

Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона

М.О. Дёгтева¹, Е.И. Толстых¹, К.Г. Сулова², С.А. Романов², А.В. Аклеев¹

¹Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

²Южно-Уральский институт биофизики, Федеральное медико-биологическое агентство, Озёрск, Россия

Цель исследования: провести комплексный анализ и оценку динамики уровней внутреннего облучения населения на территориях, загрязненных в результате деятельности производственного объединения «Маяк», на основе результатов долговременного мониторинга содержания долгоживущих техногенных радионуклидов в организме жителей Уральского региона. Материалы и методы: рассмотрены данные посмертных и прижизненных обследований для трёх групп населения: 1) жителей прибрежных сёл верхнего и среднего течения реки Теча, загрязненной в 1949–1956 гг. жидкими радиоактивными отходами; 2) людей, облучившихся в результате аварии 1957 г. на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа; 3) жителей г. Озёрска, расположенного на расстоянии 8 км от предприятия. Методы обследований включали: 1) радиохимический анализ образцов органов и тканей, отобранных при аутопсиях; 2) прижизненные измерения на спектрометрах излучений человека. В статье представлены результаты измерений содержания цезия-137, стронция-90 и трансураниевых радионуклидов в организме, начиная с 1950-х гг. по настоящее время. Анализ данных позволил выделить две исторически сложившиеся группы населения с максимальными уровнями текущего содержания в организме стронция-90 и плутония. В состав первой группы вошли люди, проживавшие в начале 1950-х гг. в населенных пунктах на реке Теча, для которых уровни перорального поступления ⁹⁰Sr достигали 1,4 МБк/год. В состав второй группы вошли жители г. Озёрска, для которых уровни ингаляционного поступления плутония в период 1951–1958 гг. достигали 8 Бк/год. Заключение: оценки ожидаемых эффективных доз от поступления долгоживущих радионуклидов с 1949 по 2012 г. для критических групп населения Урала составили: 300 мЗв для бывших жителей села Муслюмово на реке Теча (вклад ⁹⁰Sr – 85%) и 13 мЗв для жителей г. Озёрска (вклад трансураниевых радионуклидов – 30%).

Ключевые слова: производственное объединение «Маяк», река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, цезий-137, стронций-90, плутоний.

Введение

Оценка доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационно-опасных объектов, является неотъемлемой частью радиационно-гигиенического мониторинга – системы комплексного динамического наблюдения, включающего в себя постоянный контроль параметров радиационной обстановки. Специфику радиационной обстановки в районе размещения производственного объединения (ПО) «Маяк» на территории Челябинской области определили последствия крупномасштабного радиоактивного загрязнения наземных и водных объектов, возникшего в середине XX в. [1].

Наиболее значимыми источниками загрязнения были сбросы жидких радиоактивных отходов в реку Теча в 1949–1956 гг., взрыв в хранилище высокоактивных отходов в 1957 г., в результате которого образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), а также значительные газо-аэрозольные выбросы предприятия,

имевшие место в начальный период его работы (1948–1958 гг.). Помимо этого, ветровой перенос радиоактивного ила с прибрежной полосы промышленного озера Карачай в 1967 г. привел к дополнительному загрязнению территории Челябинской области. Долгоживущие техногенные радионуклиды ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr поступали в организм жителей населённых пунктов (НП) реки Теча и ВУРСа с питьевой водой и сельскохозяйственными продуктами, полученными на загрязненных территориях. Газо-аэрозольные выбросы ПО «Маяк» приводили к радиоактивному загрязнению приземного слоя воздуха и почвы, в результате чего происходило ингаляционное поступление радионуклидов в организм.

С момента образования зон радиоактивного загрязнения значительное влияние на формирование текущей радиационной обстановки вокруг ПО «Маяк» оказывали процессы миграции и перераспределения радионуклидов по территории в результате естественных и антропо-

Дёгтева Марина Олеговна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России
Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского д. 68а. E-mail: marina@urcrm.ru

генных факторов. Карта-схема загрязнения территории Южного и Среднего Урала стронцием-90 по состоянию на 1997 г. показана на рисунке 1. Схема составлена на основе карты уровней загрязнения почв Уральского региона, выпущенной в 2000 г. Институтом глобального климата и экологии, и поэтому базируется на внесистемных единицах Ки/км², которые были использованы в оригинале [2].

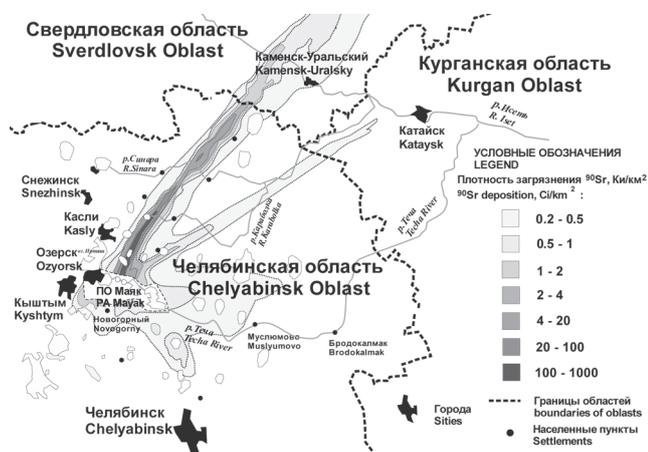


Рис. 1. Карта-схема загрязнения территории Урала стронцием-90 по состоянию на 1997 г. (1 Ки/км² = 37 кБк/м²) [Fig. 1. Schematic map of ⁹⁰Sr contamination of territories of the Urals region as of 1997 (1 Ci/km² = 37 kBq/m²)]

Как видно на рисунке 1, ось ВУРСа проходит в северо-восточном направлении от ПО «Маяк» в сторону г. Каменск-Уральского. Загрязнения в направлении г. Катайска, восточном и юго-восточном направлениях обусловлены, в основном, ветровым переносом радионуклидов из озера Карачай весной 1967 г. Наименьшая плотность загрязнения на 1997 г. (0,2–0,5 Ки/км²), указанная на рисунке 1, соответствует значениям 0,4–1,0 Ки/км² в 1967 г. и 0,5–1,2 Ки/км² в 1957 г. Для сравнения, средний уровень загрязнения почв стронцием-90 глобального происхождения в 1957 г. был 0,005 Ки/км², а начиная с 1963 г. составлял 0,03–0,05 Ки/км² [3].

