

## Результаты прижизненных измерений содержания стронция-90 в организме жителей Уральского региона: анализ данных за 2006–2012 гг.

Е.И. Толстых<sup>1</sup>, Н.Г. Бугров<sup>1</sup>, В.А. Кривошапов<sup>1</sup>, Е.А. Шишкина<sup>1</sup>, Н.Б. Шагина<sup>1</sup>, М.О. Дегтева<sup>1</sup>, Л.Р. Анспо<sup>2</sup>, Б.А. Напье<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН УНПЦ РМ, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Университет Юты, Солт-Лейк сити, Юта, США

<sup>3</sup> Национальная лаборатория по исследованию Северо-Западной части Тихого океана, Ричланд, Вашингтон, США

*В результате аварий на Производственном Объединении «Маяк» в 1950-е гг. часть территории Уральского региона была загрязнена <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs. Работа посвящена анализу прижизненных измерений содержания <sup>90</sup>Sr в организме жителей региона. Измерения проводили на спектрометре излучений человека СИЧ-9.1М в 2006–2012 гг. С 2006 по 2012 г. на СИЧ-9.1М было проведено 5840 измерений у 4876 человек, максимальное измеренное значение – 24 кБк. Ранее аналогичные измерения проводили на СИЧ-9.1 (1974–1997 гг.). Сопоставление результатов, полученных на СИЧ-9.1 и СИЧ-9.1М, показало хорошую сходимость двух наборов данных.*

Ключевые слова: спектрометр излучений человека, фосвич-детектор, стронций-90, река Теча.

### Введение

Радиационные аварии, которые произошли на производственном объединении (ПО) «Маяк» в середине прошлого века, стали причиной загрязнения долгоживущими радионуклидами (<sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs) значительных площадей сельскохозяйственных угодий и источников водоснабжения в Уральском регионе [1]. Наиболее значимыми источниками загрязнения были сбросы радиоактивных отходов в реку Теча в 1949–1956 гг. и взрыв в хранилище высокоактивных отходов в 1957 г., в результате которого образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Ветровой перенос радиоактивного ила с берегов промышленного озера Карачай в период засухи 1967 г. привел к дополнительному загрязнению северной и северо-восточной части Челябинской области. В организм жителей загрязненных территорий радионуклиды цезия и стронция поступали с питьевой водой из реки Теча, а также с сельскохозяйственными продуктами, полученными на загрязненных территориях.

Стронций-90 является долгоживущим радионуклидом, который после попадания в организм человека избирательно накапливается в костной ткани. Для мониторинга содержания <sup>90</sup>Sr в организме жителей Уральского региона были использованы различные методы измерения. В 1951–1993 гг. проводились радиометрические и радиохимические анализы костных образцов, полученных посмертно [2]. В 1959–1997 гг. проводились массовые прижизненные измерения поверхностной бета-активности передних зубов [3, 4]. В 1974–1997 гг. содержание <sup>90</sup>Sr во всем теле оценивали с помощью уникального спектрометра излучений человека СИЧ-9.1. Сопоставление результатов прижизненных измерений СИЧ-9.1 и последующих посмертных измерений <sup>90</sup>Sr в костных образцах этих же лиц показало хорошую сходимость данных, полученных этими методами [2].

Спектрометр СИЧ-9.1 был разработан группой ученых под руководством профессора Ю.С. Белле [5]. В его кон-

струкции использовались 4 детектора типа фосвич, каждый из которых представлял собой комбинацию из двух сцинтилляционных кристаллов, оптически соединенных друг с другом и с общим фотоэлектронным умножителем. Детекторы были установлены в специальной защитной камере, внутри которой в геометрии сканирования измеряли гамма-излучение тела человека [6]. Градуировка спектрометра была выполнена по специальным фантомам, содержащим эталонные количества <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs и <sup>40</sup>K [7]. Оценка содержания <sup>90</sup>Sr в организме производилась по тормозному излучению самого радионуклида и дочернего <sup>90</sup>Y.

За 24 года эксплуатации СИЧ-9.1 под руководством В.П. Кожеурова [8] было выполнено свыше 38 000 измерений для более 20 000 человек (некоторые люди измерялись повторно). Результаты были использованы для различных целей: оценки уровней поступления <sup>90</sup>Sr в организм жителей загрязненных территорий и результирующих доз облучения [9, 10], изучения метаболизма стронция в организме человека [11, 12], разработки биокинетических моделей для людей различного пола и возраста [13].

Для возобновления программы мониторинга в 2005 г. была завершена модернизация спектрометра СИЧ-9.1. В новом приборе (СИЧ-9.1М) было решено использовать имеющуюся защитную камеру и ту же самую геометрию сканирования, а также сохранить тип детекторов [14]. Следует отметить, что СИЧ-9.1М является уникальным и существует в единственном экземпляре. Для калибровки прибора использовались специально разработанные фантомы [15, 16]. СИЧ-9.1М был сертифицирован Федеральным агентством по техническому контролю и метрологии и занесен в государственный регистр измерительной техники под номером № 31185-06 от 14 марта 2006 г. Методика выполнения измерений также прошла сертификацию [17]. В 2006 г. индивидуальные измерения содержания <sup>90</sup>Sr в организме человека были возобновлены.

