тонкий кишечник, желудок, лёгкие и кожа. Накопленные поглощённые дозы внутреннего облучения для первого варианта облучения (без принудительной вентиляции) равны 1,65 Гр, 1,33 Гр, 0,24 Гр, 0,1 Гр и 0,076 Гр – для толстого кишечника, тонкого кишечника, желудка, лёгких и кожи соответственно. Для второго варианта облучения (с принудительной вентиляцией) накопленные поглощённые дозы внутреннего облучения равны 0,45 Гр, 0,15 Гр, 0,11 Гр, 0,03 Гр и 0,073 Гр – для толстого кишечника, тонкого кишечника, желудка, лёгких и кожи соответственно. Полученные оценки доз внутреннего облучения от активированного нейтронами ^{56}Mn в виде порошка, распылённого над экспериментальными животными, будут использованы для исследования и интерпретации биологических эффектов от такого вида облучения, что станет предметом будущих публикаций.

Ключевые слова: нейтронная активация, ^{56}Mn , радиоактивная пыль, вдыхание радиоактивной пыли, поступление в организм радиоактивной пыли, радиационная безопасность, экспериментальные крысы, дозиметрия внутреннего облучения, метод Монте-Карло, дозы внутреннего облучения.

Введение

С помощью дозиметрических систем DS86 и DS02 оценены дозы облучения населения Хиросимы и Нагасаки от первоначального нейтронного и гамма-излучения при атомной бомбардировке [1, 2], однако, весьма небольшое внимание было уделено оценкам доз, обусловленных воздействием остаточной радиоактивности. Проблема определения значимости облучения при поступлении в организм радионуклидов от нейтронно-активированных диспергированных материалов и поднятой радиоактивной почвенной пыли до настоящего времени является предметом дискуссий: всё ещё нет полного понимания медицинских последствий для людей, которые попали в города Хиросиму и Нагасаки вскоре после атомной бомбардировки, но не находились там в момент ядерных взрывов [3-5]. Относительно высокие радиационные риски были установлены на большом расстоянии от эпицентра атомной бомбардировки в Хиросиме, где дозы, в соответствие с Дозиметрическими Системами 1986 и 2002 гг., были менее чем 80 мГр [6, 7]. Оценка бета-облучения является предметом особого внимания, поскольку известно, что у людей, которые попали в эпицентр взрыва вскоре после атомной бомбардировки Хиросимы, были отмечены различные синдромы, схожие с острыми радиационными эффектами, – например, сообщалось о случаях эпиляции у этих людей [3, 8, 9]. Была выявлена высокая частота эпиляции волосяного покрова головы на относительно больших расстояниях от эпицентра взрыва (более 2 км) в Хиросиме [10].

Основными нейтронно-активированными радионуклидами в поверхностных частицах почвы при ядерных взрывах в атмосфере, дающими вклад в дозу от внешнего бета- и гамма-облучения остаточной радиоактивностью, являются: ^{24}Na , ^{28}Al , ^{31}Si , ^{32}P , ^{38}Cl , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{46}Sc , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{134}Cs [11]. Радионуклид ^{56}Mn ($T_{1/2}=2,58$ ч) – один из основных нейтронно-активированных бета-излучателей в течение первых часов после нейтронной активации частиц почвенной пыли [9, 11, 12]. Бета-частицы ^{56}Mn со средней энергией 829,21 кэВ (100%) и максимальной энергией 2848 кэВ имеют средний пробег в биологической ткани 0,33 см. Основные линии спектра проникающего гамма-излучения ^{56}Mn следующие: 846,8 кэВ (98,9%), 1811 кэВ (27,2%), 2113 кэВ (14,3%), 2598 кэВ (17,3%).

Цель настоящего международного многоцентрового исследования – экспериментальное моделирование облучения экспериментальных животных активированной нейтронами радиоактивной почвенной пылью: разработка и реализация соответствующего метода и получение первых результатов оценок доз внутреннего облучения экспериментальных животных. Был предложен следующий эксперимент: активировать реакторными нейтронами (при флюенсе нейтронов, равном флюенсу в эпицентре взрыва атомной бомбы в Хиросиме) порошок MnO_2 для получения в его составе ^{56}Mn , а затем распылить его над экспериментальными крысами – для оценок доз внутреннего облучения животных от облучённых активированным нейтронами ^{56}Mn в виде диспергированного порошка. Результаты оценок доз внутреннего облучения будут использованы для исследования и интерпретации биологических эффектов такого вида облучения, что явится предметом будущих публикаций.

Материалы и методы

^{56}Mn ($T_{1/2}=2,58$ ч) был получен путём нейтронной активации 100 мг порошка MnO_2 (Rare Metallic Co., Ltd., Japan) на ядерном реакторе ИВГ.1М («Байкал-1») при флюенсе нейтронов 4×10^{14} н/см² и времени облучения 2000 с. Этот флюенс приблизительно соответствует флюенсу нейтронов при атомной бомбардировке Хиросимы [1, 2]. Ядерный реактор «Байкал-1» находится на Семипалатинском ядерном полигоне, в 70 км от г. Курчатова и в 150 км от г. Семипалатинск, Казахстан [13]. Эксперимент был рассмотрен и утверждён Этическим комитетом Государственного медицинского университета г. Семей, Казахстан (Протокол № 5 от 16.04.2014 г.), в соответствии с Директивой Европейского парламента по защите животных, используемых для научных целей [14, 15]. Активированный порошок ^{56}Mn был пневматически распылён над крысами-самцами линии Вистар, которые находились в специальном боксе (см. ниже раздел «Результаты»). Начальная активность распылённого порошка составила $2,74 \times 10^8$ Бк. Облучение проведено в двух вариантах – в первом из них в боксе имелся только воздушный фильтр для обеспечения дыхания животных. Во втором варианте была осуществлена принудительная вентиляция. Для оценки доз внутреннего облучения были использованы экспериментальные крысы со средней массой всего тела (229 ± 8) г с неопределённостью 1 SD (число использованных в эксперименте животных – 12). Через 6 мин после окончания нейтронной активации была начата экспозиция экспериментальных животных порошком ^{56}Mn . Крысы подвергались облучению радиоактивным порошком в течение 3,5-4 часов (начиная с момента распыления порошка ^{56}Mn до момента умерщвления животных). Животные были умерщвлены путём внутрибрюшинного введения большой дозы пентобарбитала. После смерти крыс их органы и ткани были хирургически выделены для измерений активности ^{56}Mn . Образцы органов и тканей были размещены на дне стандартных пластиковых пробирок, взвешены на электронных весах, а затем были проведены измерения активности ^{56}Mn . Расстояния между передними поверхностями блоков детекторов и измеряемыми образцами были равны 50 мм. Объёмы экстрагированных биологических образцов были малы (< 1 мл), так что эти образцы рассматривались как точечные источники излучения (по сравнению с расстояниями до детекторов и размерами детекторов). Учитывая короткий период полураспада ^{56}Mn , все измерения активности в органах и тканях экспериментальных животных были выполнены в течение 3,75-6 часов после начала экспозиции крыс радиоактивным порошком. Измерения проведены в изолированной комнате с пониженным уровнем естественного гамма-фона. Это помещение было экранировано от остальных комнат бетонными