Специфика радиационной обстановки в Уральском регионе, исторически сложившаяся в результате деятельности ПО «Маяк», определила особые требования к методологии оценки доз внутреннего облучения населения. Методические указания МУ 2.6.1.024-95 и МУ 2.6.1.1182-03 «Реконструкция накопленной дозы у жителей бассейна р. Теча и зоны аварии в 1957 г. на производственном объединении «Маяк» определяют требования к исходным данным и процедуру расчета накопленных доз (включая дозы от инкорпорированных трансурановых радионуклидов). Оценки доз внутреннего облучения базируются на данных мониторинга содержания радионуклидов в организме: 1) прижизненных измерений содержания ⁹⁰Sr на спектрометре излучения человека СИЧ-9.1 у жителей прибрежных НП р. Теча; 2) посмертных исследований содержания трансурановых радионуклидов у лиц, проживавших вблизи ПО «Маяк».

Цель исследования – провести комплексный анализ и оценку динамики уровней внутреннего облучения населения на территориях, загрязненных в результате деятельности ПО «Маяк», на основе результатов мониторинга содержания долгоживущих техногенных радионуклидов в организме жителей Уральского региона.

Материалы и методы

Мониторинг содержания радионуклидов в организме у жителей Уральского региона продолжается более 50 лет, главным образом силами двух учреждений: Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ, г. Челябинск) и Южно-Уральского института биофизики (ЮУриБФ, г. Озёрск). ЮУриБФ проводит мониторинг работников ПО «Маяк» и населения Озёрского городского округа. УНПЦ РМ проводит мониторинг людей, облучившихся в НП на реке Теча и ВУРСа. Таким образом, полученные данные не дублировали, а дополняли друг друга. В обеих лабораториях анализировали биопробы, взятые посмертно, а также проводили прижизненные измерения на спектрометрах излучения человека (СИЧ). В таблице 1 представлены сводные сведения по опубликованным работам, позволяющие оценить масштабы мониторинга.

Таблица 1

Сводная таблица по мониторингу долгоживущих техногенных радионуклидов в организме у жителей Уральского региона

[Table 1

Summary table on monitoring of long-lived anthropogenic radionuclide body burden in residents of the Urals region]

| Территория наблюдения [Catchment area] | Период наблюдения [Follow-up period] | Радионуклид / метод анализа [Radionuclide / analysis method] | Число человек [Number of people] | Ссылка [Reference] |
|--|--------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------|
| Река Теча [Techa River] | 1951–1989 | ⁹⁰ Sr/ аутопсии [⁹⁰ Sr/ autopsy] | 246 | [4, 5] |
| | 1974–2014 | ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs/ СИЧ [⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs/ WBC] | 10174 | [5, 6, 7] |
| ВУРС [EURT] | 1960–1988 | ⁹⁰ Sr/ аутопсии [⁹⁰ Sr/ autopsy] | 1646 | [8] |
| | 1974–1997 | ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs/ СИЧ* [⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs/ WBC*] | 369 | [8] |

| Территория наблюдения [Catchment area] | Период наблюдения [Follow-up period] | Радионуклид/ метод анализа [Radionuclide / analysis method] | Число человек [Number of people] | Ссылка [Reference] |
|--|---|--|-------------------------------------|-----------------------|
| г. Озёрск [Ozyorsk] | 1963–2013 | ⁹⁰ Sr/ аутопсии [⁹⁰ Sr/ autopsy] | 961 | [9] |
| | 1966–1980 | ¹³⁷ Cs/ аутопсии [¹³⁷ Cs / autopsy] | 468 | [10] |
| | 1971–1994 | ¹³⁷ Cs/ СИЧ | 835 | [10] |
| | 2011–2014 | [¹³⁷ Cs/ WBC] | 350 | [9] |
| | 1964–1971 | ²³⁹ Pu/ аутопсии [²³⁹ Pu/ autopsy] | 104 | [11] |
| г. Снежинск [Snezhinsk] | 1975–2013 | ²³⁸ , ²³⁹ , ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Am / аутопсии** [²³⁸ , ²³⁹ , ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Am / autopsy**] | 249 | [9] |
| | 1982–1983 | ⁹⁰ Sr/ аутопсии [⁹⁰ Sr/ autopsy] | 117 | [12] |
| г. Кыштым, г. Касли, пос. Новогорный и другие НП Челябинской области [Kyshtym, Kasli, Novogorny and other settle- ments of Chelyabinsk Oblast] | 1961–1985 | ⁹⁰ Sr/ аутопсии [⁹⁰ Sr/ autopsy] | 1481 | [13] |
| | 1983–1994 | ²³⁸ Pu+ ²³⁹ , ²⁴⁰ Pu/ аутопсии*** [²³⁸ Pu+ ²³⁹ , ²⁴⁰ Pu/ autopsy***] | 446 | [14] |
| | 1975–1997 2006–2012 | ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs/ СИЧ [⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs/ WBC] | 1277 1090 | [15] [7] |

* – только для жителей эвакуированных НП, которые в результате миграции расселились по территории всей Челябинской области
[* – only for evacuees, who migrated throughout the entire Chelyabinsk Oblast];

** – с 1978 г. в образцах измеряли Σ (²³⁸Pu+²³⁹,²⁴⁰Pu), а также ²⁴¹Am (дочерний радионуклид ²⁴¹Pu) методом альфа-радиометрии; а с 2000 г. ²³⁸Pu, ²³⁹,²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am определяли раздельно методом альфа-спектрометрии

[** – since 1978, Σ (²³⁸Pu+²³⁹,²⁴⁰Pu) and ²⁴¹Am (daughter of ²⁴¹Pu) was measured in the samples by alpha-radiometry, and since 2000 the ²³⁸Pu, ²³⁹,²⁴⁰Pu and ²⁴¹Am have been measured separately by alpha-spectrometry];

*** – для этих образцов фиксировали только дату и место смерти человека, предысторию его облучения на территории Урала не восстанавливали

[*** only the date and place of death were recorded for these samples, the exposure histories were not traced].

Методы измерений содержания долгоживущих радионуклидов, которые использовались в ЮУриБФ и УНПЦ РМ, были детально описаны ранее [6, 7, 9, 10, 14–18]. Для измерения содержания ¹³⁷Cs в организме обе лаборатории с начала 1970-х гг. использовали спектрометры излучения человека (СИЧ) [6, 10]. Значения минимальной измеряемой активности (МИА) для используемых в настоящее время спектрометров составляют 100 Бк [9, 17].