Таким образом, перерыв в мониторинге содержания радионуклидов составил почти 9 лет. Поскольку в этот период не наблюдалось дополнительного поступления техногенных радионуклидов в окружающую среду, произошло значительное снижение содержания радионуклидов в организме жителей Уральского региона в силу различных причин: физических (радиоактивный распад радионуклидов), биогеохимических (снижение биологической доступности), биологических (выведение из организма человека).

**Цель исследования** – анализ результатов измерений содержания  $^{90}\text{Sr}$ , полученных в 2006–2012 гг. с использованием СИЧ-9.1М, а также сопоставление результатов измерений с данными, полученными ранее с использованием СИЧ-9.1.

### Материалы и методы

#### Спектрометр СИЧ-9.1М

Особенности конструкции и эксплуатации СИЧ-9.1М были описаны в литературе и соответствующих метрологических документах [14, 17]. Рисунок 1 иллюстрирует принципиальные особенности прибора.

Защитная камера выполнена из чугунных колец с толщиной стенки 200 мм. Внутренняя поверхность камеры покрыта слоем свинца (5 мм), кадмия (1 мм) и меди (2 мм). Четыре фосвич-детектора производства фирмы Saint-Gobain Cristaux&Detecteurs (Франция) расположены на центральной вертикальной панели и фиксированы. Принцип работы фосвич-детекторов описан ранее [5]. Во время измерения пациент лежит на ложе (тележке) и перемещается через область детекторов (длина сканирования – 2 м, время измерения – 20 мин). В фосвич-детекторе «тонкий» кристалл NaI (Тl) толщиной 3 мм присоединен к «толстому» кристаллу CsI(Tl) толщиной 80 мм. Гамма-излучение низких энергий (<200 кэВ) поглощается в тонком кристалле NaI (Тl), в то время как фотоны высоких энергий проникают в кристалл CsI(Tl). Импульсы сцинтилляций для каждого из двух кристаллов имеют разные длительности нарастания, примерно 0,25 мкс для NaI(Тl) и 1,0 мкс для CsI(Tl). Для разделения сигналов по форме используется модульная электронная система производства фирмы EG&G ORTEC (США).

Регистрация спектров на СИЧ-9.1М осуществляется с помощью программы многоканального анализа

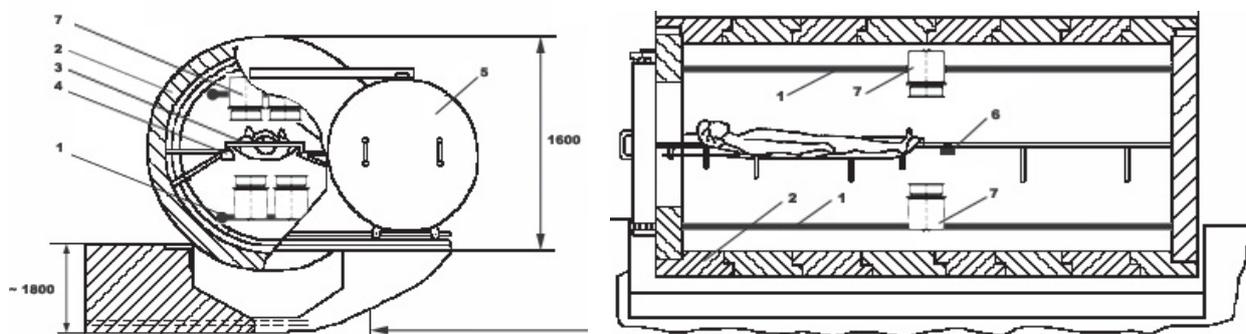
(MAESTRO-32), а обработка полученной спектрометрической информации – с помощью компьютерных программ (SICHDB-1 и ASW\_SICH), которые обеспечивают протоколирование результатов измерения активности радионуклидов и ведение базы данных результатов измерений.

При каждом измерении человека для каждого  $i$ -радионуклида ( $^{90}\text{Sr}$ ;  $^{137}\text{Cs}$ ;  $^{40}\text{K}$ ) производится статистическая оценка предельного значения порога обнаружения ( $A_{\text{poi}}$ ); а также минимально измеряемой активности ( $A_{\text{ми}}$ ) [17]. Статистическая оценка  $A_{\text{poi}}$  рассчитывается по измеренному спектру как минимальная обнаруживаемая активность с вероятностью правильного обнаружения 0,9 и вероятностью ложных тревог 0,1. Статистическая оценка  $A_{\text{ми}}$  рассчитывается как активность, которая по измеренному спектру может быть определена с относительной статистической погрешностью не более 50% ( $P=0,95$ ). Для периода измерений 2006–2012 гг. среднее значение  $A_{\text{poi}}$  для  $^{90}\text{Sr}$  составило 345 Бк; среднее значение  $A_{\text{ми}}$  – 1035 Бк. В среднем, относительная погрешность при измерении в интервале от 10 до 24 кБк  $^{90}\text{Sr}$  в организме составила 24%; 5–10 кБк – 30%; <5кБк – 40%.

#### Характеристика лиц, обследованных на СИЧ-9.1М

В настоящее исследование включены результаты измерений, выполненных в период с 15 июня 2006 г. по 20 сентября 2012 г. на СИЧ-9.1М: 5840 измерений у 4876 человек. Распределение по местам контакта с источниками облучения, а также по полу и возрасту измеренных лиц представлено в таблицах 1 и 2.