стенами, полом и потолком с толщиной в диапазоне от 35 см (пол и потолок) до 50 см (стены). Для быстрой радиометрии (в силу короткого периода полураспада ^{56}Mn) был использован прибор RadiHoriba (Model PA-1000, Horiba. Ltd, Kyoto, Japan) с высокочувствительным CsI(Tl) сцинтилляционным детектором (диапазон энергий 150-1250 кэВ, 1000 имп/мин при 1 мкЗв/ч в диапазоне 0,001-9,999 мкЗв/ч). Длительность каждого измерения для каждого образца была ограничена 100 с из-за короткого периода полураспада ^{56}Mn . Результаты радиометрии были верифицированы путём сравнения с результатами спектрометрии нескольких биологических образцов крысы. Для этой цели были использованы гамма-спектрометр InSpector 1000TM (Canberra) со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) 51×51 мм и гамма-спектрометр AMPTEK, Inc. со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) 76×76 мм. Радиометрические измерения были проведены в образцах следующих органов и тканей: печень, сердце, почки, язык, лёгкие, пищевод, желудок, тонкий кишечник, толстый кишечник, трахея, глаза и кожа. Измеренная удельная активность ^{56}Mn (выраженная в Бк на единицу массы образца свежей ткани или органа) в органах и тканях крысы была пересчитана с моментов измерения активности на момент начала облучения животных с учётом периода физического полураспада ^{56}Mn .

Накопленные дозы внутреннего облучения были оценены для периода времени от момента начала облучения до бесконечности (до полного распада ^{56}Mn). Для расчётов поглощённых долей бета- и гамма-облучения органов, тканей и всего тела крысы (см. формулу (1) ниже) была использована программа Монте-Карло (MCNP-4C) с соответствующими библиотеками ядерных констант для электронов и гамма-квантов и возрастозависимый математический фантом экспериментальной крысы [16, 17]. Было принято, что химический состав и плотность органов и тканей крыс аналогичны таковым для человеческого организма [18]. Предполагалось, что радионуклид равномерно распределён в органах и тканях. Это означает, что накопленная доза внутреннего облучения является средней дозой в объёмах рассматриваемых органов и тканей. Для расчётов спектр бета-излучения ^{56}Mn был аппроксимирован 20-тью энергетическими линиями электронов с использованием данных Radiation Dose Assessment Resource (RADAR) [19]. Данные энергетические линии были использованы в процессе расчётов поглощённых долей для бета-частиц ^{56}Mn . Компоненты гамма-излучения ^{56}Mn также были учтены при расчётах доз внутреннего облучения [20].

Оценки поглощённых доз внутреннего облучения были выполнены на основе результатов измерений активности ^{56}Mn в органах и тканях крыс, а также на основе расчётов поглощённых долей (см. формулу (1) ниже). При расчётах доз внутреннего облучения были использованы подход и формализм Medical Internal Radiation Dose Committee (MIRD) [21]:

$$D_T = k \times m_T^{-1} \times \sum_S N_S \sum_i f_i \times E_i \times F_{i(T \leftarrow S)}, \quad (1)$$

где D_T – накопленная поглощённая доза внутреннего облучения в органе-мишени «Т» (мГр); k – константа (соотношение между различными единицами) – $1,602 \times 10^{-10}$ (мГр×кг)/(Бк×с×МэВ); m_T – масса органа-мишени «Т» (кг); N_S – число распадов в органе-источнике «S» за время накопления поглощённой дозы (1 распад = 1 Бк×с); f_i – доля излучения компонента «i» радионуклида с энергией E_i , излучённая в расчёте на один распад; E_i – энергия излучения компонента «i» радионуклида (МэВ); $F_{i(T \leftarrow S)}$ – «поглощённая доля», т.е. доля энергии компонента «i» радионуклида, которая поглощена в органе-источнике «Т» по отношению к полной энергии компонента «i» излучения радионуклида, которая излучена органом-источником «S».

Необходимо отметить, что первая сумма в формуле (1) является суммой по индексу «S» (т.е. – это сумма вкладов в дозу в «мишени» от всех «источников»); вторая сумма в формуле (1) является суммой по индексу «i» (т.е. сумма вкладов в энергию, поглощённую в «мишени» от всех компонентов «i» излучения радионуклида).

Результаты

Экспериментальное устройство для облучения диспергированным порошком ^{56}Mn

Сконструированное устройство включает в себя внутренний и внешний экспериментальные боксы, пневматическую систему распыления активированного нейтронами порошка ^{56}Mn , соединённую с контейнером, содержащим радиоактивный порошок ^{56}Mn и систему поддува сжатым воздухом. Устройство обеспечивает следующие условия облучения: а) пневматическое распыление порошкообразного ^{56}Mn над экспериментальными животными с использованием пневматической системы со сжатым воздухом; б) предотвращение распространения порошка ^{56}Mn в экспериментальной комнате путём применения внутреннего бокса с экспериментальными животными, расположенного во внешнем изолированном боксе; в) защиту персонала от высокого уровня облучения во время транспортировки и при размещении контейнера с высокой активностью ^{56}Mn (контейнер со свинцовой защитой толщиной 45 мм); г) обеспечение возможности дыхания животных во время облучения с использованием воздушного фильтра для поступления воздуха и предохранения распространения наружу частиц порошка, имеющих размеры пылевидных частиц почвы [22]; д) принудительную вентиляцию (при втором варианте облучения) с использованием отверстий во внутреннем боксе с животными.

Сравнение результатов данных радиометрии и спектрометрии

Результаты радиометрии с использованием прибора RadiHoriba были верифицированы путём сравнения с результатами спектрометрии нескольких образцов органов и тканей одной крысы. Для этих целей были применены гамма-спектрометр InSpector 1000TM (Canberra) со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) 51×51 мм и гамма-спектрометр AMPTEC, Inc. со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) 76×76 мм. Сравнение результатов было проведено в процессе дополнительных одновременных измерений активности ^{56}Mn в образцах нескольких различных органов и тканей с применением трёх упомянутых выше приборов. Расстояние от передних поверхностей блоков детектирования гамма-спектрометров до измеряемых образцов, а также геометрия спектрометрии были такими же (симметричными), как и в случае радиометрии с применением прибора RadiHoriba. При сравнении показаний длительность измерений каждого образца соответствовала 3-м минутам. На рис. 1 в качестве примера представлен гамма-спектр ^{56}Mn от образца кожи, полученный методом гамма-спектрометрии (спектрометр InSpector 1000TM, Canberra).