Содержание ⁹⁰Sr в образцах костной ткани с конца 1950-х гг. обе лаборатории определяли посмертно радиохимическими методами [13, 14]. С 1974 г. в УНПЦ РМ содержание ⁹⁰Sr в организме начали измерять прижизненно на уникальном спектрометре СИЧ-9.1 по тормозному излучению дочернего ⁹⁰Y с использованием 4 фосвических детекторов [6, 16]. Порог обнаружения ⁹⁰Sr на СИЧ-9.1 составлял 820 Бк; МИА равнялась 2 кБк [15]. С 2006 г. содержание ⁹⁰Sr определяют на модернизированном спектрометре СИЧ-9.1М [17]. Для нового прибора порог обнаружения ⁹⁰Sr составил 350 Бк; МИА=1 кБк; погрешность измерений <30% для уровней >5 кБк и 40% для уровней <5 кБк [7].

В ЮУриБФ для измерения содержания трансураниевых радионуклидов (²³⁸Pu+²³⁹,²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am) в образцах легких, печени и костей до 2000 г. использовали альфа-радиометрию [18]. С 2000 г. по настоящее время в ЮУриБФ образцы тканей, взятые при аутопсиях, анализируют на

содержание ²³⁸Pu, ²³⁹,²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am методом альфа-спектрометрии, а содержание ⁹⁰Sr определяют на низкофоновом альфа-бета-радиометре [9]. Пороги обнаружения и минимальные измеряемые активности на единицу массы образца для всех радионуклидов детально описаны в статье [9].

Результаты и обсуждение

Основные результаты мониторинга жителей Уральского региона показаны на примере следующих групп населения:

1. Жители НП, расположенных в 1949–1956 гг. в пределах до 100 км ниже по течению р. Теча от места сбросов жидких радиоактивных отходов ПО «Маяк» (начиная с 1961 г., на этом отрезке реки оставался только НП Муслимово, а жители остальных НП были переселены в 1955–1960 гг.).

2. Взрослые жители НП, расположенных в северо-восточном направлении от ПО «Маяк» вдоль оси ВУРСа в пределах до 100 км от места аварии.

3. Взрослые жители г. Озёрска, расположенного в северо-западном направлении от ПО «Маяк» на расстоянии 8 км.

Результаты мониторинга, сгруппированные по отдельным радионуклидам, кратко просуммированы ниже.

Цезий-137

Измерения ^{137}Cs в организме отражают текущий уровень поступления радионуклида с рационом, поскольку он депонируется в мягких тканях, период его полувыведения у взрослых составляет 100–110 дней [3]. Таким образом, содержание ^{137}Cs в организме не зависит от предыдущих контактов с источниками поступления. Результаты прижизненных измерений содержания ^{137}Cs в организме жителей НП реки Теча и г. Озёрска показаны на рисунке 2.

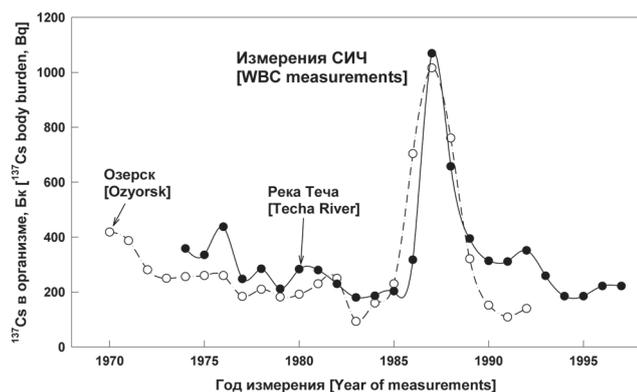


Рис. 2. Динамика содержания ^{137}Cs в организме людей, проживающих в НП на реке Теча и в г. Озёрске по измерениям УНПЦ РМ и ЮУриБФ

[Fig. 2.] Dynamics of ^{137}Cs -body burdens for people living on the Tcha River and in the Ozyorsk city according to the data of URCRM and SUBI

Как видно из рисунка 2, с 1974 по 1985 г. содержание ^{137}Cs в организме людей, проживающих в НП на р. Теча и в г. Озёрске, имело близкие значения и постепенно снижалось с уровней, близких к 400 Бк, до 100–200 Бк. Это в 2–4 раза превышало средние по России оценки содержания глобального ^{137}Cs [3]. В 1986–1987 гг. в результате выпадений ^{137}Cs после Чернобыльской аварии содержание ^{137}Cs в организме жителей Урала резко возросло до 0,8–1,0 кБк, а затем снова снизилось к началу 1990-х гг. Пик «чернобыльского цезия» на Урале был синхронно зарегистрирован по измерениям СИЧ в обеих лабораториях (см. рис. 2).

Как видно из рисунка 2, в начале 1990-х гг. у жителей НП Муслюмово всё ещё наблюдались повышенные уровни содержания ^{137}Cs в организме. Это связано с тем, что в этот период люди стали более интенсивно использовать загрязненную ^{137}Cs пойму реки для выпаса скота и сенокосов, несмотря на запрет использования воды и поймы р. Теча для любых хозяйственно-бытовых нужд, который был введён ещё в 1954 г.

К 1995 г. содержание ^{137}Cs , измеренное на СИЧ-9.1, снизилось до уровней 180–220 Бк. Это соответствовало данным экспедиции Санкт-Петербургского института радиационной гигиены, согласно которым в 1998 г. оценка среднего содержания ^{137}Cs в организме жителей села Муслюмово составляла 160 Бк [19]. Измерения на СИЧ-9.1М, выполненные в период 2006–2012 гг., показали, что среднее содержание ^{137}Cs

в Муслюмово снизилось до 128 Бк, при этом 85% измерений были ниже МИА. В этот же период времени 97% измерений ^{137}Cs у жителей г. Озёрска были ниже МИА [9]. Это объясняется тем, что в этот период не было дополнительных поступлений ^{137}Cs в окружающую среду. Естественные процессы радиоактивного распада и перехода радионуклида в необменные формы привели к тому, что содержание ^{137}Cs в Уральском регионе снизилось повсеместно.

Стронций-90

Будучи аналогом кальция, стронций-90 накапливается и длительное время удерживается в костной ткани человека. С 1951 г. содержание ^{90}Sr у жителей НП вдоль реки Теча оценивали по результатам посмертных исследований образцов костных тканей. Уровни накопления ^{90}Sr зависели от расстояния от места проживания человека до места сбросов 1949–1956 гг., а также от источников питьевой воды (река или колодцы). Результаты исследований показали, что у взрослых жителей НП, расположенных на р. Теча в пределах 100 км от места сброса, средние значения содержания ^{90}Sr уменьшились с 80 кБк в 1951 г. до 10 кБк в 1975 г. (рис. 3). В период с 1974 по 1997 г. измерения ^{90}Sr были продолжены прижизненно и показали, что содержание ^{90}Sr у жителей НП вдоль реки Теча продолжало снижаться со скоростью 2,5–5,0% в год (см. рис. 3).

