## DOI: 10.12737/article\_5cf2364cb49523.98590475

# М.О. Дегтева<sup>1</sup>, Б.А. Напье<sup>2</sup>, Е.И. Толстых<sup>1</sup>, Е.А. Шишкина<sup>1,3</sup>, Н.Г. Бугров<sup>1</sup>, Л.Ю. Крестинина<sup>1</sup>, А.В. Аклеев<sup>1,3</sup>

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОЗ В КОГОРТЕ ЛЮДЕЙ, ОБЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ ТЕЧИ

1. Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Челябинск, Россия. E-mail: marina@urcrm.ru;

2. Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория им. Бетелла, Ричланд, США;

3. Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

М.О. Дегтева – зав. лаб., к.т.н.; Б.А. Напье – в.н.с., член НКДАР ООН; Е.И. Толстых – в.н.с., д.б.н.;

Е.А. Шишкина – с.н.с., ст. препод., к.б.н.; Н.Г. Бугров – с.н.с., к.т.н.; Л.Ю. Крестинина – зав. лаб., к.м.н.;

А.В. Аклеев – директор, зав. кафедрой, д.м.н., проф., член НКДАР ООН

#### Реферат

<u>Цель</u>: Дескриптивный анализ распределений индивидуальных доз в органах и тканях людей, подвергшихся облучению на реке Тече, загрязненной в 1949–1956 гг. в результате сбросов жидких радиоактивных отходов производственным объединением (ПО) «Маяк».

<u>Материал и методы</u>: Для расчета доз внешнего и внутреннего облучения использовалась дозиметрическая система TRDS-2016D, в базы данных которой включена информация о динамике поступления радионуклидов и мощностях доз в воздухе для населенных пунктов (НП), расположенных на загрязненных территориях реки Течи и Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС). Комбинируя средние по НП данные для каждого календарного периода с историей проживания и возрастом конкретного человека, система продуцирует индивидуальный сценарий внешнего облучения и индивидуальные поступления радионуклидов, а затем рассчитывает соответствующие им дозы внешнего и внутреннего облучения. Имеющиеся измерения содержания <sup>90</sup>Sr в организме, а также имеющаяся информация по расположению индивидуальных хозяйств относительно загрязненной реки Течи используются для уточнения оценок индивидуальных доз.

<u>Результаты</u>: Индивидуальные дозы были рассчитаны для 29647 человек, включенных в Когорту Реки Течи (КРТ). Согласно данным из историй проживания, 5280 членов КРТ получили дополнительные дозы облучения на территории ВУРСа. Средняя по когорте доза для большинства внескелетных тканей не превышала 100 мГр, при этом для красного костного мозга (ККМ) она равнялась 350 мГр. Помимо облучения на Тече и ВУРСе, для членов КРТ были рассчитаны индивидуальные дозы от поступления <sup>131</sup>I из атмосферных выбросов ПО «Маяк». Средняя по когорте доза на щитовидную железу (ЩЖ) составила 210 мГр. Максимальные дозы (около 1 Гр на большинство внескелетных тканей и свыше 7 Гр на ЩЖ и ККМ) получены для людей, которые в период сбросов находились в детском и юношеском возрасте и проживали в верховьях реки Течи на близком расстоянии от ПО «Маяк».

<u>Выводы</u>: Члены КРТ были облучены в широком диапазоне доз при низкой мощности радиационного воздействия. Оценки поглощенных доз будут использоваться для анализа дозовых зависимостей заболеваемости со́лидными опухолями и лейкозами, что позволит уточнить коэффициенты риска отдаленных эффектов в условиях хронического облучения и в дальнейшем может использоваться для целей радиационной защиты.

**Ключевые слова:** реконструкция доз, производственное объединение «Маяк», река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, стронций-90, цезий-137, йод-131

Поступила: 21.11.2018. Принята к публикации: 19.04.2019

#### Введение

Река Теча была загрязнена в 1949-1956 гг. в результате сбросов жидких радиоактивных отходов радиохимическим заводом, который являлся частью производственного объединения (ПО) «Маяк» [1, 2]. На фоне регулярных технологических сбросов, значительное количество продуктов деления урана поступило в реку летом-осенью 1951 г. в результате аварийных протечек из хранилища высокоактивных отходов. В конце октября 1951 г. сброс основных технологических отходов был переключен на оз. Карачай, и сбросы в реку Течу существенно сократились. Однако вода, донные отложения и пойменные почвы реки уже были загрязнены радионуклидами, в том числе долгоживущими <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs [1, 2]. Жители сельских населенных пунктов (НП), расположенных ниже по течению от места сбросов, использовали реку для питьевого водоснабжения и хозяйственно-бытовых нужд и подверглись пролонгированному внешнему и внутреннему облучению.