На рис. 2 показаны результаты сравнения измерений облучения ^{56}Mn от различных органов и тканей экспериментальной крысы: измерения спектрометрами InSpector 1000TM (Canberra) и AMPTEC по сравнению с измерениями радиометра RadiHoriba.

Можно заключить, что при выбранных условиях измерений результаты спектрометрии и радиометрии хорошо согласуются.

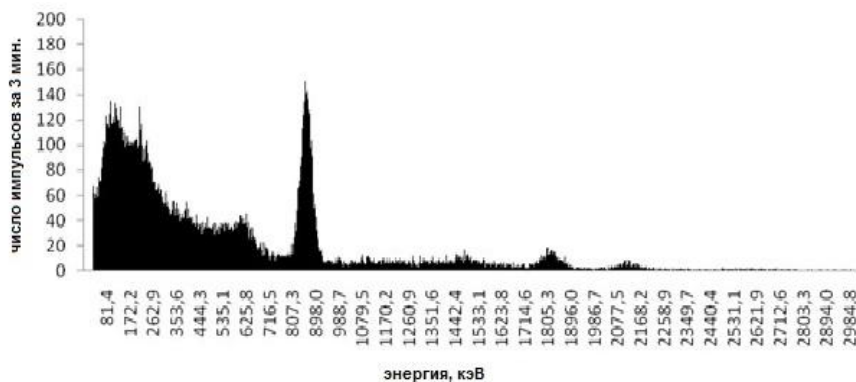


Рис. 1. Спектр гамма-излучения ^{56}Mn (спектрометр InSpector 1000TM) от образца кожи экспериментальной крысы. Величина максимального пика спектра гамма-излучения излучения ^{56}Mn соответствует энергии гамма-квантов 846,8 кэВ (98,9%). Фоновый спектр, измеренный в комнате без радиоактивных образцов, был вычтен.

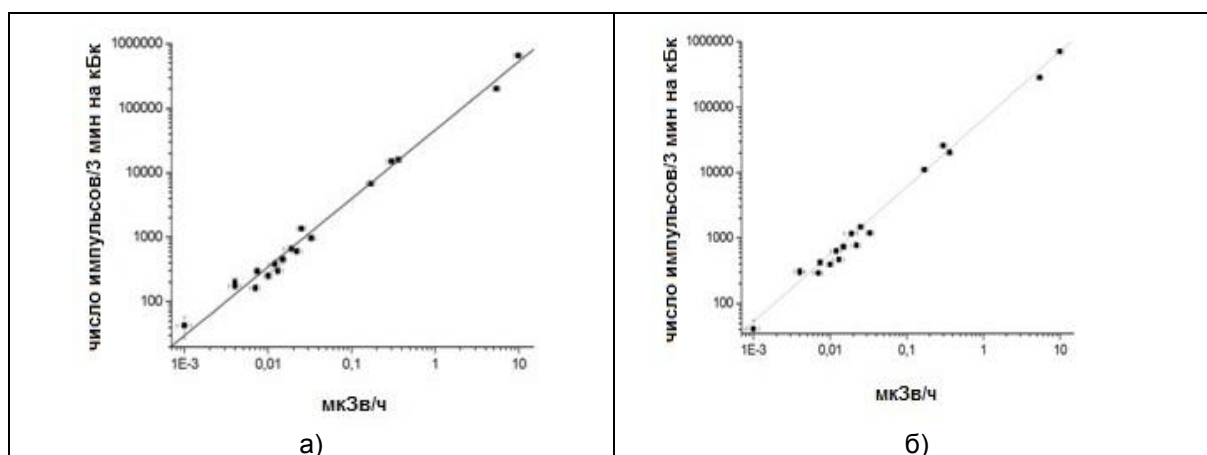


Рис. 2. Результаты сравнения между измерениями излучения ^{56}Mn от различных органов и тканей экспериментальной крысы. а) – измерения спектрометром InSpector 1000TM (Canberra) (вертикальная ось) по сравнению с измерениями радиометром RadiHoriba (горизонтальная ось); $R=0,9958$, $N=18$, $p<0,0001$; б) – измерения спектрометром AMPTEK (вертикальная ось) по сравнению с измерениями радиометром RadiHoriba (горизонтальная ось); $R=0,9958$, $N=18$, $p<0,0001$. Указанные неопределённости соответствуют 1 SD. Число импульсов спектрометрических измерений соответствуют пику гамма-излучения ^{56}Mn с энергией 846,8 кэВ (98,9%) с диапазоном суммирования числа импульсов в каналах от 817 кэВ до 876 кэВ. Фоновый спектр был вычтен из измеренного спектра ^{56}Mn .

Калибровка оборудования, использованного для измерений активности ^{56}Mn

Калибровка была проведена с использованием стандартного источника активированного нейтронами ^{56}Mn . Для этих целей было проведено облучение 1 мг порошка MnO_2 тепловыми нейтронами на исследовательском реакторе. Начальная активность точечного радиоактивного источника ^{56}Mn была равна $(3,6\pm 0,1)\times 10^7$ Бк с неопределённостью 1 SD. Процедура калибровки была проведена через 2 часа после окончания активации в той же геометрии, что и измерения активности ^{56}Mn в органах и тканях крыс. На момент калибровки активность точечного радиоактивного источника ^{56}Mn была равна $(2,05\pm 0,06)\times 10^7$ Бк с неопределённостью 1 SD.

Результаты калибровки следующие: $0,0604\pm 0,0025$ мкЗв/ч на кБк (неопределённость 1 SD) для радиометра RadiHoriba (Model PA-1000, Horiba. Ltd, Kyoto, Japan) с высокочувстви-

тельным сцинтилляционным CsI(Tl) детектором; 800 ± 45 импульсов/мин (неопределённость 1 SD) для гамма-спектрометра InSpector 1000TM (Canberra) с 51×51 мм NaI(Tl) сцинтилляционным детектором; 2000 ± 120 импульсов/мин на кБк (неопределённость 1 SD) для гамма-спектрометра AMPTEK, Inc. с $76 \text{ мм} \times 76 \text{ мм}$ NaI(Tl) сцинтилляционным детектором.

Указанное выше число импульсов при спектрометрических измерениях соответствует пику гамма-излучения с энергией 846,8 кэВ (98,9%) от ^{56}Mn с диапазоном суммирования импульсов в каналах от 817 кэВ до 876 кэВ (см. рис. 3). Фоновый спектр был вычтен из измеренного спектра источника ^{56}Mn .