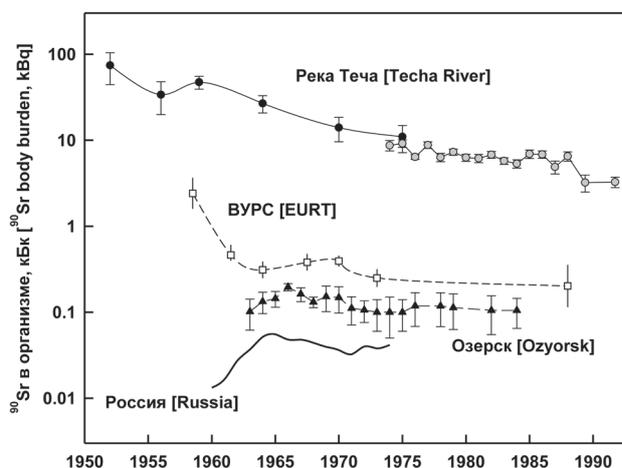


Рис. 3. Динамика содержания ^{90}Sr в организме у различных групп жителей Уральского региона. Верхняя кривая – взрослые жители НП вдоль реки Теча (черным цветом показаны посмертные измерения, а серым цветом – прижизненные измерения). Посмертные измерения ^{90}Sr у взрослых жителей ВУРСа (16–100 км от места аварии) показаны квадратными символами, а треугольные символы соответствуют жителям г. Озёрска. Нижняя кривая показывает средние по России уровни глобального ^{90}Sr в организме по данным [3]

[Fig. 3.] The dynamics of ^{90}Sr -body burdens for various groups of the Urals residents. The upper curve is adult residents of the Tcha River (black color shows postmortem measurements, and gray color – in vivo measurements). Postmortem measurements of ^{90}Sr in adult residents of the EURT (16–100 km from the accident site) are shown by square symbols, and triangular symbols correspond to the inhabitants of the Ozyorsk city. The lower curve shows Russia national average levels of the global ^{90}Sr -body burden according to [3]

С 1960-х гг. на Урале (как и в других регионах земного шара) в связи с глобальными выпадениями после испытаний ядерного оружия была организована широкомасштабная программа измерений ^{90}Sr в образцах кости [3, 4, 9]. Результаты исследований показали, что содержание ^{90}Sr в костной ткани взрослых жителей северной части Челябинской области (включая г. Озёрск) в 2–4 раза превышало среднероссийские значения глобального ^{90}Sr (см. рис. 3). Посмертные измерения ^{90}Sr у жителей г. Озёрска продолжались до настоящего времени и показали, что содержание в скелете у людей, приехавших в город в 1949–1960 гг., на начало 1990-х гг. составляло 140 ± 70 Бк, а к настоящему времени снизилось до 37 ± 12 Бк [9].

Посмертные измерения ^{90}Sr у постоянных жителей НП, расположенных вдоль оси ВУРСа на расстоянии 16–100 км от места аварии, показали, что содержание ^{90}Sr в скелете снизилось с 2,5 кБк в 1959 г. до 0,2 кБк в 1988 г. Из рисунка 3 видно, что влияние глобальных выпадений ^{90}Sr (максимум в 1964 г.) можно заметить только на кривых для жителей г. Озёрска и зоны ВУРСа. Дополнительное загрязнение территорий вокруг ПО «Маяк» в 1967 г., которое наложилось на территорию ВУРСа, не привело к существенному увеличению содержания ^{90}Sr , однако замедлило его выведение из организма.

В период 1980–1985 гг. была организована программа измерений на СИЧ–9.1 людей, эвакуированных с наиболее загрязненных территорий, расположенных на оси ВУРСа на расстоянии 12,5–23 км от места аварии. Уровни содержания ^{90}Sr оказались выше пределов чувствительности прибора (МИА=2 кБк) только для лиц, которые были моложе 20 лет на момент аварии в 1957 г. Уровни ^{90}Sr у людей, эвакуированных с ВУРСа в детском и подростковом возрасте, через 25 лет оставались значительно выше глобальных и составляли 2–4 кБк [8].

Известно, что уровни накопления ^{90}Sr в организме существенно зависят от возраста на момент поступления радионуклида, это наиболее ясно показывают многочисленные прижизненные измерения у жителей НП по реке Теча (рис. 4). Как видно из рисунка 4, максимальные значения стронция наблюдались у людей, которые были подростками (12–15 лет) в период основного поступления ^{90}Sr в 1950–1953 гг. Для них уровни содержания ^{90}Sr были в 5–6 раз выше по сравнению со взрослыми. Для людей 1930–1945 годов рождения, которые в 1950–1956 гг. проживали в НП на реке Теча, содержание ^{90}Sr превышало предел детектирования СИЧ–9.1М (МИА=1 кБк) спустя 60 лет с момента основного поступления (см. рис. 4). Эти люди составляют в настоящее время исторически сложившуюся критическую группу населения Уральского региона по содержанию ^{90}Sr в организме. Среднее содержание ^{90}Sr в этой критической группе в период 2006–2012 гг. равнялось $2,6 \pm 2,0$ кБк. При этом мощность поглощенной дозы в красном костном мозге от бета-излучения радионуклидов $^{90}\text{Y}/^{90}\text{Sr}$, депонированных в скелете, составляла $0,5 \pm 0,4$ мГр в год.

В целом, массовые измерения ^{90}Sr у жителей реки Теча позволили получить уникальные данные, которые были использованы для разработки половозрастной биокинетической модели поведения стронция в организме человека [5]. Также были разработаны биокинетические модели для беременных и кормящих женщин и оценены переходы стронция в плод и грудное молоко [20, 21].