Как видно, около 80% измеренных людей проживали в то или иное время на радиоактивно загрязненных территориях: населенные пункты (НП) на реке Теча и на территории ВУРСа. Остальные люди принадлежали к следующим группам: люди, не проживавшие на загрязненных территориях (для измерений фоновых значений); лица, работавшие/служившие на Семипалатинском полигоне; ликвидаторы Чернобыльской аварии; сотрудники Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ). Следует отметить, что 27 из 41 населенного пункта на реке Теча были эвакуированы в период 1955–1961 гг., еще один пункт Муслумово был эвакуирован в 2011 г. Ряд НП был также эвакуирован с территории ВУРСа. Таким образом, на момент измерений 646 человек проживали в НП на реке Теча, 384 – на территории ВУРСа.



**Рис. 1.** Схема сечений СИЧ-9.1М: 1 – система фиксации и перемещения детекторов, 2 – защита, 200 мм чугуна и покрытие (свинец – 5 мм, кадмий – 1 мм, медь – 2 мм), 3 – тележка, 4 – кронштейны для фиксации рельсов, 5 – дверь, 6 – двигатель, 7 – фосвич-детекторы (все размеры даны в мм)

Таблица 1  
**Распределение по местам контакта с источниками облучения лиц, измеренных на СИЧ-9.1М в период 2006–2012 гг.**

| Характеристика места контакта   | Число человек | Процент от измеренных |
|---|---------------|-----------------------|
| Все измеренные  | 4876          | 100                   |
| Населенные пункты на реке Теча, любой период времени с 1950 г.        | 2773          | 45                    |
| Населенные пункты на территории ВУРСа, любой период времени с 1957 г. | 966           | 20                    |
| Проживание в разное время как на реке Теча, так и на территории ВУРСа | 647           | 13                    |
| Не контактировали или имели другие места контакта                     | 1090          | 22                    |

Таблица 2  
**Распределения по полу и возрасту у лиц, измеренных на СИЧ-9.1М в период 2006–2012 гг.**

| Возраст на момент измерений, лет | Число человек |         |
|----------------------------------|---------------|---------|
|                                  | Мужчины       | Женщины |
| ≤10                              | 4             | 1       |
| 11–20                            | 58            | 47      |
| 21–30                            | 121           | 147     |
| 31–40                            | 145           | 248     |
| 41–50                            | 327           | 691     |
| 51–60                            | 639           | 1140    |
| 61–70                            | 469           | 917     |
| 71–80                            | 291           | 540     |
| 81–90                            | 13            | 42      |
| >90                              | 0             | 1       |
| Всего                            | 2067          | 3774    |

Как видно из таблицы 2, больше всего измеренных людей было в возрасте от 50 до 60 лет, женщин было измерено примерно в полтора раза больше, чем мужчин. Это связано с тем, что основной упор в исследованиях был сделан на обследование лиц, проживавших на радиоактивно загрязненных территориях в период наибольшего загрязнения. Соотношение по полу отражает общую тенденцию обращений в клиническое отделение УНПЦ РМ, а также различия в продолжительности жизни мужчин и женщин, которое приводит к большему проценту женщин в группах пожилых людей. Года рождения среди измеренных лиц находились в пределах 1917–2001 гг.

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных программ STATISTICA 5.5, Sigma Plot 10.0.

### Результаты и обсуждение

Среди измеренных лиц у 13% (773 человека) количество  $^{90}\text{Sr}$  в организме было выше  $A_{\text{мин}}$ . Значительная часть этих людей проживала в НП на реке Теча в период максимальных сбросов радиоактивных отходов. Таблица 3 характеризует результаты измерений жителей Уральского региона. Как видно, у половины лиц, проживавших в НП на реке Теча в начале 1950-х гг., содержание  $^{90}\text{Sr}$  в орга-

низме может быть надежно измерено с использованием СИЧ-9.1М. Для остальных категорий жителей большая часть измерений (более 95%) была ниже минимально детектируемой активности. Таким образом, и в настоящее время наибольший интерес представляют люди, проживавшие и/или живущие в НП на реке Теча.

Таблица 3  
**Содержание  $^{90}\text{Sr}$  (А) в организме жителей Уральского региона по результатам измерений 2006–2012 гг.**

| Статистическая характеристика, процентиль | Содержание $^{90}\text{Sr}$ (кБк) в организме |   |
|---|---|---|
|   | Все измеренные                                | Постоянно проживали на реке Теча с 1950 по 1953 г. или дольше |
| 25  | <0,3 <sup>а</sup>                             | <0,3 <sup>а</sup>   |
| 50  | <0,3 <sup>а</sup>                             | 0,3<А<1,0 <sup>б</sup>  |
| 75  | <0,3 <sup>а</sup>                             | 2,75  |
| 95  | 3,5   | 8,7   |
| Максимум                                  | 24  | 24  |
| Число измерений                           | 5840  | 843   |

<sup>а</sup> –  $<A_{\text{пои}}^{\text{р}}$ ; среднее значение  $A_{\text{пои}}^{\text{р}}=0,3$  кБк

<sup>б</sup> –  $A_{\text{пои}}^{\text{р}} < A < A_{\text{мин}}$ ; среднее значение  $A_{\text{мин}}=1,0$  кБк;  $A_{\text{пои}}^{\text{р}}=0,3$  кБк

Как было показано ранее [10, 11], уровень накопления  $^{90}\text{Sr}$  у жителей прибрежных сел реки Теча зависел от ряда параметров:

- 1) расстояние по реке от места сбросов радиоактивных отходов;
- 2) наличие в населенных пунктах альтернативных (колдцы) источников водоснабжения;
- 3) возраст на момент поступления радионуклида.