Расчёты поглощённых долей

Значения поглощённых долей (см. формулу (1) выше) были рассчитаны для различных энергий электронов и гамма-квантов с применением метода Монте-Карло (см. раздел «Материалы и методы»). Расчёты были проведены для энергий электронов от 100 кэВ до 4 МэВ и энергий гамма-квантов от 10 кэВ до 4 МэВ с последующим определением поглощённых долей в соответствии с энергиями бета- и гамма-излучений ^{56}Mn [23]. Используемый при расчётах математический фантом экспериментальной крысы основан на данных морфометрических измерений хирургически изолированных органов и тканей лабораторных крыс различного возраста. Для расчётов был использован математический фантом крысы-самца с массой всего тела 230 г. Математические уравнения целых и усечённых эллипсоидов, цилиндров, слоёв различной толщины и конусов (а также их комбинаций) были использованы для математического моделирования всего тела и рассматриваемых органов и тканей крысы [17]. Для расчётов поглощённых долей радиационный транспорт моноэнергетических электронов 7-ми энергий и фотонов 11-ти энергий рассчитывали с помощью программы MCNP-4C [16]. Было предположено, что излучение радионуклида изотропно, а его распределение равномерно в пределах рассматриваемых органов и тканей. Было рассчитано 10 миллионов вариантов для каждой энергии электронов и фотонов с учётом вторичных частиц и вплоть до конечной энергии фотонов и электронов 1 кэВ. Коэффициенты вариации для большинства рассчитанных поглощённых долей были в пределах 5%.

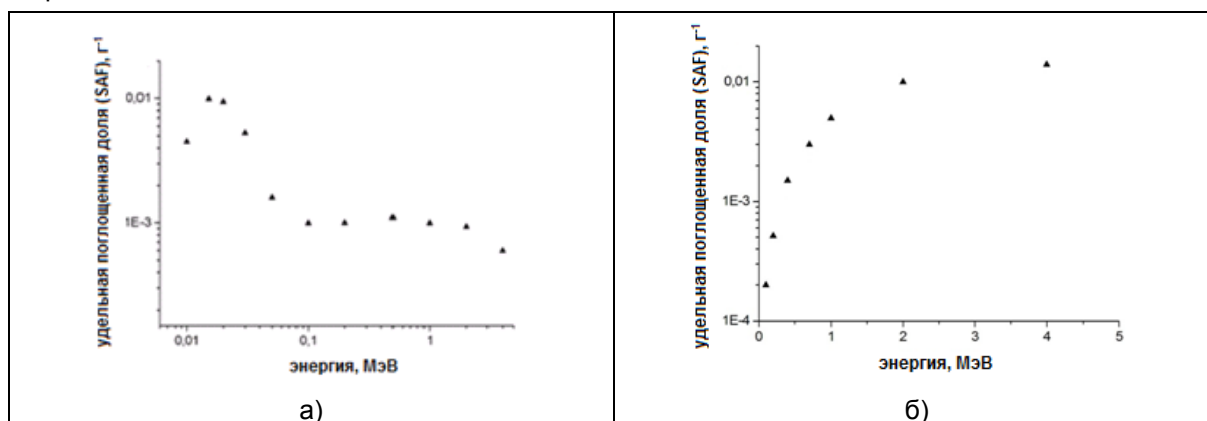


Рис. 3. Печень облучает желудок: а) – пример расчёта удельных поглощённых долей (ось ординат, SAF, г^{-1}) для фотонов различной энергии (ось абсцисс); б) – пример расчёта удельных поглощённых долей (ось ординат, SAF, г^{-1}) для электронов различной энергии (ось абсцисс).

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты расчётов удельных поглощённых долей (поглощённая доля на единицу массы органа-мишени, SAF, г^{-1}) для фотонов и электронов различных энергий.

Результаты оценок накопленных доз внутреннего облучения

Как было отмечено в разделе «Материалы и методы», измеренная удельная активность ^{56}Mn (выраженная в Бк на единицу массы образца измеряемого органа или ткани) была пересчитана на момент начала облучения животных с учётом периода полураспада ^{56}Mn . Накопленные дозы внутреннего облучения были оценены для периода времени от начала облучения до бесконечности (т.е. до полного распада ^{56}Mn). Было предположено, что физический распад ^{56}Mn существенно быстрее по сравнению с биологическим перераспределением порошка MnO_2 в организме крысы. В этом случае для вычисления N_S (число распадов в органе-источнике «S» в течение времени накопления поглощённой дозы (см. формулу (1) выше)) используется соотношение:

$$N_S = \frac{A_0 \times T_{1/2}}{\ln 2}, \quad (2)$$

где A_0 – удельная активность ^{56}Mn в рассматриваемом органе-источнике, пересчитанная на момент начала облучения животного с учётом периода полураспада ^{56}Mn , кБк/г; $T_{1/2}=2,58$ ч – период физического полураспада ^{56}Mn . Результаты измеренных величин A_0 и оценённых накопленных поглощённых доз внутреннего облучения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величины A_0 и накопленные поглощённые дозы внутреннего облучения, D в различных органах и тканях экспериментальных крыс при различных вариантах облучения (указанные в таблице неопределённости соответствуют одному стандартному отклонению – 1 SD)

Органы	Первый вариант облучения (без принудительной вентиляции), начальная активность распылённого ^{56}Mn : $2,74 \times 10^8$ Бк		Второй вариант облучения (с принудительной вентиляцией), начальная активность распылённого ^{56}Mn : $2,74 \times 10^8$ Бк	
	A_0 , кБк/г	D , Гр	A_0 , кБк/г	D , Гр
Печень	4,1±0,35	0,015±0,0014	0,48±0,060	0,0017±0,00023
Сердце	5,5±0,60	0,016±0,0021	0,47±0,050	0,0013±0,00024
Почки	3,9±0,48	0,013±0,0020	0,10±0,013	0,00032±0,000045
Язык	45±5,4	0,069±0,011	7,1±1,2	0,011±0,0020
Лёгкие	72±9,3	0,10±0,014	23±2,5	0,030±0,004
Пищевод	26±3,6	0,050±0,009	3,6±0,37	0,0071±0,0009
Желудок	150±16	0,24±0,030	69±7,2	0,11±0,013
Тонкий кишечник	810±93	1,33±0,17	89±9,3	0,15±0,017
Толстый кишечник	1010±100	1,65±0,18	280±29	0,45±0,050
Трахея	5,8±0,75	0,014±0,0020	3,0±0,30	0,0073±0,0009
Глаза	13±1,7	0,021±0,0030	17±2,4	0,026±0,0040
Кожа	41±4,9	0,076±0,010	39±5,5	0,073±0,013
Всё тело	83±11	0,15±0,025	23±3,4	0,041±0,0075

Заключение

При ядерных испытаниях в нижних слоях атмосферы, а также при атомной бомбардировке, в результате нейтронной активации химических элементов в составе почвы образуются бета- и гамма-излучающие радионуклиды. Радионуклид ^{56}Mn ($T_{1/2}=2,58$ ч) – один из основных нейтронно-активированных бета-излучателей в течение первых часов после нейтронной активации

частиц почвенной пыли, поднявшейся в момент ядерного взрыва. Эффекты облучения остаточной радиоактивностью, образовавшейся в результате ядерных взрывов, являются предметом обсуждения и исследований последствий ядерных испытаний и атомных бомбардировок.