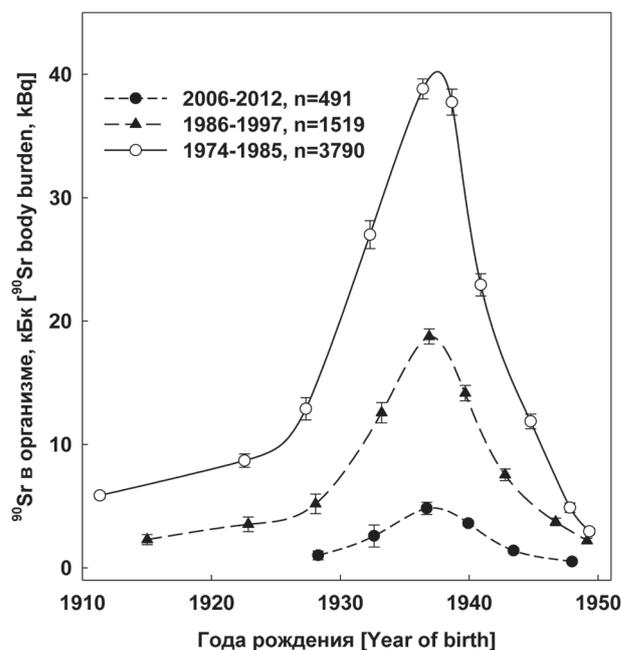


Рис. 4. Изменение со временем измеренного на СИЧ содержания ^{90}Sr в организме для различных возрастных групп людей, которые проживали в 1950–1956 гг. в НП вдоль реки Теча в пределах 100 км от места сброса
 [Fig. 4. The change over time of the ^{90}Sr measured with the WBC for different age groups of people who in 1950–1956 lived on the Techa River within 100 km of the discharge site]

Трансурановые радионуклиды

Плутоний поступал в организм жителей г. Озёрска и НП подветренной зоны ПО «Маяк» с вдыхаемым воздухом. Органами депонирования плутония являются скелет, печень и лёгкие. Содержание трансурановых радионуклидов ($^{238,239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am) оценивали по результатам радиохимических анализов образцов этих органов, взятых посмертно.

Первые данные о содержании ^{239}Pu в воздухе с подветренной стороны и лёгочной ткани жителей г. Озёрска, не имевших профессиональных контактов с радиоактивностью, были опубликованы в статье [11]. Согласно этим данным, среднее значение концентрации ^{239}Pu в легких в 1964–1971 гг. составляло 0,83 Бк/кг, что значительно превышало глобальные уровни этого радионуклида, равные 0,015 Бк/кг [11]. В ЮУрИБФ систематический мониторинг содержания изотопов плутония ($^{238,239,240}\text{Pu}$) у жителей г. Озёрска, расположенного на расстоянии 8 км от ПО «Маяк», был начат в 1975 г. Согласно данным [22], среднее значение концентрации плутония в легких взрослых людей в период 1975–1994 гг. равнялось 0,17 Бк/кг. При этом доля плутония в легких относительно его содержания во всём организме составляла 4–5%.

В 1983–1994 гг. были проведены обследования жителей НП Челябинской области, расположенных на расстоянии от 8 до 90 км от ПО «Маяк», которые показали, что содержание плутония в организме существенно снижалось с увеличением расстояния до места проживания человека от ПО «Маяк» [23]. Наибольшие уровни накопления

наблюдались у жителей г. Озёрска, среди которых максимальные значения были получены для людей, постоянно проживавших в городе с начала 1950-х гг. [23]. Таким образом, эти люди составляют исторически сложившуюся критическую группу населения Уральского региона по содержанию плутония в организме. В 1979–1994 гг. среднее содержание плутония в этой группе равнялось $4,0 \pm 0,24$ Бк [14]. В 2000–2013 гг. оно снизилось до $2,2 \pm 0,43$ Бк [9]. На рисунке 5 показаны уровни содержания плутония, усреднённые за весь период наблюдения (249 аутопсий) в зависимости от года начала проживания человека в г. Озёрске. Как видно из рисунка 5, у людей, приехавших в город после 2000 г., содержание плутония в организме не отличается от глобального уровня.

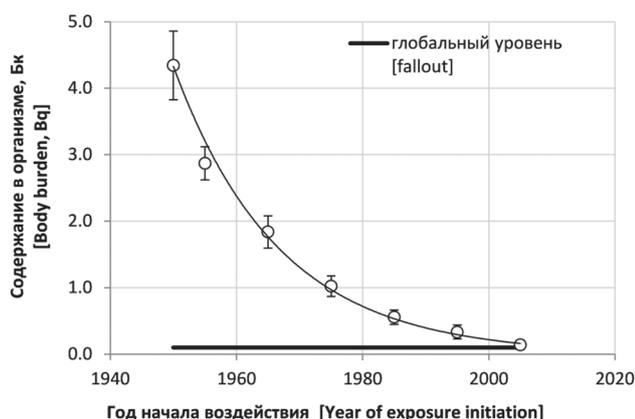


Рис. 5. Среднее содержание плутония ($\Sigma Pu = {}^{238}Pu + {}^{239,240}Pu$) у жителей г. Озёрска в зависимости от года начала воздействия по сравнению с уровнем глобального плутония [Fig. 5. Average Pu- body burden ($\Sigma Pu = {}^{238}Pu + {}^{239,240}Pu$) in Ozyorsk residents against year of exposure initiation in comparison with the content of fallout plutonium]

Альфа-спектрометрические измерения образцов тканей показали, что вклад ${}^{238}Pu$ в суммарную активность изотопов плутония был мал и составлял в среднем 4–8% [9]. Вклад ${}^{241}Am$ в суммарную альфа-активность составлял 27% для скелета, 12% для легких и 9% для печени [9]. Для организма в целом вклад ${}^{241}Am$ увеличивался от 5% у людей, приехавших в г. Озёрск в 1949–1970 гг., до почти 30% у людей, приехавших в город после 1970-х гг.

Эффективные дозы внутреннего облучения

Как было описано выше, долговременный мониторинг содержания радионуклидов в организме у жителей Уральского региона позволил нам выделить исторически сложившиеся критические группы людей с наибольшими уровнями в организме стронция-90 и плутония. В состав первой группы вошли люди, которые в начале 1950-х гг. были подростками и проживали в НП на реке Теча. Уровни перорального поступления ${}^{90}Sr$ для этих людей в 1950–1953 гг. составляли 0,3–1,4 МБк/год [24]. В состав второй группы вошли взрослые жители г. Озёрска, для которых уровни ингаляционного поступления плутония в период 1951–1958 гг. достигали 8 Бк/год [9].

В таблице 2 показаны ожидаемые к 70-летнему возрасту эффективные дозы от поступления в организм долгоживущих радионуклидов с 1949 по 2012 г. для жителей села Муслюмово и г. Озёрска, оцененные с использованием дозовых коэффициентов (Зв/Бк) из Публикации 119 МКРЗ [25]. Методы оценки поступления радионуклидов и результаты расчета доз для взрослых жителей г. Озёрска были детально описаны в работе [9]. Эти результаты показаны в таблице 2.