Для долговременного медицинского наблюдения за облучившимся населением в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ ФМБА России) была сформирована Когорта Реки Течи, КРТ (Techa River Cohort, TRC). Члены КРТ были облучены в широком диапазоне доз при низкой мощности радиационного воздействия. В когорте было отмечено связанное с дозой увеличение заболеваемости и смертности от со́лидных опухолей и лейкозов [3–6]. Эпидемиологические исследования в КРТ признаны международным сообществом как важный источник информации о влиянии дозы и мощности дозы радиационного воздействия на здоровье человека [7, 8].

Индивидуальные дозы для членов КРТ рассчитывались с использованием комплекса компьютерных программ под общим названием «Дозиметрическая система реки Течи» (Techa River Dosimetry System, TRDS) [9, 10]. Наиболее значимыми путями облучения для членов КРТ были внешнее у-облучение от загрязненной поймы и поступление радионуклидов в организм с речной водой и местными продуктами питания. Методология ретроспективной оценки доз внутреннего облучения, используемая в TRDS, базируется на большом количестве измерений содержания радионуклидов в организме человека. Радионуклидом, представлявшим наибольший интерес, был <sup>90</sup>Sr, для которого были использованы практически все известные методы оценки его содержания в организме [11]. Обширный набор данных по <sup>90</sup>Sr позволил реконструировать поступление этого радионуклида жителям реки Течи [12] и разработать биокинетическую модель для стронция в организме человека любого пола и возраста [13].

Помимо облучения от реки Течи, члены КРТ подверглись радиационному воздействию от других источников: (1) радиоактивных выпадений в результате аварии 1957 г., сформировавших Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС); и (2) газо-аэрозольных выбросов ПО «Маяк». Обобщение данных по мониторингу местных продуктов, проб окружающей среды и образцов костей человека на ВУРСе позволило расширить программу TRDS для расчета доз от проживания на территории ВУРСа [10, 14]. Индивидуальные дозы для членов КРТ от <sup>131</sup>I были рассчитаны на основании информации по газо-аэрозольным выбросам, предоставленной специалистами ПО «Маяк», с использованием программ, разработанных в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории (США) [15].

В данной статье представлено краткое описание КРТ и дозиметрической системы TRDS-2016D, а также проанализированы результаты расчета индивидуальных доз для членов КРТ.

## Материал и методы

КРТ объединяет людей, родившихся до 1 января 1950 г. и проживавших в одном из НП по реке Тече в любой отрезок времени в период с января 1950 г. по декабрь 1960 г. Основными источниками информации для идентификации членов КРТ были: 1) похозяйственные книги сельских административных советов; 2) списки лиц, переселенных из НП реки Течи, которым полагалась компенсация; 3) перепись жителей НП реки Течи, которая была проведена в 1960-е гг. сотрудниками УНПЦ РМ. Согласно этим источникам, численность когорты составляла 29730 человек [3]. Половозрастная структура КРТ показана в табл. 1.

Таблица 1

Половоз	растная ст	руктур	эа КРТ
---------	------------	--------	--------

Характеристика	Доля от всей когорты, %
Мужчины	42
Женщины	58
Возраст на 01.01.1950 г.	
До 1 года	3
1-9 лет	16
10-19 лет	24
20-39 лет	30
40-59 лет	18
60 лет и старше	9

Как видно из табл. 1, из всех членов когорты 58 % составляли женщины. Возраст на начало облучения в 1950-х гг. варьировал от нуля до 78 лет (среднее значение равнялось 25 годам). В настоящее время возраст самых молодых членов когорты превышает 68 лет. Известно, что к началу 2017 г. более 65 % членов КРТ умерли от разных причин, 22 % были потеряны изпод наблюдения в результате миграции за пределы Уральского региона.