Экспериментальное моделирование облучения лабораторных животных остаточной радиоактивностью в пылевых частицах почвы можно осуществить с использованием нейтронно-активированного ^{56}Mn в виде порошка. Активация порошкообразного MnO_2 проведена на ядерном реакторе ИВГ.1М (экспериментальная установка «Байкал-1», Курчатов, Казахстан) при флюенсе нейтронов 4×10^{14} н/см², что соответствует условиям нейтронного облучения в эпицентре атомной бомбардировки Хиросимы. Полученный активированный порошок с ^{56}Mn был распылён пневматической системой над экспериментальными животными (крысы линии Вистар), которые находились в специальном боксе. Облучение проведено в двух вариантах – в первом из них в боксе имелся только воздушный фильтр для обеспечения дыхания животных (начальная активность распыленного порошка равна $2,74 \times 10^8$ Бк). Во втором варианте была осуществлена принудительная вентиляция бокса с животными.

После распыления радиоактивного порошка была измерена активность ^{56}Mn в органах и тканях экспериментальных крыс. Применённое оборудование было откалибровано в МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России (Обнинск) с использованием стандартного источника ^{56}Mn , полученного путём нейтронной активации на исследовательском ядерном реакторе. Расчёт поглощённых долей энергии в органах и тканях крыс был проведён в МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России (Обнинск) с помощью программы Монте-Карло (версия MCNP-4C) с соответствующими библиотеками ядерных констант для электронов и гамма-квантов и математического фантома экспериментальной крысы. Оценки доз внутреннего облучения были выполнены на основе результатов измерений активности ^{56}Mn в органах и тканях экспериментальных животных и рассчитанных величин поглощённых долей внутреннего облучения фотонами и электронами.

Первые результаты этого международного многоцентрового исследования показали, что наиболее облучаемыми органами и тканями экспериментальных крыс являются: толстый кишечник, тонкий кишечник, желудок, лёгкие, кожа. Накопленные поглощённые дозы внутреннего облучения для первого варианта облучения (без принудительной вентиляции) равны 1,65 Гр, 1,33 Гр, 0,24 Гр, 0,1 Гр и 0,076 Гр – для толстого кишечника, тонкого кишечника, желудка, лёгких и кожи соответственно. Для второго варианта облучения (с принудительной вентиляцией бокса с животными) накопленные поглощённые дозы внутреннего облучения равны 0,45 Гр, 0,15 Гр, 0,11 Гр, 0,03 Гр и 0,073 Гр – для толстого кишечника, тонкого кишечника, желудка, лёгких и кожи соответственно. Полученные результаты оценок доз внутреннего облучения от активированного реакторными нейтронами ^{56}Mn в виде порошка различной активности, распылённого над экспериментальными животными, будут использованы для исследования и интерпретации биологических эффектов при таком виде облучения, что послужит предметом будущих публикаций.

Исследования специалистов из Японии поддержано грантами JSPS KAKENHI № 26257501 и № 24310044, Япония. Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Республики Казахстан (обеспечение исследований в Республике Казахстан). Исследование поддержано Медицинским радиологическим научным центром им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского радиологического центра Министерства здравоохранения Российской Федерации путём предоставления возможностей для инструментальных измерений, калибровки и расчётов доз внутреннего облучения.

Заявление о потенциальных конфликтах интересов. Авторы этой статьи не имеют конфликтов интересов в соответствии с их документальными заявлениями.

Литература

1. US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki. Final Report, Dosimetry System 1986 (DS86). Ed.: W.C. Roesch. Hiroshima: RERF, 1987.
2. Reassessment of the Atomic Bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki. Report of the Joint US-Japan Working Group, Dosimetry System 2002 (DS02). Eds.: R.W. Young, G.D. Kerr. Hiroshima: RERF, 2005.
3. **Imanaka T., Endo S., Kawano N., Tanaka K.** Radiation exposure and disease questionnaires of early entrants after the Hiroshima bombing //Rad. Prot. Dosim. 2012. V. 149, N 1. P. 91-96.
4. **Kerr G.D., Egbert S.D., Al-Nabulsi I., Bailiff I.K., Beck H.L., Belukha I.G., Cockayne J.E., Cullings H.M., Eckerman K.F., Granovskaya E., Grant E.J., Hoshi M., Kaul D.C., Kryuchkov V., Mannis D., Ohtaki M., Otani K., Shinkarev S., Simon S.L., Spriggs G.D., Stepanenko V.F., Stricklin D., Weiss J.F., Weitz R.L., Woda C., Worthington P.R., Yamamoto K., Young R.W.** Workshop report on atomic bomb dosimetry – review of dose related factors for the evaluation of exposures to residual radiation at Hiroshima and Nagasaki //Health Phys. 2015. V. 109, N 6. P. 582-600.
5. **Kerr G.D., Stephen D., Egbert S.D., Al-Nabulsi I., Beck H.L., Cullings H.M., Endo S., Hoshi M., Imanaka T., Kaul D.C., Maruyama S., Reeves G.I., Ruehm W., Sakaguchi A., Simon S.L., Spriggs G.D., Stram D.O., Tonda T., Weiss J.F., Weitz R.L., Young R.W.** Workshop report on atomic bomb dosimetry – residual radiation exposure: recent research and suggestions for future studies //Health Phys. 2013. V. 105, N 2. P. 140-149.
6. **Ohtaki M., Otani K., Tonda T., Sato Y., Hara N., Imori S., Kawakami H., Tashiro S., Aihara K., Hoshi M., Satoh K.** Effect of distance from hypocenter at exposure on solid cancer mortality among Hiroshima atomic bomb survivors with very low initial radiation dose in the Dosimetry System 1986 (DS86) //Health Phys. 2014. V. 107, Suppl. 1. P. 45.
7. **Sawada S.** Estimation of residual nuclear radiation effects on survivors of Hiroshima atomic bombing, from incidence of acute radiation disease //Bulletin of Social Medicine. 2011. V. 29, N 1. P. 47-62.
8. **Stepanenko V.F., Kolyzshenkov T.V., Dubov D.V., Ohtaki M., Hoshi M.** Evaluation of residual exposure at Hiroshima and Nagasaki: possibility of the measurements of beta-particle dose using the retrospective luminescence dosimetry technique //Health Phys. 2014. V. 107, Suppl. 1. P. 43-44.
9. **Tanaka K., Endo S., Imanaka T., Shizuma K., Hasai H., Hoshi M.** Skin dose from neutron-activated soil for early entrants following the A-bomb detonation in Hiroshima: contribution from beta and gamma rays //Radiat. Environ. Biophys. 2008. V. 47, N 3. P. 323-330.
10. **Stram D.O., Mizuno S.** Analysis of the DS86 atomic bomb radiation dosimetry methods using data on severe epilation //Radiat. Res. 1989. V. 117, N 1 P. 93-113.
11. **Weitz R.** Reconstruction of beta-particle and gamma-ray doses from neutron activated soil at Hiroshima and Nagasaki //Health Phys. 2014. V. 107, Suppl. 1. P. 43.
12. **Orlov M., Stepanenko V.F., Belukha I.G., Ohtaki M., Hoshi M.** Calculation of contact beta-particle exposure of biological tissue from the residual radionuclides in Hiroshima //Health Phys. 2014. V. 107, Suppl. 1. P. 44.
13. **Lanin A.** Nuclear rocket engine reactor. Springer Series in Materials Science. Series V. 170. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 110 p. ISBN 978-3-642-32429-1. DOI: 10.1007/978-3-642-324307. Series ISSN 0933-033X. Available at: <http://www.springer.com/us/book/9783642324291> (Accessed 2.10.2016).