Влияние всех вышеперечисленных факторов можно проследить даже через 60 лет после основного поступления  $^{90}\text{Sr}$ , хотя к моменту начала работы СИЧ-9.1М большинство жителей уже не проживали в НП на реке Теча.

В таблице 4 представлены характеристики содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме у различных групп жителей, проживавших в НП на реке Теча в начале 1950-х гг. Как видно, наблюдается закономерное снижение количества  $^{90}\text{Sr}$  в организме в зависимости от расстояния от места сбросов.

Таблица 4  
**Статистические характеристики содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме лиц, проживавших в НП на реке Теча в период с 1950 по 1953 г. или более (измерения 2006–2012 гг.)**

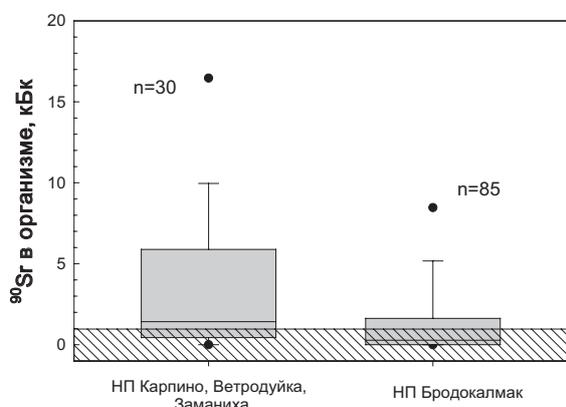
| Статистическая характеристика, процентиль | Содержание $^{90}\text{Sr}$ (кБк) в организме лиц, проживавших в НП на расстоянии от места сбросов |            |            |
|---|--|------------|------------|
|   | 7–78 км  | 80–150 км  | 155–237 км |
| 50  | 1,2  | 0,3<А<1,0* | 0,3<А<1,0* |
| 75  | 3,9  | 2,3        | 1,6        |
| 95  | 11,4   | 8,7        | 5,5        |
| Число измерений                           | 377  | 331        | 135        |

\* –  $A_{\text{пои}}^{\text{р}} < A < A_{\text{мин}}$ ; среднее значение  $A_{\text{мин}}=1,0$  кБк;  $A_{\text{пои}}^{\text{р}}=0,3$  кБк.

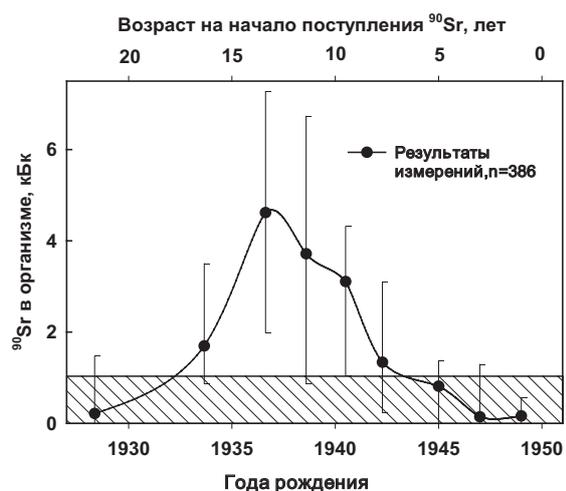
Влияние наличия дополнительных (незагрязненных) источников водоснабжения иллюстрирует рисунок 2. Для сравнения были выбраны соседние НП, расположенные в среднем течении реки: Карпино, Ветроудка, Заманиха,

Бродокалмак. Расстояния от места сбросов радиоактивных отходов составили 96, 100, 105 и 109 км соответственно. Данные для жителей первых 3 небольших НП, практически не имевших, кроме реки Теча, дополнительных источников водоснабжения, были объединены. Они сравниваются с результатами для НП Бродокалмак, где большинство жителей использовали колодезную воду. Как видно на рисунке 2, соседние НП могут различаться в несколько раз по содержанию  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей в зависимости от источников водоснабжения.

Возрастные особенности накопления  $^{90}\text{Sr}$  обусловлены неодинаковой скоростью роста скелета (основного депо накопления стронция в организме) в разные возрастные периоды. На рисунке 3 показаны возрастные особенности содержания  $^{90}\text{Sr}$  у лиц, проживавших в верхнем течении реки (7–80 км от места сбросов). Как и ожидалось, максимальные значения были получены для лиц, которые были подростками 12–15 лет в период массивного поступления  $^{90}\text{Sr}$ .



**Рис. 2.** Сопоставление распределений содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме лиц, проживавших в начале 1950-х гг. в НП на реке Теча с различными источниками водоснабжения. Прямоугольники ограничивают 25% и 75% данных, линия внутри прямоугольника – медиана, усы соответствуют 10% и 90%; точки соответствуют 5% и 95%. Заштрихована область ниже  $A_{\text{мин}}$



**Рис. 3.** Содержание  $^{90}\text{Sr}$  у лиц, проживавших в верхнем течении реки в период 1950–1953 гг. или до нее. Точки показывают медианные значения, вертикальные линии ограничивают квартильные интервалы. Возраст на начало поступления  $^{90}\text{Sr}$  – это возраст в 1950 г. Заштрихована область ниже  $A_{\text{мин}}$

Характерным также является пример с максимальной измеренной величиной содержания  $^{90}\text{Sr}$  – 24 кБк (см. табл. 3). Это значение было получено при измерении бывшего жителя НП Герасимовка: мужчина; индивидуальный системный номер, присвоенный в УНПЦ РМ, 51725. НП Герасимовка расположен на расстоянии 43 км от места сбросов радиоактивных отходов в реку Теча (верхнее течение), основным источником водоснабжения в период 1950–1953 гг. там была речная вода. В период максимальных сбросов (1950–1951 гг.) ему было 16 лет (1934 г.р.), то есть имела место повышенная скорость роста скелета (подростковый ростовой скачок), сопряженная с усиленным накоплением костных минералов, таких как Ca и Sr. Таким образом, максимально измеренная величина является закономерным следствием неблагоприятного сочетания всех факторов, увеличивающих уровень накопления  $^{90}\text{Sr}$  в организме.