В 1953–1961 гг. жители НП, расположенных в верхнем течении реки (и частично в среднем ее течении) были переселены на незагрязненные территории в пределах тех же административных районов. Однако в 1957 г. 5280 членов КРТ подверглись дополнительному облучению в результате образования ВУРСа.

Метод, используемый в дозиметрической системе TRDS-2016D для расчета доз облучения, полученных в результате сбросов в реку Течу и выпадений на ВУРСе, может быть записан в виде одного базового уравнения:

$$D_{o,Y,i} = \sum_{y=y_{min}}^{P \le Y} \left[ \sum_{L} M_{y,L,i} \left[ \left( \sum_{r} I_{y,r,L}(\tau_{i}) DF_{r,o,Y-y}(\tau_{i}) \right) + A_{o} D_{Riv,L,y} \left( T_{1}(\tau_{i}) + R_{\frac{out}{Riv,L}} \left( T_{2}(\tau_{i}) + R_{\frac{in}{out}} T_{3}(\tau_{i}) \right) \right) + \right] \right]$$
(1)

В уравнении верхняя строка представляет собой расчет дозы в результате загрязнения реки Течи: внутреннее облучение (левая часть) и внешнее облучение (правая часть), вторая строка представляет собой расчет дозы на территории ВУРСа: внутреннее облучение (левая часть) и внешнее облучение (правая часть). Описание параметров уравнения (1) приведено ниже:  $D_{o,Y,i}$  – поглощенная доза (Гр) в органе *о* человека *i*, накопленная к календарному году *Y*;

- Y конечная временная точка расчета доз для конкретного человека (может меняться в интервале 1950–2015 в соответствии с индивидуальными данными);
- у год радиационного воздействия (внешнего облучения или поступления радионуклидов); минимальное значение у равно МАХ{1950, b<sub>i</sub>, год приезда в пункты, расположенные на реке Тече или на территории ВУРСа после начала загрязнения};

- $\tau_i = y b_i$  возраст человека *i* в году *y*, где  $b_i$  год рождения человека *i*;
- *Р* конечная временна́я точка внешнего облучения или поступления радионуклидов для конкретного человека (может меняться в интервале 1950–*Y*, *P* ≤ *Y*);
- *L* идентификатор населенного пункта;
- *M*<sub>*y*,*L*,*i*</sub>- доля времени в году *у*, прожитая человеком *i* в пункте *L*;
- *г* идентификатор радионуклида (<sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>103</sup>Ru, <sup>106</sup>Ru, <sup>137</sup>Cs, <sup>141</sup>Ce, <sup>144</sup>Ce);
- *I*<sub>у,r,L</sub> поступление (Бк) радионуклида *r* в году *y* в пункте *L* (функция возраста);
- DF<sub>по,Y-y</sub> дозовый коэффициент (Гр/Бк) для дозы, накопленной в органе о за период времени Y-у после единичного поступления радионуклида r (функция возраста);

- *A<sub>o</sub>* коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в органе *о* (функция возраста);
- $D_{Riv,L,y}$  поглощенная доза в воздухе у уреза воды в пункте *L* в календарном году *y*;
- *R*<sub>out/Riv,L</sub> отношение мощности дозы в воздухе на территории НП к мощности дозы в воздухе у уреза воды в пункте *L*;
- *R<sub>in/out</sub>* отношение мощности дозы в воздухе внутри жилых помещений к мощности дозы вне помещений;
- *T*<sub>1</sub> доля времени, проводимого на берегу реки (функция возраста);
- *T*<sub>2</sub> доля времени, проводимого на территории НП (функция возраста);
- *Т*<sub>3</sub> доля времени, проводимого внутри помещений (функция возраста);
- $G_{Sr,L}$  начальная плотность загрязнения почвы <sup>90</sup>Sr (Бк/м<sup>2</sup>) в пункте *L* на ВУРСе;
- $E_{r,y}$  поступление радионуклида *r* при единичной плотности загрязнения почвы <sup>90</sup>Sr в календарном году *y* на территории ВУРСа (функция возраста);
- *D*<sub>*Sr,y*</sub>- поглощенная доза в воздухе (Гр) в календарном году *у* при единичной плотности загрязнения почвы <sup>90</sup>Sr (Бк/м<sup>2</sup>) в результате образования BУPCa.