Средние уровни поступления ${}^{90}Sr$ и ${}^{137}Cs$ для жителей села Муслюмово взяты из работ [24, 26]. Дозы рассчитаны для постоянных жителей 1938 года рождения, находившихся на начало поступления в возрасте 12 лет. Для учета возрастной зависимости дозовых коэффициентов для ${}^{90}Sr$ были использованы значения $8,0 \times 10^{-8}$ Зв/Бк для возрастов 12–17 лет и $2,8 \times 10^{-8}$ Зв/Бк для возрастов >17 лет (в соответствии с МУ 2.6.1.1182-03). Дозовый коэффициент для ${}^{137}Cs$ ($1,3 \times 10^{-8}$ Зв/Бк) не изменяется с возрастом. Для оценки доз от ингаляционного поступления плутония и америция было использовано отношение содержания плутония у жителей села Муслюмово к его содержанию у жителей г. Озёрска, которое, согласно МУ 2.6.1.024-95, равнялось 0,15.

Как видно из таблицы 2, ожидаемая эффективная доза для жителей села Муслюмово превышает 300 мЗв, причем вклад ${}^{90}Sr$ составляет 85%. Необходимо заметить, что в селе Муслюмово с 1954 г. действовал запрет на использование воды и поймы р. Теча для хозяйственно-бытовых нужд, который частью жителей не соблюдался. В 2012 г. все жители села Муслюмово были отселены от загрязнённой реки. Ожидаемая эффективная доза для

Таблица 2

Ожидаемые эффективные дозы за счет поступления долгоживущих радионуклидов с 1949 по 2012 г. для критических групп населения Урала

[Table 2

Committed effective doses from intakes of long-lived radionuclides over the period from 1949 through 2012 for critical groups of the Urals residents]

| Группа населения [Population group] | Ожидаемая эффективная доза, мЗв [Committed effective dose, mSv] | | | |
|--|--|--------------|---------------------------|---------------|
| | ${}^{90}Sr$ | ${}^{137}Cs$ | ${}^{239}Pu + {}^{241}Am$ | Сумма [Total] |
| Подростки из с. Муслюмово на р. Теча [Adolescentss from Muslyumovo on the Techa River] | 256 | 46 | 0,6 | 303 |
| Взрослые жители г. Озёрска [Adult residents of Ozyorsk] | 1,9 | 7,3 | 3,8 | 13 |

жителей г. Озёрска была значительно меньше и составила 13 мЗв, из которых 56% было обусловлено ^{137}Cs , а 29% – трансурановыми радионуклидами. Никаких ограничительных мер в городе не вводилось.

Необходимо отметить, что, помимо долгоживущих радионуклидов, рассмотренных в настоящей работе, дополнительный вклад в дозу внутреннего облучения жителей Уральского региона внесли продукты деления урана с более коротким периодом полураспада (^{131}I , ^{89}Sr , ^{144}Ce , ^{106}Ru и др.), а также внешнее облучение от загрязненной окружающей среды. Поэтому суммарные эффективные дозы от всех источников облучения были ещё выше.

Заключение

1. Мониторинг содержания радионуклидов в организме у жителей Уральского региона продолжается более 50 лет, главным образом силами УНПЦ РМ и ЮУриБФ.

2. В настоящее время для мониторинга изотопов плутония и америция в ЮУриБФ используется метод радиохимического анализа образцов аутопсии, для измерений изотопов плутония и америция – альфа-спектрометрический метод. Для мониторинга цезия-137 обе организации используют прижизненный метод измерений на СИЧ. Для мониторинга стронция-90 в ЮУриБФ используется радиометрический метод по данным аутопсии, в УНПЦ РМ – прижизненный метод измерений на СИЧ.

3. Мониторинг позволил получить объективную информацию об уровнях накопления радионуклидов в организме как от локальных источников, связанных с «наследием» прошлой производственной деятельности ПО «Маяк» (загрязнение реки Теча, ВУРС, газо-аэрозольные выбросы), так и от источников вне Уральского региона (глобальные выпадения после испытаний ядерного оружия и выпадения после Чернобыльской аварии).

4. Мониторинг позволил получить уникальные данные, которые были использованы для разработки биокинетических моделей, представленных в Международную комиссию по радиологической защите.

5. Современная ситуация в сравнении с ситуацией 1990-х гг. показала, что в организме у людей, которые в 1950-е гг. проживали в НП на реке Теча, достоверно обнаруживается ^{90}Sr , а у людей, проживающих с 1950-х гг. в г. Озёрске, измерены достоверные уровни трансурановых радионуклидов (^{239}Pu , ^{241}Am). У людей, приехавших в Уральский регион или же родившихся в регионе после 1960 г., превышений содержания радионуклидов в организме над глобальными уровнями не обнаружено.

6. Для объективной оценки текущей радиационной обстановки на территории Уральского региона, загрязненной в результате прошлых аварий и инцидентов, необходимо разделять влияние прошлых и текущих выбросов ПО «Маяк», для чего необходимо дальнейшее продолжение мониторинга.

Благодарность

Анализ выполнен в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности» при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России.

Литература

1. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона / под ред. С.К. Шойгу. – М.: Комтехпринт, 2002. – 287 с.