Работа по измерению содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей Уральского региона является продолжением длительного мониторинга загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  окружающей среды и человека. В этой связи необходимым является сопоставление (состыковка) наборов данных, полученных в разное время с использованием двух систем СИЧ. Наибольший интерес для сопоставления представляют результаты измерения одних и тех же людей. Уровни поступления  $^{90}\text{Sr}$  в начале 1950-х гг. на реке Теча были столь высоки, что это привело к накоплению  $^{90}\text{Sr}$  в скелете в количествах, в тысячу раз превышавших глобальные уровни [2]. В результате даже в настоящее время, как это было показано в таблицах 3 и 4, у значительного числа людей, проживавших на реке Теча, содержание  $^{90}\text{Sr}$  может быть надежно измерено. Это определяет возможность сопоставления результатов измерений СИЧ-9.1 и СИЧ-9.1М по  $^{90}\text{Sr}$  как на групповом, так и на индивидуальном уровне.

Как говорилось выше, в 1974–1997 гг. измерения радионуклидов проводили с использованием СИЧ-9.1. В 2002 г. с использованием Байесовского подхода был проведен постериорный анализ неопределенностей результатов измерений  $^{90}\text{Sr}$  на СИЧ-9.1 [18]. Были определены показатели, характеризующие порог обнаружения активности (817 Бк) и минимально детектируемую активность (2040 Бк). Эти значения примерно в два раза превосходят аналогичные величины для нового СИЧ-9.1М, описанные выше. Далее представлены результаты сопоставления результатов измерений СИЧ-9.1 и СИЧ-9.1М по  $^{90}\text{Sr}$ .

#### Анализ индивидуальных скоростей выведения $^{90}\text{Sr}$ из организма

Спустя 25–60 лет после основного поступления  $^{90}\text{Sr}$  снижение его содержания в организме человека обусловлено радиоактивным распадом, а также биологическими процессами перестройки костной ткани с последующим выведением  $^{90}\text{Sr}$  с мочой и в меньшей степени через желудочно-кишечный тракт. Повторные индивидуальные измерения  $^{90}\text{Sr}$  на СИЧ позволяют оценивать индивидуальные скорости выведения  $^{90}\text{Sr}$  из организма. Работа по определению индивидуальных скоростей выведения  $^{90}\text{Sr}$  по данным СИЧ-9.1 была выполнена ранее [8, 19]. Дополнительные результаты измерений СИЧ-9.1М дают возможность рассчитывать скорости выведения  $^{90}\text{Sr}$  на более длительном временном отрезке. Сопоставление старых оценок индивидуальных скоростей выведения (на основе данных СИЧ-9.1) и новых оценок (с использовани-

ем результатов СИЧ-9.1М) позволяет оценить непротиворечивость этих двух наборов результатов измерений.

Выведение  $^{90}\text{Sr}$  из организма человека в отдаленный период после поступления описывается экспоненциальной функцией [8, 19]:

$$B(\tau - \tau_0) = B_0 \cdot \exp[-\lambda \cdot (\tau - \tau_0)],$$

где  $B(\tau - \tau_0)$  – индивидуальное измерение  $^{90}\text{Sr}$  в организме человека возраста  $\tau$  лет на момент измерения;

$B_0$  – индивидуальное измерение  $^{90}\text{Sr}$  в организме человека возраста  $\tau_0$  лет на начальный момент измерений;

$\lambda$  – индивидуальная скорость выведения  $^{90}\text{Sr}$  из организма человека, которая представляет собой сумму скорости радиоактивного распада ( $\lambda_d = 0,0238 \text{ год}^{-1}$ ) и скорости биологического выведения,  $\lambda_b$ , обусловленной метаболическими процессами в костной ткани.

Величина индивидуальной скорости выведения оценивается с использованием метода наименьших квадратов, примененного к линеаризованной (логарифмической) форме уравнения. Таким образом, под биологической скоростью выведения ( $\lambda_b$ ) понимается скорость снижения содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме за вычетом скорости радиоактивного распада  $^{90}\text{Sr}$ .

Для анализа биологических скоростей выведения были выбраны лица, проживавшие на реке Теча в начале 1950-х гг., удовлетворяющие следующими условиями:

1) высокое содержание  $^{90}\text{Sr}$  в организме; в 2006–2012 гг. содержание должно быть  $\geq 5$  кБк;

2) на СИЧ-9.1 (период 1974–1997 гг.) должно быть проведено 3 и более измерений, на основании которых можно достоверно оценить скорость биологического выведения  $^{90}\text{Sr}$  из организма ( $\lambda_b$ ).