Функция поступления радионуклидов  $I_{y,r,L}$  – комплексная, зависящая от времени функция, детально описанная в работах [12, 16]. Среднее поступление радионуклида r человеку возраста  $\tau$  в году y в населенном пункте L, рассчитывается с использованием выражения:

$$I_{y,r,L}(\tau) = I_{y,R}^{Sr90} \times \alpha_{\tau,R}^{Sr90} \times f_L^{Sr90} \times R_{y,r/Sr}^L$$
(2)

где:

- *I*<sup>Sr90</sup><sub>*y*,*R*</sub> поступление <sup>90</sup>Sr взрослым жителям реперного НП в календарном году *y*;
- $\alpha_{\tau,R}^{Sr90}$  отношение поступления <sup>90</sup>Sr детям возраста  $\tau$  к поступлению взрослым жителям реперного НП;
- $f_L^{Sr90}$  отношение поступления <sup>90</sup>Sr в пункте *L* к поступлению <sup>90</sup>Sr в реперном НП;
- $R_{y,r/Sr}^{L}$  отношение поступления радионуклида *r* к поступлению <sup>90</sup>Sr в пункте *L* в году *y*.

Дозиметрическая система TRDS представляет собой модульный процессор системных баз данных. Базы данных TRDS-2016D включают информацию о динамике поступления радионуклидов и мощностях доз в воздухе для 41 НП, расположенных по реке Тече (от места сбросов и до устья реки), и 83 НП, расположенных на территории ВУРСа (с исходной плотностью загрязнения почвы <sup>90</sup>Sr в диапазоне от 3,7 до 17800 кБк/м<sup>2</sup>).

Реконструкция средних по НП функций поступления и поглощенных доз в воздухе, используемых в TRDS-2016D, были описаны ранее [12, 14, 16–18]. Учитываются поступления следующих радионуклидов: <sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>103</sup>Ru, <sup>106</sup>Ru, <sup>137</sup>Cs, <sup>144</sup>Ce, <sup>141</sup>Ce; для каждого радионуклида имеется таблица возрастных дозовых коэффициентов, представляющих собой поглощенные дозы в органах на единицу поступления. В список органов для расчета доз включены: пищевод, желудок, тонкая кишка, толстая кишка, ректосигмовидный отдел кишечника, легкие, молочные железы, красный костный мозг, щитовидная железа, мочевой пузырь, печень, селезенка, почки, надпочечники, тимус, матка, яички, яичники, головной мозг, мышцы и кожа.

Входные данные на каждого члена когорты должны включать идентификационный код, год рождения, пол, полную историю проживания на территории наблюдения и год выхода из-под наблюдения (в результате смерти, миграции, или окончания периода наблюдения за когортой).

Программа TRDS-2016D предоставляет пользователю ряд опций для выдачи результатов. Первый вариант представляет собой расчет доз для всех членов КРТ по общему алгоритму с использованием средних по НП параметров, имеющихся в системных базах данных. Комбинируя средние по НП данные для каждого календарного периода с историей проживания и возрастом конкретного человека, система продуцирует индивидуальный сценарий внешнего облучения и индивидуальные поступления радионуклидов, а затем рассчитывает соответствующие им дозы внешнего и внутреннего облучения.

В случаях, когда имеются дополнительные данные по условиям облучения на реке Тече, система позволяет оценить индивидуальные дозы с большей точностью.

Уточненные оценки доз внутреннего облучения на реке Тече могут быть получены с привлечением дополнительных данных по индивидуальным измерениям содержания <sup>90</sup>Sr в организме. Вариации содержания в <sup>90</sup>Sr внутри возрастных групп одного и того же НП определялись источниками питьевой воды (река и/или колодцы). Поэтому функции поступления для лиц с результатами измерений содержания радионуклидов в организме могут быть скорректированы с использованием т.н. «индивидуального/модельного отношения» (individual-to-model ratio, IMR). По определению, IMR равняется среднему отношению индивидуальных измерений к модельным значениям, рассчитанным по биокинетической модели [13] и реперной функции поступления [12]. Помимо этого, предполагая, что люди, проживавшие в одном хозяйстве, имели одни и те же источники питьевой воды, можно приписать им «специфичный хозяйству коэффициент» (household-specificrelationship, HSR), который определяется как среднее значение IMR для измеренных членов хозяйства [19]. Этот коэффициент может использоваться для уточнения доз у людей, у которых не были проведены индивидуальные измерения, но они имели «измеренных» родственников, проживавших вместе с ними в период поступления. Значения IMR/HSR были рассчитаны для 10900 членов КРТ, у которых имелись индивидуальные данные, и были занесены в соответствующую базу данных TRDS-2016D.