14. Directive 2010/63/EU of the European Parliament and the Council of the Office on the protection of animals used for scientific purposes of 22 September 2010 //Offic. J. of the Europ. Union. 2010. L276. P. 33-79.
15. Правила разведения лабораторных крыс в виварии в соответствии со Статутом Научного исследовательского центра. Карагандинский государственный университет им. Букетова, Республика Казахстан. Утверждено ректором Университета проф. Досмагабетовым 01.07.2013 г. Караганда, 2013.
16. **Briemeister J.F.** MCNP – A general Monte-Carlo N-particle transport code. Version 4C. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2000.
17. **Яськова Е.К., Степаненко В.Ф., Петриев В.М., Скворцов В.Г., Соколов В.А., Крюкова И.Г., Ширяева В.К., Белорукова Н.В., Калашникова Е.Е., Дубов Д.В., Цыб А.Ф.** Оценка поглощённых доз внутреннего облучения лабораторных животных при введении радиофармпрепаратов //Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 4. С. 50-57.
18. ICRP, Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110 //Ann. ICRP. 2009. V. 39, N 2. Elsevier, 2009. P. 165.
19. **Stabin M., Hunt S.J., Sparks R., Lipsztein J., Eckerman J.** RADAR: the radiation dose assessment resource – an online source of dose information for nuclear medicine and occupation radiation safety [abstract] //J. Nucl. Med. 2001. V. 42. Suppl. P. 243.
20. **Be M.-M., Chiste V., Dulieu C., Mougeot X., Browne E., Baglin C., Chechnev V.P., Egorov A., Kuzmenko N.K., Sergeev V.O., Kondev F.G., Luca A., Galan M., Huang X., Wang B., Helmer R.G., Schonfeld E., Dersch R., Vanin V.R., de Castro R.M., Nichols A.L., MacMahon T.D., Pearce A., Arinc A., Lee K.B., Wu S.C.** Table of Radionuclides (Comments on evaluation). 2009. V. 1-7, Bureau International des Poids et Mesures. Paviillon de Breteuil, F-92310 SEVRES.
21. **Bolch W.E., Eckerman K.F., Sgouros G., Thomas R.** MIRD Pamphlet No. 21: A Generalized Schema for Radiopharmaceutical Dosimetry-Standardization of Nomenclature //J. Nucl. Med. 2009. V. 50, N 11. P. 477-484.
22. **Sakaguchi A., Hoshi M., Aoyama M., Kato H., Onda Yu.** Eds.: M. Aoyama, O. Yutaka. Soil particle size measurements for the calculation of the spread of dusts blown up the explosion of the Hiroshima atomic bomb – for radiation dose estimation from neutron activated dusts of soils used in traditional Japanese houses and those of the ground surface. In: Revisit the Hiroshima A-bomb with a database. V. 2. Publisher: Hiroshima City. Japan, 2013. P. 15-24.
23. **Степаненко В.Ф., Яськова Е.К., Белуха И.Г., Петриев В.М., Скворцов В.Г., Кольженков Т.В., Петухов А.Д., Дубов Д.В.** Расчёты внутреннего облучения нано-, микро- и макробиоструктур электронами, бета-частицами и квантовым излучением различной энергии для создания и исследований новых радиофармпрепаратов и исследований в ядерной медицине //Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 1. С. 35-60.

Irradiation of laboratory animals by neutron activated dust: development and application of the method – first results of international multicenter study

Stepanenko V.F.¹, Rakhypbekov T.K.², Kaprin A.D.³, Ivanov S.A.¹, Otani K.⁴, Endo S.⁴, Satoh K.⁴, Kawano N.⁴, Takatsuji T.⁵, Nakashima M.⁵, Shichijo K.⁵, Sakaguchi A.⁶, Kato H.⁶, Onda Y.⁶, Fujimoto N.⁴, Toyoda Sh.⁷, Sato H.⁸, Kolyzhenkov T.V.¹, Petukhov A.D.¹, Dyussupov A.A.², Chaizhunusova N.Zh.², Sayakenov N.B.², Uzbekov D.E.², Saimova A.Zh.², Shabdarbaeva D.M.², Pivina L.N.², Skakov M.K.⁹, Vurim A.D.⁹, Gnyrya V.S.⁹, Azimkhanov A.C.⁹, Kolbayenkov A.N.⁹, Zhumadilov K.Sh.¹⁰, Kairkhanova Y.O.², Yaskova E.K.¹, Belukha I.G.¹, Skvortsov V.G.¹, Ivannikov A.I.¹, Khailov A.M.¹, Akhmedova U.A.¹, Bogacheva V.V.¹, Anokhin Yu.N.¹, Orlenko S.P.¹, Hoshi M.⁴

¹ A. Tsyb MRRC, Obninsk;

² NMRRRC, Obninsk;

³ Semey State Medical University, Semey, Kazakhstan;

⁴ Hiroshima University, Hiroshima, Japan;

⁵ Nagasaki University, Nagasaki, Japan;

⁶ University of Tsukuba, Tsukuba, Japan;

⁷ Okayama University of Science, Okayama, Japan;

⁸ Ibaraki Prefectural University of Health Science, Ibaraki, Japan;

⁹ National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan;