Таким условиям удовлетворяли данные для 74 человек. Для этих лиц было выполнено 2 типа расчетов:

1) оценка биологических скоростей выведения стронция из организма на основе данных старого СИЧ-9.1;

2) оценка биологических скоростей выведения на основе объединенных данных старого и нового СИЧ.

В таблице 5 приведены статистические характеристики двух наборов  $\lambda_b$ .

Как следует из анализа таблицы 5, использование новых данных, полученных в 2006–2012 гг., не привело к существенному изменению оценок скорости выведения стронция. Однако очевидна тенденция к увеличению скорости выведения при совместном анализе данных нового и старого СИЧ. Поскольку значения скоростей для каждого индивида следует считать зависимыми параметрами, для сравнения был применен тест попарного сравнения Вилкоксона, который анализирует только различия между парами измерений каждого субъекта. При таком попарном сравнении различия между выборками трактуются как достоверные ( $p=0,0003$ ). Подобные различия в сторону увеличения скорости легко объяснимы и ожидаемы. Как было показано ранее [11, 19], скорость выведения стронция увеличивается с возрастом, что связано с интенсивной возрастной потерей костной массы, как у мужчин (после 60 лет), так и у женщин (после 50 лет). Рисунок 4 иллюстрирует данные индивидуальных измерений СИЧ. Как видно, все полученные результаты хорошо описываются одной экспонентой, характеризующей скорость выведения стронция.

Таблица 5

**Статистические характеристики биологических скоростей ( $\lambda_b$ ) выведения стронция из организма**

| Статистическая характеристика, процентиль | Биологическая скорость выведения $^{90}\text{Sr}$ ( $\lambda_b$ г $^{-1}$ ) |  |
|---|---|--|
|   | Данные СИЧ-9.1 (1974–1997 гг.)  | Объединенные данные СИЧ-9.1 и СИЧ-9.1М (1974–2012 гг.) |
| 25  | 0,024   | 0,026  |
| 50  | 0,028   | 0,033  |
| 75  | 0,039   | 0,042  |
| 95  | 0,049   | 0,051  |
| Максимум                                  | 0,097   | 0,091  |
| Число измерений СИЧ                       | 851   | 925  |

*Сопоставление расчетных значений содержания  $^{90}\text{Sr}$  на основе данных СИЧ-9.1 и результатов измерений на СИЧ-9.1М*

Помимо сравнения результатов индивидуальных измерений у лиц с высоким содержанием  $^{90}\text{Sr}$ , было выполнено сопоставление ожидаемых (расчетных) значений содержания  $^{90}\text{Sr}$  на основе данных СИЧ-9.1 и результатов реальных измерений на новом СИЧ-9.1М. Для этой цели были использованы данные измерений 1637 человек, которые ранее измерялись на старом СИЧ-9.1, а затем на СИЧ-9.1М. Для расчетов были использованы результаты последнего по времени измерения на старом СИЧ-9.1 и первого измерения на новом СИЧ-9.1М. Для экстраполяции старых измерений на дату измерения на новом СИЧ-9.1М использовали среднее значение биологической скорости выведения  $^{90}\text{Sr}$  ( $\lambda_b = 0,03 \text{ год}^{-1}$ ). Результаты представлены на рисунке 5, где видна хорошая сходимость данных старого и нового СИЧ. Разброс значений относительно линии регрессии объясняется значительной индивидуальной вариабельностью возрастных измерений скоростей выведения  $^{90}\text{Sr}$  (см. табл. 5).

**Выводы**

1. В период с 2006 по 2012 г. в рамках проведения мониторинга на СИЧ-9.1М было проведено 5840 измерений содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме 4876 человек. Около 80% этих людей в то или иное время проживали в НП на реке Теча и/или на территории ВУРСа.

2. Согласно измерениям СИЧ-9.1М, группой с наибольшим уровнем загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  остаются люди, проживавшие в 1950-х гг. в населенных пунктах на реке Теча.

3. Сравнение наборов данных, полученных на старом и новом СИЧ, показало хорошую сходимость результатов измерений по  $^{90}\text{Sr}$ . Таким образом, результаты, полученные в 1974–1997 гг. и 2006–2012 гг., могут анализироваться совместно, что увеличивает статистику измерений и дает возможность получать более надежные оценки доз внутреннего облучения населения. Объединенный набор данных по измерениям  $^{90}\text{Sr}$  во всем теле является базисом для дальнейших исследований метаболизма  $^{90}\text{Sr}$  на более длительном временном и возрастном интервале.