Уточненные оценки индивидуальных доз внешнего облучения для жителей верховьев реки Течи могут быть получены с привлечением дополнительных

Номер человека (случая) Год рож- дения Пол	Пет	Места и сроки проживания в НП, расположенных на загрязненных территориях		Выход из-под наблюдения	Дополнительные данные для расчета дозы на реке Тече		
	Река Теча (расстояние от места сброса)	ВУРС (плотность загрязнения <sup>90</sup> Sr)	IMR <sup>1</sup>		$R_{house/riv}^2$		
1	1941	Ж	Метлино (7 км): 1941–1956	Не проживала	2018, жива	1,60	0,05
2	1935	М	Метлино (7 км): 1945–октябрь 1956	ОНИС (56 кБк/м <sup>2</sup> ): ноябрь 1956–1960	2010, умер	1,97	0,02
3	1917	М	Старое Асаново (33 км): 1949–1951	Бердяниш (17,8 МБк/м <sup>2</sup> ): 1951–октябрь 1957	1990, умер	-	-
4	1939	Ж	Муслюмово (78 км): 1939-март 2011	Не проживала	2018, жива	2,30	-
5	1926	Ж	Русская Теча (138 км): 1926–1990	Не проживала	2011, умерла	0,08	-
6	1949	М	Затеченское (237 км): ноябрь 1952-май 1968	Не проживал	2017, жив	_	_

Таблица 2	
Примеры исходных данных для шести членов	з КРТ (результаты расчета доз показаны на рис. 1)

**Примечания**: <sup>1</sup> – Значения *IMR* больше единицы (как в случаях 1, 2 и 4) означают, что эти люди использовали загрязненную речную воду для питья и имели более высокие поступления радионуклидов по сравнению с реперными значениями; низкие значения *IMR*, как в случае 5, означают, что этот человек использовал воду из колодца и имел низкое поступление радионуклидов по сравнению с реперными значениями; <sup>2</sup> – Более высокое значение *R*<sub>house/riv</sub> в случае 1 относительно случая 2 (оба проживали в одном НП) означает, что первое хозяйство располагалось ближе к загрязненной береговой полосе, и мощность дозы в воздухе в месте расположения хозяйства 1 была выше по сравнению с хозяйством 2

данных о расположении их домов относительно загрязненной береговой полосы (близко или далеко от уреза воды). Мощности дозы в воздухе на территории каждого НП существенно снижались с расстоянием от уреза воды. Если расстояние от хозяйства, в котором проживал человек, до берега реки было неизвестно, предполагалось, что этот человек мог проживать в любом доме в границах НП. В этом случае параметр R<sub>out/</sub> *<sub>Riv L</sub>* в уравнении (1) определяется как среднее для всего НП и может иметь большую неопределенность. Если имелась информация о месте расположения конкретного хозяйства, в котором человек жил в период облучения, то средний по НП параметр R<sub>out./Riv, L</sub> может быть заменен более точным R<sub>house/riv,L</sub>. Такие отношения «индивидуальное хозяйство/берег реки» были рассчитаны для 2014 жителей верховьев реки Течи с известными местами расположения их хозяйств, и занесены в соответствующую базу данных TRDS-2016D.

## Результаты и обсуждение

Входные данные по историям проживания и датам жизненного статуса для членов КРТ были извлечены из базы данных УНПЦ РМ в марте 2017 г. Информация по местам и срокам проживания для 29647 членов КРТ отвечала критериям полноты и качества исходных данных, необходимых для расчета доз. Шесть примеров таких исходных данных показаны в табл. 2.