- Карта современных (на 1997 г.) уровней загрязнения почв Южно-Уральского региона стронцием-90 от аварий 1957 и 1967 гг. на ПО «Маяк». Масштаб 1:200000. – М.: Институт глобального климата и экологии, 2000.
- Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека / под ред. А.Н. Мареев. – М.: Атомиздат, 1980. – 186 с.
- Толстых, Е.И. Компьютерный регистр аутопсийного материала костной ткани человека как основа для дозиметрических, радиоэкологических и антропологических исследований / Е.И. Толстых, Н.Б. Шагина, Е.Э. Токарева [и др.] // Сб. «Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин» Вып. 11. – Екатеринбург, 2007. – С. 290-319.
- Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. [et al.] Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. J. Radiol. Prot. 2015, 35(1), pp. 87-127.
- Kozheurov V.P. СИЧ-9.1-A unique whole-body counting system for measuring Sr-90 via bremsstrahlung: The main results from a long-term investigation of the Techa River population. Sci. Total Environ. 1994, 14(1-2), pp. 37-48.
- Толстых, Е.И. Результаты прижизненных измерений стронция-90 в организме жителей Уральского региона: анализ данных за 2006-2012 гг. / Е.И. Толстых [и др.] // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, №1. – С. 5-11.
- Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O. [et al.] Reconstruction of radionuclide intakes for residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). Radiat. Environ. Biophys., 2017, 56, pp. 27-45.
- Suslova K.G., Romanov S.A., Efimov A.V. [et al.] Dynamics of body-burdens and doses due to internal irradiation from intakes of long-lived radionuclides by residents of Ozyorsk situated near Mayak PA. J. Radiol. Prot., 2015, 35, pp. 789-818.
- Хохряков, В.Ф. Накопление цезия-137 в организме жителей г. Челябинска-65 / В.Ф. Хохряков, А.Г. Бажин, В.И. Черников // Сборник тезисов I международного симпозиума «Хроническое радиационное воздействие: риск отдаленных эффектов», Челябинск, 9-13 января 1995 г. – Челябинск, 1995. – С. 16-17.
- Зыкова, А.С. Содержание плутония-239 в атмосферном воздухе и легочной ткани человека / А.С. Зыкова [и др.] // Бюллетень радиационной медицины. – 1974. – № 4. – С. 99-105.
- Гавриловский, Л.П. Оценка доз облучения жителей г. Снежинска по содержанию стронция-90 в костях и зубах людей / Л.П. Гавриловский [и др.] // Вопросы радиационной безопасности. – 2004. – №2. – С. 59-64.
- Толстых, Е.И. Особенности накопления и выведения ^{90}Sr у жителей Уральского региона в период 1957-1988 гг. / Е.И. Толстых [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2005. – Т. 45, №4. – С. 495-504.
- Сулова, К.Г. Особенности распределения и прогноз уровней накопления долгоживущих радионуклидов ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{90}Sr в организме у населения Южного Урала, проживающего в зоне выбросов ПО «Маяк» // Сб. «Источники и эффекты облучения работников ПО «Маяк» и населения, проживающего в зоне влияния предприятия» Часть I. – Озёрск, 2009. – С. 195-233.
- Kozheurov V.P., Zalyapin V.I., Shagina N.B. [et al.] Evaluation of uncertainties in the ^{90}Sr -body-burdens obtained by whole-body count: Application of Bayes' rule to derive detection limits by analysis of a posteriori data. Appl. Radiat. Isot., 2002, 57, pp. 525-535.
- Белле, Ю.С. Спектрометр излучений человека СИЧ-9.1, позволяющий измерять низкие содержания инкорпорированного стронция-90 / Ю.С. Белле [и др.] // Мед. радиология. – 1975. – №20. – С. 52-58.
- Бугров, Н.Г. Модернизированный спектрометр излучений человека СИЧ-9.1М для измерения содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в организме / Н.Г. Бугров, М.О. Дегтева, С.М. Аршанский // Медицина экстремальных ситуаций. – 2008. – № 4(26). – С. 78-86.

18. Khokhryakov V.F., Kudryavtseva V.I., Chernikov V.I. [et al.] A scintillation method for determination of actinide alpha-activity in samples. *Radioanal. Nucl. Chem*, 1998, 234, pp. 293-295.
19. Balonov M.I., Bruk G.Ya., Golikov V.Yu. [et al.] Assessment of current exposure of the population living in the Techa River basin from radioactive releases of the Mayak facility. *Health Phys*, 2007, 92(2), pp. 134-147.
20. Shagina N.B., Fell T.P., Tolstykh E.I. [et al.] Strontium biokinetic model for the pregnant woman and fetus: application to Techa River studies. *J. Radiol. Prot.*, 2015, 35, pp. 659-676.
21. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Fell T.P. [et al.] Strontium biokinetic model for the lactating woman and transfer to breast milk: application to Techa River studies. *J. Radiol. Prot.*, 2015, 35, pp. 677-694.
22. Сулова, К.Г. Особенности распределения и ритма накопления плутония у населения зоны наблюдения / К.Г. Сулова, В.Ф. Хохряков // Вопросы радиационной безопасности. – 1996. – №1. – С. 35–44.
23. Сулова, К.Г. Содержание плутония в организме жителей Челябинской области / К.Г. Сулова, В.Ф. Хохряков, С.А. Романов // Атомная энергия. – 1994. – Т. 77, № 6. – С. 440–445.
24. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Phys*, 2011, 101(1), pp. 28–47.
25. ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41, Suppl. 1.
26. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Phys*, 2013, 104(5), pp. 481–498.

Поступила: 18.05.2018 г.

Дёгтева Марина Олеговна – кандидат технических наук, заведующая биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России.

Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского д. 68а. E-mail: marina@urcrm.ru

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

Сулова Клара Гилимовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Романов Сергей Анатольевич – кандидат биологических наук, директор Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Дёгтева М.О., Толстых Е.И., Сулова К.Г., Романов С.А., Аклеев А.В. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона // *Радиационная гигиена*. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 30-39. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-30-39

Analysis of the results of long-lived radionuclide body burden monitoring in residents of the Urals region

Marina O. Degteva¹, Evgenia I. Tolstykh¹, Klara G. Suslova², Sergey A. Romanov², Alexandr V. Akleyev¹

¹Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

²Southern Urals Biophysics Institute, Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

Objective of the study: To conduct a comprehensive analysis and assessment of the dynamics of internal exposure levels in the territories contaminated due to the activities of the Mayak Production Association, based upon the results of long-term monitoring of the long-lived anthropogenic radionuclide body burden in

Marina O. Degteva

Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia

Address for correspondence: Vorovsky str., 78a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: marina@urcrm.ru

residents of the Urals region. *Materials and methods:* The data of postmortem and in vivo examinations for three groups of population were analyzed: 1) residents of riverside villages of the upper and middle reaches of the Techa River, contaminated in 1949–1956 with liquid radioactive waste; 2) people who were exposed as a result of the 1957 accident on the territory of the East Urals Radioactive Trace; 3) residents of the Ozyorsk city, located at an 8 km distance from the enterprise. The following methods of the examinations were used: 1) radiochemical analysis of specimens of organs and tissues sampled at autopsy; 2) in vivo measurements with the use of the whole body counters. The results of measurements of cesium-137, strontium-90 and trans-uranium radionuclide body burden over the period 1950s – present are provided. Data analysis made it possible to distinguish two historically formed groups of population with the maximum levels of current strontium-90 and plutonium body burden. The first group included people who lived in the early 1950's in the basin of the Techa River, for whom the levels of oral intake of ^{90}Sr reached 1.4 MBq/year. The second group comprised residents of the Ozyorsk city, for whom the levels of inhalation intake of plutonium in the period 1951–1958 reached 8 Bq/year. *Conclusion:* Estimates of the committed effective doses due to the intake of long-lived radionuclides over the period from 1949 through 2012 for critical groups of residents of the Urals were: 300 mSv for former residents of the Muslyumovo settlement on the Techa River (^{90}Sr contribution – 85%) and 13 mSv for residents of the Ozyorsk city (the contribution of trans-uranium radionuclides is 30%).

Key words: the Mayak Production Association, the Techa River, East Urals Radioactive Trace, cesium, strontium, plutonium.