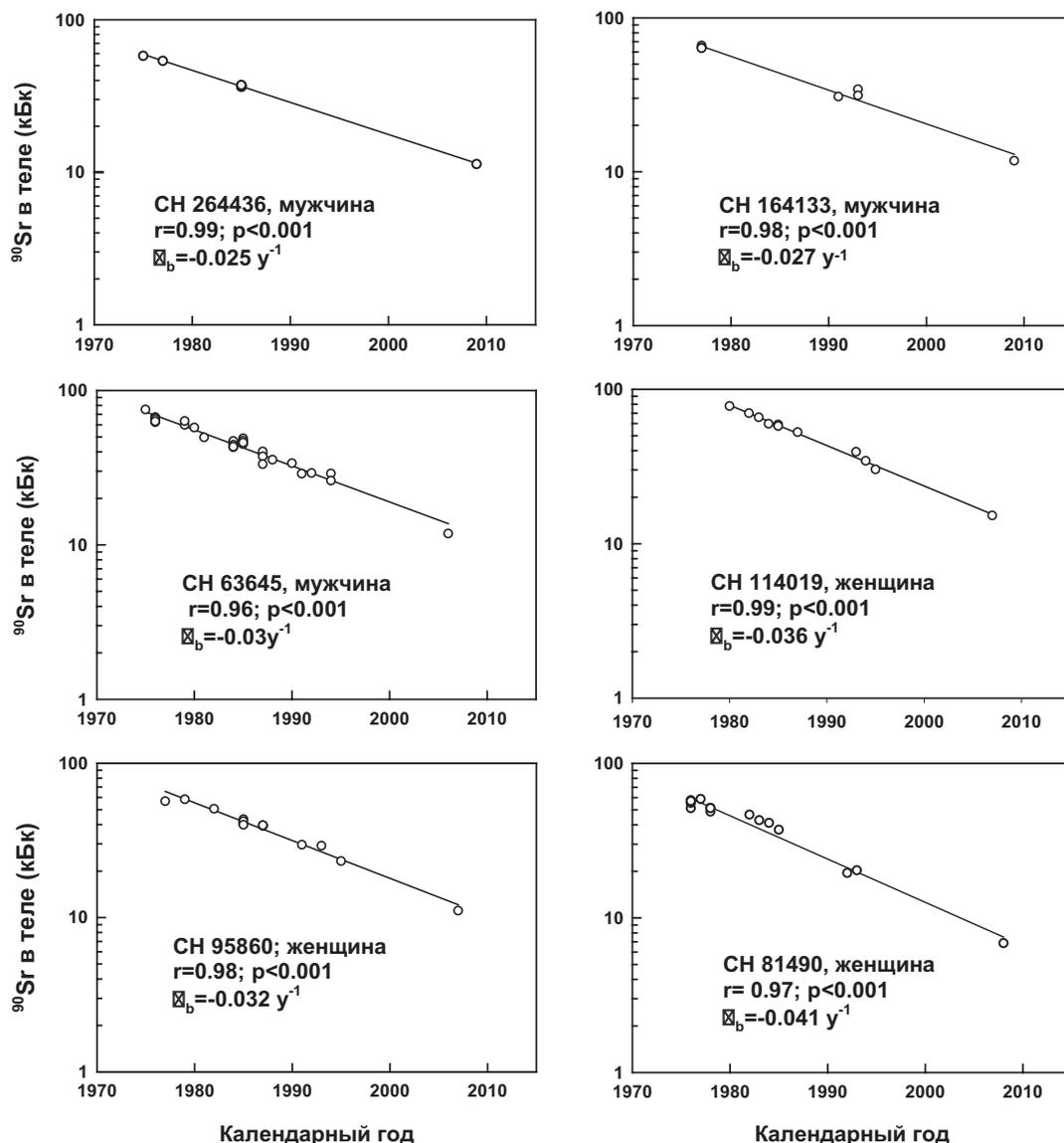


Рис. 4. Сопоставление содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей прибрежных сел реки Теча, измеренного на старом (1974–1997 гг.) и новом (2006–2012 гг.) СИЧ-9.1. СН – индивидуальный системный номер пациента согласно базе данных УНПЦ РМ

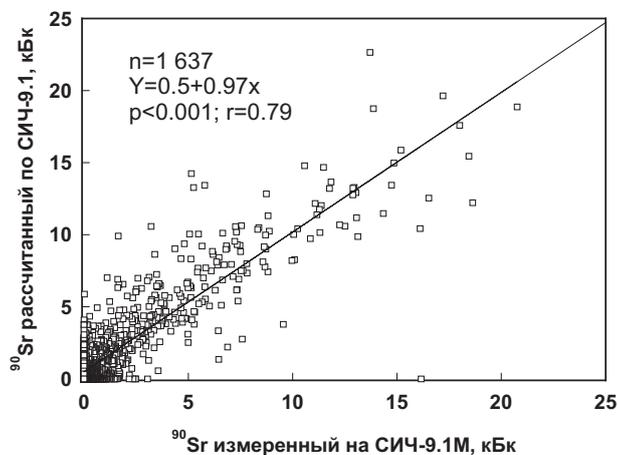


Рис. 5. Сопоставление значений содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме, измеренных на СИЧ-9.1М (ось абсцисс) и рассчитанных на основе результатов измерений СИЧ-9.1 (ось ординат)

**Благодарности**

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Департамента энергетики США, Агентства по охране окружающей среды США, Федерального медико-биологического агентства России. Авторы выражают сердечную благодарность Д. Лауреру и Д. Хикману за помощь в тестировании детекторов; В. Фарафонову за помощь в отладке электронного оборудования; А. Шереметьеву и Р. Абдуллину за помощь в модернизации системы сканирования пациентов; С.А. Аршанскому и Р.М. Габитову за вклад в метрологическую аттестацию и разработку методики выполнения измерений; Микушевой Р.К., проводившей измерения пациентов.