Как видно из табл. 2, первые два субъекта проживали в течение всего периода сбросов в селе Метлино (ближайший от места сброса НП, который был снесен в 1956 г.). Один из них (случай 2) получил дополнительное облучение в 1957–1960 гг. на территории



Рис. 1. Примеры накоплений индивидуальных доз в ККМ (сплошная линия) и мышцах (пунктирная линия) для случаев из табл. 2. Суммарная индивидуальная доза (Гр) на год выхода из-под наблюдения показана над каждой кривой накопления

ВУРСа с низкой плотностью загрязнения почвы <sup>90</sup>Sr. Третий человек (случай 3) в 1951 г. переехал с реки Течи в село Бердяниш, где в сентябре 1957 г. подвергся дополнительному облучению и был эвакуирован в течение двух недель после аварии. Субъекты 4 и 5 с рождения постоянно проживали в среднем течении реки на протяжении всего периода сбросов. Шестой человек из табл. 2 приехал на Течу уже после окончания основных сбросов и жил в НП, расположенном в нижнем течении реки (далеко от места сброса). Как видно из табл. 2, индивидуальные поступления в случаях 1, 2, 4 и 5 могут быть скорректированы с использованием *IMR* (в соответствии с измерениями содержания <sup>90</sup>Sr в организме). Сценарии внешнего облучения для случаев 1 и 2 могут быть уточнены в соответствии с данными о расположении хозяйств относительно реки.

Накопление индивидуальных доз в красном костном мозге (ККМ) и мышцах (как образце внескелетных тканей) для рассматриваемых случаев показано на рис. 1.

Как видно из рис. 1, во всех случаях доза на ККМ превышала дозу, поглощенную в мышцах. Большая часть дозы во внескелетных тканях была накоплена до 1970 г. в результате внешнего облучения и поступления <sup>137</sup>Сs. Индивидуальные дозы на мышцы варьировали от 2 мГр для случая 6 («позднее прибытие» на территорию низовьев реки) до 910 мГр для случая 1 (проживание близко к месту сброса в течение всего периода сбросов). Облучение ККМ стронцием-90, инкорпорированным в костях, продолжалось более длительный период. Индивидуальные дозы на ККМ варьировали от 34 мГр для случая 5 (район среднего течения реки Течи, использование воды из подземных источников) до 3,18 Гр для случая 4 (район среднего течения реки Течи, использование речной воды для питья). Эффект дополнительного облучения на ВУРСе заметен только для случая 3, когда человек после кратковременного проживания на реке мигрировал в НП, сильно загрязненный в результате аварии 1957 г. (после аварии его доза на ККМ увеличилась в два раза).

В среднем, суммарные дозы на ККМ для взрослых постоянных жителей составляли около 1 Гр в верховьях реки Течи, около 0,5 Гр в районе среднего течения реки и около 0,3 Гр в низовьях реки. Типичная структура суммарной дозы на ККМ для разных районов реки Течи представлена в табл. 3. Из таблицы видно, что главным дозообразующим радионуклидом в НП вдоль всей реки был <sup>90</sup>Sr, чей вклад в суммарную дозу составил 61–94 %. Вклад <sup>89</sup>Sr составил 2,5–3,2 % и существенно не менялся с расстоянием от места сброса.

Как следует из табл. 3, вклады внешнего облучения и внутреннего облучения от <sup>137</sup>Cs были максимальными в верховьях реки Течи (24 и 12 % соответственно) и существенно снижались с расстоянием (до 0,6 % и 1,9 % в НП в низовьях реки Течи). Изменение вкладов <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs с расстоянием объясняется четырехкратным превышением скорости адсорбции <sup>137</sup>Cs донными и пойменными почвами по сравнению со <sup>90</sup>Sr, в результате чего отношение <sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr в речной воде снижалось по течению реки [2]. Таблица 3

Вклад разных источников в суммарную дозу облучения на ККМ для взрослых постоянных жителей прибрежных сел реки Течи

Район реки Течи,	Вклад в суммарную дозу, %			
расстояние от места сброса	Внутреннее облучение <sup>1</sup>			Внешнее
	<sup>90</sup> Sr	<sup>89</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	облучение
Верхнее течение, 7–75 км	61	2,5	12	24
Среднее течение, 78–148 км	90	3,2	4,3	1,8
Нижнее течение, 155–237 км	94	3,2	1,9	0,6

**Примечание:** <sup>1</sup> – Остальные радионуклиды, кроме  $^{90}$ Sr,  $^{89}$ Sr и  $^{137}$ Cs, внесли суммарный вклад менее 1 %

Согласно данным из историй проживания, 5280 членов КРТ получили дополнительные дозы облучения на территории ВУРСа. Однако в большинстве случаев прибавка к дозе, уже полученной на реке Тече, была незначительна и в среднем составила 2,8 мГр для ККМ и 0,6 мГр для желудка.