References

- Consequences of anthropogenic radiation exposure and rehabilitation problems of the Ural region. Ed.: S.K. Shoygu. Moscow, 2002, 287 p. (in Russian).
- Map of contemporary (normalized to 1997) contamination of soils by Strontium-90 of the Southern Urals region as a result of the 1957 and 1967 accidents at the Mayak PA. 1:200000. Moscow: Institute of Global Climate and Ecology, 2000 (in Russian).
- Global fallout of nuclear explosion products as a factor of human exposure. Ed.: A.N. Marey. Moscow, 1980, 186 p. (in Russian).
- Tolstykh E.I., Shagina N.B., Tokareva E.E. [et al.] Computer registry of autopsy samples of human bone tissue as a basis for dosimetric, radio-ecological and anthropological research. In: Problems of ecology and border disciplines. Issue 11. Ekaterinburg: Urals State University, 2007, pp. 290–319 (in Russian).
- Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. [et al.] Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. J. Radiol. Prot., 2015, 35(1), pp.87–127.
- Kozheurov V.P. SICH-9.1-A unique whole-body counting system for measuring Sr-90 via bremsstrahlung: The main results from a long-term investigation of the Techa River population. Sci. Total Environ, 1994, 14(1–2), pp. 37–48.
- Tolstykh E.I., Bougrov N.G., Krivoshchapov V.A. [et al.] Results of in vivo measurements of strontium-90 body-burden in Urals residents: data analysis on 2006–2012. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2013, Vol. 6, pp. 5–11 (in Russian).
- Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O. [et al.] Reconstruction of radionuclide intakes for residents of East Urals Radioactive Trace (1957–2011). Radiat. Environ. Biophys., 2017, 56, pp. 27–45.
- Suslova K.G., Romanov S.A., Efimov A.V. [et al.] Dynamics of body-burdens and doses due to internal irradiation from intakes of long-lived radionuclides by residents of Ozyorsk situated near Mayak PA. J. Radiol. Prot., 2015, 35, pp. 789–818.
- Khokhryakov V.F., Bazhin A.G., Chernikov V.I. The depositing of Cesium-137 in organism of Chelyabinsk-65 residents. In: Chronic Radiation Exposure: Risk of Late Effects. Abstracts. Chelyabinsk: Urals Research Center for Radiation Medicine, 1995, pp. 96–97.
- Zykova A.S., Shumakov V.I., Voronina T.F. [et al.] Content of plutonium-239 in atmospheric air and human lung tissue. Bulletin Radiatsionnoy Meditsiny = Bulletin of Radiation Medicine, 1974, No 4, pp. 99–105. (in Russian).
- Gavrilovsky L.P., Subbotin L.A., Shklyarevskaya N.A. Assessment of radiation doses for residents of Snezhinsk based on the content of strontium-90 in the bones and teeth of people. Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Problems, 2004, No 2, pp. 59–64. (in Russian).
- Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Shagina N.B. [et al.] Characteristics of ^{90}Sr accumulation and elimination for residents of the Urals region in 1957–1988. Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology, 2005, Vol. 45, pp. 495–504 (in Russian).
- Suslova K.G. Features of metabolism and prediction of accumulation levels of ^{239}Pu , ^{241}Am and ^{90}Sr in the population at the Southern Urals living in the vicinity of the Mayak PA. In: Radioactive Sources and Radiation Effects on the Mayak Workers and Population Living in the Area of Nuclear Facility Influence. Part I, Ozyorsk, 2009, pp. 195–233. (in Russian).
- Kozheurov V.P., Zalyapin V.I., Shagina N.B. [et al.] Evaluation of uncertainties in the ^{90}Sr -body-burdens obtained by whole-body count: Application of Bayes' rule to derive detection limits by analysis of a posteriori data. Appl. Radiat. Isot., 2002, 57, pp. 525–535.
- Belle Yu.S., Kovtun A.N., Kozheurov V.P. [et al.] Human radiation spectrometer for measuring low content of incorporated strontium-90. Meditsinskaya Radiologiya = Medical Radiology, 1975, No 20, pp. 52–58. (in Russian).
- Bougrov N.G., Degteva M.O., Arshansky S.M. Modernized whole-body counter SICH-9.1M for in vivo measurements of ^{90}Sr and ^{137}Cs body burden. Meditsina Extremalnykh Situatsiy = Medicine of Extreme Situations, 2008, No 4, pp. 78–86. (in Russian).
- Khokhryakov V.F., Kudryavtseva V.I., Chernikov V.I. [et al.] A scintillation method for determination of actinide alpha-activity in samples. Radioanal. Nucl. Chem, 1998, 234, pp. 293–295.
- Balonov M.I., Bruk G.Ya., Golikov V.Yu. [et al.] Assessment of current exposure of the population living in the Techa River basin from radioactive releases of the Mayak facility. Health Phys, 2007, 92(2), pp. 134–147.
- Shagina N.B., Fell T.P., Tolstykh E.I. [et al.] Strontium biokinetic model for the pregnant woman and fetus: application to Techa River studies. J. Radiol. Prot., 2015, 35, pp. 659–676.
- Shagina N.B., Tolstykh E.I., Fell T.P. [et al.] Strontium biokinetic model for the lactating woman and transfer to breast milk: application to Techa River studies. J. Radiol. Prot., 2015, 35, pp. 677–694.
- Suslova K.G., Khokhryakov V.F. Peculiarities of distribution and rhythm of plutonium accumulation in the population of the monitoring zone. Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti

- = Radiation Safety Problems, 1996, No 1, pp. 35-44. (in Russian).
23. Suslova K.G., Khokhryakov V.F., Romanov S.A. Plutonium body burden in residents of Chelyabinsk region. *Atomnaya Energiya = Atomic Energy*, 1994, Vol. 77, No. 6, pp. 440-445. (in Russian).
24. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Phys.*, 2011, 101(1), pp. 28-47.
25. ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41, Suppl. 1.
26. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Phys.*, 2013, 104(5), pp. 481-498.

Received: May 18, 2018

For correspondence: Marina O. Degteva – Candidate of Technical Science, Head of Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia (Vorovsky str., 78a, Chelyabinsk, 454076, Russia. E-mail: marina@urcrm.ru)

Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Science, Lead Researcher, Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Klara G. Suslova – Candidate of Biological Science, Lead Researcher, Southern Urals Biophysics Institute, Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

Sergey A. Romanov – Candidate of Biological Science, Director of Southern Urals Biophysics Institute, Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

Alexandr V. Akleyev – Doctor of Medical Science, Professor, Director of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Degteva M.O., Tolstykh E.I., Suslova K.G., Romanov S.A., Akleyev A.V. Analysis of the results of long-lived radionuclide body burden monitoring in residents of the Urals region. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 30-39. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-30-39