**Литература**

1. Шойгу, С.К. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона / С.К. Шойгу. – М.: Комтехпринт, 2002. – 287 с.
2. Degteva, M.O. Retrospective dosimetry related to chronic environmental exposure / M.O. Degteva, V.P. Kozheurov, E.I. Tolstykh // Radiat Prot Dosim. – 1998. – V. 79. – P. 155–160.
3. Иванов, В.А. Опыт прижизненного определения экспрессным методом содержания стронция-90 в организме человека / В.А. Иванов, Б.П. Хрусталева, Е.И. Ярцев // Бюллетень радиационной медицины. – 1962. – № 4а. – С. 149–152.
4. Tolstykh, E.I. Age-dependencies of <sup>90</sup>Sr incorporation in dental tissues: comparative analysis and interpretation of different kinds of measurements obtained for residents on the Techa River / E.I. Tolstykh [et al.] // Health Physics. – 2003. – V. 85, № 4. – P. 409–419.
5. 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.
6. Зайцев, Б.С. Скенирующее устройство спектрометра излучений человека СИЧ-9.1 / Б.С. Зайцев, В.П. Кожеуров // Моделирование поведения и токсического действия радионуклидов : сб. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. – С. 79–82.
7. Кожеуров, В.П. Градуировка спектрометра излучений человека СИЧ-9.1 по стронцию-90 / В.П. Кожеуров [и др.] // Моделирование поведения и токсического действия радионуклидов : сб. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. – С. 83–86.
8. 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. / V.P. Kozheurov // Sci Total Environ. – 1994. – V. 14 (1–2). – P. 37–48.

9. Tolstykh, E.I. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa Riverside residents: Strontium-90 / E.I. Tolstykh [et al.] // Health Phys. – 2011. – V. 101. – P. 28–47.
10. Degteva, M.O. The Techa River Dosimetry System: Methods for the reconstruction of internal dose / M.O. Degteva [et al.] // Health Phys. – 2000. – V. 79. – P. 24–35.
11. Tolstykh, E.I. Analysis of Strontium Metabolism in Humans on the Basis of the Techa River Data / E.I. Tolstykh [et al.] // Radiat Environ Biophysics. – 1997. – V. 36. – P. 25–29.
12. Shagina, N.B. Cortical bone resorption rate in elderly persons: Estimates from long-term in vivo measurements of (<sup>90</sup>) Sr in the skeleton / N.B. Shagina [et al.] // Arch Gerontol Geriatr. – 2012. – V. 54 (3). – P. 411–418.
13. Shagina, N.B. Improvements in the biokinetic model for strontium with allowance for age and gender differences in bone mineral metabolism / N.B. Shagina, E.I. Tolstykh, M.O. Degteva // Radiat Prot Dosim. – 2003. – V. 105 (1–4). – P. 619–622.
14. Бугров, Н.Г. Модернизированный спектрометр излучений человека СИЧ-9.1М для измерения содержания <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в организме / Н.Г. Бугров, М.О. Дегтева, С.М. Аршанский // Медицина экстремальных ситуаций. – 2008. – № 4 (26). – С. 78–86.
15. Kovtun, A.N. Anthropomorphic phantom with strontium-90 incorporated in the skeleton / A.N. Kovtun [et al.] // Radiat. Prot. Dosim. – 2000. – V. 89 (3–4). – P. 301–304.
16. Kovtun, A.N. Metrological parameters of the unified calibration of a whole-body phantom with gamma-emitting radionuclides / A.N. Kovtun [et al.] // Radiat. Prot. Dosim. – 2000. – V. 89 (3–4). – P. 239–242.
17. Методика выполнения измерений активности инкорпорированных радионуклидов стронция-90, цезия-137 и калия-40 в теле человека спектрометром СЕГ – «СИЧ-9.1.М»: (МВИ № 696-06-2006). – Челябинск, СПб.: ФГУН УНПЦ РМ-ГНЦ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 2006. – 16 с.
18. Kozheurov, V.P. Evaluation of uncertainties in the <sup>90</sup>Sr-body-burdens obtained by whole-body count: Application of Bayes' rule to derive detection limits by analysis of a posteriori data / V. P. Kozheurov [et al.] // Appl. Radiat. Isot. – 2002. – V. 57. – P. 525–535.
19. Shagina, N.B. Evaluation of age and gender dependences of the rate of strontium elimination 25–45 years after intake: Analysis of data from residents living along the Techa River / N.B. Shagina [et al.] // Radiat. Res. – 2003. – V. 159. – P. 239–246.

**E.I. Tolstykh<sup>1</sup>, N.G. Bugrov<sup>1</sup>, V.A. Krivoschapov<sup>1</sup>, E.A. Shishkina<sup>1</sup>, N.B. Shagina<sup>1</sup>, M.O. Degteva<sup>1</sup>, L.R. Anspaugh<sup>2</sup>, B.A. Napier<sup>3</sup>**

**Results of in vivo measurements of strontium-90 body-burden in Urals residents: analyses of data obtained in 2006–2012**

<sup>1</sup>Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk

<sup>2</sup>University of Utah Salt Lake City, Utah, USA

<sup>3</sup>Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington, USA

*Abstract. A part of the Urals territory was contaminated with <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in the 1950s as a result of accidents at the “Mayak” Production Association. The paper describes the analysis of in vivo <sup>90</sup>Sr measurements in Urals residents. The measurements were performed with the use of Whole-Body Counter SICH-9.1M in 2006–2012. Totally 5840 measurements for 4876 persons were performed from 2006 to 2012; maximal measured value was 24 kBq. Earlier, similar measurements were performed with SICH-9.1 (1974–1997). Comparison of the results obtained with SICH-9.1 and SICH-9.1M has shown a good agreement of the two data sets.*

*Key words: Whole-Body Counter, phoswich detector, strontium-90, Techa River.*

Поступила: 13.02.2013 г.

Е.И. Толстых  
E-mail: evgenia@urcrm.ru