Распределение вкладов внешнего и внутреннего облучения в поглощенную дозу на желудок и легкие для членов КРТ иллюстрирует рис. 2. Основными источниками облучения этих органов было внешнее ү-облучение и поступление <sup>137</sup>Сs. Из рисунка видно, что медианные дозы внешнего облучения в когорте ниже, чем дозы внутреннего облучения для обоих рассматриваемых органов. Тем не менее, для 10 % членов когорты с самыми высокими дозами (40 мГр и выше) вклад внешнего облучения становится превалирующим (рис. 2). Это приводит к некоторому превышению среднего по когорте значения дозы внешнего облучения над дозой внутреннего облучения, а именно: 30 против 29 мГр для желудка и 31 против 19 мГр для легких. Распределения индивидуальных доз в КРТ не подчинялись теоретическим законам (например, логнормальному). Это можно объяснить гетерогенностью когорты. Формирование доз определялось небольшим числом ведущих факторов, значения которых были специфичны для каждого НП. Численность населения НП в 1950 г. варьировала от 75 до 4100 человек. Поэтому КРТ следует рассматривать как совокупность нескольких разных по численности групп людей с разными условиями облучения.

Необходимо отметить, что члены КРТ, помимо облучения на реке Тече и на ВУРСе, подверглись воздействию радиоактивного йода из газо-аэрозольных выбросов ПО «Маяк» [15]. Индивидуальные дозы на щитовидную железу (ЩЖ) для членов КРТ, полученные от загрязнения реки Течи и выпадений на ВУРСе, были рассчитаны с использованием программы TRDS-2016D. В дополнение к этому, для членов КРТ, проживавших на расстояниях до 240 км от ПО «Маяк», были рассчитаны индивидуальные дозы от поступления <sup>131</sup>I из атмосферных выбросов 1948–1972 гг. [15]. Сравнение результатов показало, что вклад <sup>131</sup>I в суммарную дозу на ЩЖ составил 75–99 %. Самые высокие дозы на ЩЖ были получены людьми, которые роди-



Рис. 2. Распределения индивидуальных доз внутреннего (пунктирная линия), внешнего (штрих-пунктирная линия) и суммарного (сплошная линия) облучения желудка и легких у членов КРТ

лись в 1940-е годы, и проживали в верховьях реки Течи на близких расстояниях от ПО «Маяк» [15].

На рис. 3 показаны распределения суммарных индивидуальных доз, поглощенных в различных органах и тканях, для членов КРТ. Из рисунка видно, что распределение доз по организму человека было неравномерным. Наибольшему облучению подверглись ККМ и ЩЖ (средние дозы составляли 350 мГр и 200 мГр соответственно). Для стенок толстой кишки и ректосигмовидного отдела ободочной кишки средние дозы равнялись 80 и 100 мГр. Для большинства внескелетных тканей средняя доза составляла 50–60 мГр. Медианные дозы во всех случаях были существенно ниже средних значений, что говорит о том, что распределения индивидуальных доз положительно асимметричны.

Значения индивидуальных доз в КРТ варьируют в широком диапазоне. Около 10 % членов когорты получили дозы менее 2 мГр на внескелетные ткани, менее 10 мГр на ЩЖ и менее 60 мГр на ККМ (рис. 3). Как правило, эти люди приехали на реку Течу после прекращения сбросов и жили в низовьях реки. В то же время, другие 10 % КРТ получили дозы, превышающие 100 мГр на большинство внескелетных тканей; 200 мГр на стенки кишечника; 400 мГр на ЩЖ и около 900 мГр на ККМ (рис. 3). Максимальные дозы (около 1 Гр на большинство внескелетных тканей, около 2 Гр на стенки кишечника и свыше 7 Гр на ЩЖ и ККМ) были у людей, которые в детском и юношеском возрасте проживали в верховьях реки, а также которые имели высокое содержание радионуклидов в организме и проживали близко к загрязненной пойме.