¹⁰ L. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

The radionuclide ⁵⁶Mn (T_{1/2}=2.58 hours) is one of the dominant beta- and gamma-emitters within few hours after the neutron irradiation of soil dust following nuclear explosion in atmosphere. The effects of exposure to residual radioactivity from nuclear explosions are the subject of discussions and research of the consequences of nuclear tests and the atomic bombing. Special experimental device was constructed for irradiation of laboratory rats by ⁵⁶Mn powder. Neutron activation of powdered MnO₂ was performed by using nuclear reactor IVG.1M (experimental facility "Baikal-1", Kurchatov, Kazakhstan) with neutron fluence of 4×10¹⁴ n/cm². The obtained ⁵⁶Mn-containing powder was sprayed over the animals (rats of Wistar line) with pneumatic system, the rats were placed in an isolated box. The initial activity of radioactive ⁵⁶Mn powder was 2.74×10⁸ Bq. Exposition of rats to radioactive powder was carried out by two scenarios: a) the experimental box was supplied with air filter only (targeted for animal's breathing); b) the experimental box was supplied with the system of forced ventilation. After exposure to radioactive powder of ⁵⁶Mn radioactivity in organs and tissues of the rats was measured. The used equipment was calibrated in A. Tsyb MRRC (Obninsk, Russia) using standard source of ⁵⁶Mn obtained by neutron activation in the research nuclear reactor. Absorbed fractions of energy in organs and tissues of rats was calculated in A. Tsyb MRRC (Obninsk, Russia) using the Monte-Carlo code (version MCNP-4C) with the corresponding library of nuclear constants for electrons and gammas and using mathematical phantom of an experimental rat. Assessment of internal radiation doses was performed on the basis of the results of measuring of ⁵⁶Mn activity in organs and tissues of experimental animals and on the basis of calculated values of absorbed fractions of internal exposure to photons and electrons. The first results of this international multicenter study showed that the most irradiated organs and tissues of the experimental animals are: the large intestine, small intestine, stomach, lungs, and skin. In the first scenario of exposure (without forced ventilation) accumulated absorbed doses of internal radiation to the large intestine, small intestine, stomach, lungs and skin were 1.65 Gy, 1.33 Gy, 0.24 Gy, 0.10 Gy and 0.076 Gy respectively. In the second scenario of exposure (with forced ventilation) the accumulated absorbed doses of internal radiation to the large intestine, small intestine, stomach, lungs and skin were 0.45 Gy, 0.15 Gy, 0.11 Gy, 0.03 and 0.073 Gy respectively. The results of assessments of internal doses from neutron-activated ⁵⁶Mn in powder, sprayed over experimental animals can be used for understanding of biological effects of this type of radiation, which is the subject of future publications.

Stepanenko V.F.* – Head of Lab., D. Sc., Biol., Prof.; **Ivanov S.A.** – Deputy Director, MD; **Kolyzhenkov T.V.** – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; **Petukhov A.D.** – Research Assistant; **Yaskova E.K.** – Lead. Researcher, C. Sc., Biol.; **Belukha I.G.** – Lead. Researcher, C. Sc., Biol.; **Skvortsov V.G.** – Head of Lab., C. Sc., Biol.; **Ivannikov A.I.** – Lead. Researcher, C. Sc., Phys.-Math.; **Khailov A.M.** – Senior Researcher, C. Sc., Tech.; **Akhmedova U.A.** – Engineer; **Bogacheva V.V.** – Engineer; **Anokhin Yu.N.** – Senior Researcher, C. Sc., Med.; **Orlenko S.P.** – Research Assistant. A. Tsyb MRRC. **Kaprin A.D.** – Director General, Corresponding Member of RAS, MD, Prof. NMRRRC. **Rakhypbekov T.K.** – Rector, MD, Prof.; **Dyussupov A.A.** – Vice-Rector, C. Sc., Med.; **Chaizhunusova N.Z.** – MD, Prof.; **Sayakenov N.B.** – Associate Prof., C. Sc., Med.; **Uzbekov D.E.** – Research Assistant, C. Sc., Med.; **Saimova A.Z.** – Research Assistant, C. Sc., Med.; **Shabdarbaeva D.M.** – Head of Dept., MD, Prof.; **Pivina L.N.** – Associate Prof., C. Sc., Med.; **Kairkhanova Y.O.** – Research Assistant, C. Sc., Med. SSMU MH of the RK. **Otani K.** – Prof.; **Endo S.** – Prof.; **Sato K.** – Prof.; **Kawano N.** – Prof.; **Fujimoto N.** – Prof.; **Hoshi M.** – Prof. Hiroshima University, Japan. **Takatsuji T.** – Prof.; **Nakashima M.** – Prof.; **Shichijo K.** – Prof. Nagasaki University, Japan. **Sakaguchi A.** – Prof.; **Kato H.** – Prof.; **Onda Y.** – Prof. University of Tsukuba, Japan. **Toyoda Sh.** – Prof. University of Sciences of Okayama, Japan. **Sato H.** – Prof. Ibaraki Prefectural University of Health Science, Japan. **Skakov M.K.** – Deputy Director, D. Sc., Phys.-Math., Prof., Academician of KAS; **Vurim A.D.** – Deputy Director on tests, C. Sc., Phys.-Math.; **Gnyrya V.S.** – Head of NF "Baikal-1"; **Azimkhanov A.S.** – Deputy Chief of NF "Baikal-1"; **Kolbaenkov A.N.** – Leading Specialist. NNC of the RK. **Zhumadilov K.Sh.** – Prof., L. Gumilyov ENU of the RK.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-70-02; e-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru.

Key words: neutron activation, ^{56}Mn , radioactive dust, inhalation of radioactive dust, ingestion of radioactive dust, radiation safety, laboratory rats, internal radiation dosimetry, method Monte-Carlo, internal radiation dose.

References

1. US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki. Final Report, Dosimetry System 1986 (DS86). Ed.: W.C. Roesch. Hiroshima, RERF, 1987.
2. Reassessment of the Atomic Bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki. Report of the Joint US-Japan Working Group, Dosimetry System 2002 (DS02). Eds.: R.W. Young, G.D. Kerr. Hiroshima, RERF, 2005.
3. **Imanaka T., Endo S., Kawano N., Tanaka K.** Radiation exposure and disease questionnaires of early entrants after the Hiroshima bombing. *Rad. Prot. Dosim.*, 2012, vol. 149, no. 1, pp. 91-96.
4. **Kerr G.D., Egbert S.D., Al-Nabulsi I., Bailiff I.K., Beck H.L., Belukha I.G., Cockayne J.E., Cullings H.M., Eckerman K.F., Granovskaya E., Grant E.J., Hoshi M., Kaul D.C., Kryuchkov V., Mannis D., Ohtaki M., Otani K., Shinkarev S., Simon S.L., Spriggs G.D., Stepanenko V.F., Stricklin D., Weiss J.F., Weitz R.L., Woda C., Worthington P.R., Yamamoto K., Young R.W.** Workshop report on atomic bomb dosimetry – review of dose related factors for the evaluation of exposures to residual radiation at Hiroshima and Nagasaki. *Health Phys.*, 2015, vol. 109, no. 6, pp. 582-600.
5. **Kerr G.D., Stephen D., Egbert S.D., Al-Nabulsi I., Beck H.L., Cullings H.M., Endo S., Hoshi M., Imanaka T., Kaul D.C., Maruyama S., Reeves G.I., Ruehm W., Sakaguchi A., Simon S.L., Spriggs G.D., Stram D.O., Tonda T., Weiss J.F., Weitz R.L., Young R.W.** Workshop report on atomic bomb dosimetry – residual radiation exposure: recent research and suggestions for future studies. *Health Phys.*, 2013, vol. 105, no. 2, pp. 140-149.
6. **Ohtaki M., Otani K., Tonda T., Sato Y., Hara N., Imori S., Kawakami H., Tashiro S., Aihara K., Hoshi M., Satoh K.** Effect of distance from hypocenter at exposure on solid cancer mortality among Hiroshima atomic bomb survivors with very low initial radiation dose in the Dosimetry System 1986 (DS86). *Health Phys.*, 2014, vol. 107, Suppl. 1, p. 45.
7. **Sawada S.** Estimation of residual nuclear radiation effects on survivors of Hiroshima atomic bombing, from incidence of acute radiation disease. *Bulletin of Social Medicine*, 2011, vol. 29, no. 1, pp. 47-62.
8. **Stepanenko V.F., Kolyzshenkov T.V., Dubov D.V., Ohtaki M., Hoshi M.** Evaluation of residual exposure at Hiroshima and Nagasaki: possibility of the measurements of beta-particle dose using the retrospective luminescence dosimetry technique. *Health Phys.*, 2014, vol. 107, Suppl. 1, pp. 43-44.
9. **Tanaka K., Endo S., Imanaka T., Shizuma K., Hasai H., Hoshi M.** Skin dose from neutron-activated soil for early entrants following the A-bomb detonation in Hiroshima: contribution from beta and gamma rays. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2008, vol. 47, no. 3, pp. 323-330.
10. **Stram D.O., Mizuno S.** Analysis of the DS86 atomic bomb radiation dosimetry methods using data on severe epilation. *Radiat. Res.*, 1989, vol. 117, no. 1, pp. 93-113.
11. **Weitz R.** Reconstruction of beta-particle and gamma-ray doses from neutron activated soil at Hiroshima and Nagasaki. *Health Phys.*, 2014, vol. 107, Suppl. 1, p. 43.
12. **Orlov M., Stepanenko V.F., Belukha I.G., Ohtaki M., Hoshi M.** Calculation of contact beta-particle exposure of biological tissue from the residual radionuclides in Hiroshima. *Health Phys.*, 2014, vol. 107, Suppl. 1, p. 44.

13. **Lanin A.** Nuclear rocket engine reactor. Springer Series in Materials Science. Series V. 170. Berlin, Springer-Verlag, 2013. 110 p. ISBN 978-3-642-32429-1. DOI: 10.1007/978-3-642-324307. Series ISSN 0933-033X. Available at: <http://www.springer.com/us/book/9783642324291> (Accessed 2.10.2016).
14. Directive 2010/63/EU of the European Parliament and the Council of the Office on the protection of animals used for scientific purposes of 22 September 2010. *Offic. J. of the Europ. Union*, 2010, L276, pp. 33-79.
15. Pravila razvedeniya laboratornykh krysh v vivarii v sootvetstvii so Statusom Nauchnogo issledovatel'skogo tsentra, Karagandinskiy Gosudarstvennyy Universitet im. Buketova, Respublika Kazakhstan. Uteverzhdeno Rektorom Universiteta 01.07.2013. Karaganda, 2013. [Rules of breeding of laboratory rats in a vivarium in accordance with the Status of the Scientific Research Center, Karaganda State University named after Buketov. The Republic of Kazakhstan. Approved by Prof. Dosmagabetov, Rector of University on 01.07.2013. 2013]. Karaganda, 2013.
16. **Briemeister J.F.** MCNP – A general Monte-Carlo N-particle transport code. Version 4C. Los Alamos, Los Alamos National Laboratory, 2000.
17. **Yaskova E.K., Stepanenko V.F., Petrov V.M., Skvortsov V.G., Sokolov V.A., Kryukova I.G., Shirayeva V.K., Belorukova N.V., Kalashnikova E.E., Dubov D.V., Tsyb A.F.** Otsenka pogloshchennykh doz vnutrennego oblucheniya laboratornykh zhivotnykh pri vvedenii radiofarmpreparatov [Estimation of the absorbed doses of internal exposure of laboratory animals from radiopharmaceuticals]. *Radiatsiya i Risk – Radiation and Risk*, 2010, vol. 19, no. 4, pp. 50-57.
18. ICRP, Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. *Ann. ICRP*, 2009, vol. 39, no. 2. Elsevier, 2009. 165 p.
19. **Stabin M., Hunt S.J., Sparks R., Lipsztein J., Eckerman J.** RADAR: the radiation dose assessment resource – an online source of dose information for nuclear medicine and occupation radiation safety [abstract]. *J. Nucl. Med.*, 2001, vol. 42, Suppl., p. 243.
20. **Be M.-M., Chiste V., Dulieu C., Mougeot X., Browne E., Baglin C., Chechnev V.P., Egorov A., Kuzmenko N.K., Sergeev V.O., Kondev F.G., Luca A., Galan M., Huang X., Wang B., Helmer R.G., Schonfeld E., Dersch R., Vanin V.R., de Castro R.M., Nichols A.L., MacMahon T.D., Pearce A., Arinc A., Lee K.B., Wu S.C.** Table of Radionuclides (Comments on evaluation), 2009, vol. 1-7, Bureau International des Poids et Mesures. Paviollon de Breteuil, F-92310 SEVRES.
21. **Bolch W.E., Eckerman K.F., Sgouros G., Thomas R.** MIRDO Pamphlet No. 21: A Generalized Schema for Radiopharmaceutical Dosimetry-Standardization of Nomenclature. *J. Nucl. Med.*, 2009, vol. 50, no. 11, pp. 477-484.
22. **Sakaguchi A., Hoshi M., Aoyama M., Kato H., Onda Yu.** Eds.: M. Aoyama, O. Yutaka. Soil particle size measurements for the calculation of the spread of dusts blown up the explosion of the Hiroshima atomic bomb – for radiation dose estimation from neutron activated dusts of soils used in traditional Japanese houses and those of the ground surface. In: Revisit the Hiroshima A-bomb with a database, vol. 2, Publisher: Hiroshima City, 2013. pp. 15-24.
23. **Stepanenko V.F., Yaskova E.K., Belukha I.G., Petriyev V.M., Skvortsov V.G., Kolyzhenkov T.V., Petukhov A.D., Dubov D.V.** Raschety vnutrennego oblucheniya nano-, mikro- i makro biostruktur elektronami, beta-chastitsami i kvantovym izlucheniem razlichnoy energii dlya sozdaniya i issledovaniy novykh radiofarmpreparatov i issledovaniy v yadernoy meditsine [Calculations of internal exposure of nano-, micro- and macro biological structures by electrons, beta particles and quantum radiation of different energies for developing and investigation of new radiopharmaceuticals in nuclear medicine]. *Radiatsiya i Risk – Radiation and Risk*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 35-60.