Для оценки дозовой зависимости риска лейкозов и со́лидных раков в КРТ ранее использовалась дозиметрическая система TRDS-2009D, разработанная в 2009 г. [3–6]. После 2009 г. базы данных TRDS были существенно обновлены. На основании результатов многочисленных измерений содержания долгоживущего <sup>90</sup>Sr у жителей реки Течи были уточнены функции поступления этого радионуклида [12]. Чтобы связать поступившее количество <sup>90</sup>Sr с его содержанием в организме, была разработана биокинетическая модель, параметры которой позволяют учитывать возраст и пол человека [13].



Рис. 3. Распределения индивидуальных доз в различных органах и тканях членов КРТ: левая граница интервалов соответствует 10-й процентили, а правая граница – 90-й процентили распределений; кружками показаны медианы, а крестики соответствуют средним по когорте значениям поглощенных доз

Анализ архивных материалов по хранению и переработке жидких радиоактивных отходов на ПО «Маяк» позволил существенно уточнить динамику сбросов в реку Течу [1]. Верифицированные значения параметров источника сбросов были использованы для моделирования транспорта радионуклидов в реке и их депонирования в пойменных почвах [2]. Результаты моделирования позволили уточнить поступления короткоживущих радионуклидов, а также верифицировать поступление <sup>137</sup>Cs [16]. Также были получены новые оценки динамики у-излучения по берегам реки путем моделирования воздушной кермы над загрязненной радионуклидами поймой [20]. Расчетные оценки интегральной кермы были подтверждены результатами люминесцентных измерений накопленных доз в кирпичах старых зданий, расположенных на берегах реки Течи [21]. Расчетные значения доз внешнего облучения жителей верхнего течения реки Течи были валидированы результатами измерений поглощенной дозы в эмали зубов методом электронного парамагнитного резонанса и оценками частоты транслокаций в лимфоцитах периферической крови методом флуоресцентной in situ гибридизации [17, 22].

Сравнение результатов новых расчетов с предыдущими оценками показало, что индивидуальные дозы, полученные по TRDS-2016D, коррелируют с оценками по TRDS-2009D (R = 0.95), но в среднем на 18 % ниже для ККМ и примерно на 30 % выше для внескелетных тканей. Причиной этого являются уточнения концентраций радионуклидов в воде и пойме реки Течи, полученные на основе более детальных данных по сбросам с использованием усовершенствованной модели транспорта радионуклидов. На оценки доз внешнего облучения также повлиял впервые учтенный в расчетах фактор расположения хозяйства относительно реки.

Оценкам индивидуальных доз, полученных с использованием дозиметрических систем, основанных на реконструкции радиоактивного загрязнения окружающей среды (таким как TRDS), присуща значительная неопределенность. В настоящем исследовании для расчета доз была использована детерминированная версия системы TRDS-2016D, которая позволяет получать точечные оценки. Параллельно разрабатывалась стохастическая версия TRDS-2016MC, в которую заложено предположение о том, что параметры расчета доз являются случайными величинами. Стохастическая система TRDS-2009MC, описанная в статье [11], базируется на таких же методологических принципах. В системе используется двумерный метод Монте-Карло, который позволяет разделить общие неопределенности (связанные, например, с общими для группы людей источниками облучения) и индивидуальные неопределенности (связанные с параметрами для отдельного человека). Стохастическая версия выполняет многократный расчет годовых поглощенных доз для каждого человека и позволяет получить на выходе набор возможных значений индивидуальной дозы и его статистические характеристики (среднее, стандартное отклонение, процентили и др.). В стохастической версии TRDS используются те же самые базовые уравнения и входные данные, что и в детерминированной версии, но программируются они независимо друг от друга.

#### Заключение

Оценки индивидуальных доз для членов КРТ были получены с использованием дозиметрической системы TRDS-2016D. Дозы внешнего и внутреннего облучения различных органов и тканей были рассчитаны на основе историй проживания людей на реке Тече и ВУРСе, с привлечением результатов индивидуальных измерений содержания радионуклидов в организме и данных о расположении индивидуальных хозяйств относительно загрязненной поймы. Поступление стронция-90 с водой реки Течи привело к преимущественному облучению красного костного мозга (средняя доза 350 мГр), а поступление йода-131 из атмосферный выбросов ПО «Маяк» обусловило повышенные уровни облучения щитовидной железы (средняя доза 210 мГр). Максимумы индивидуальных доз для этих двух органов превышали 7 Гр. Для остальных органов средняя по когорте доза не превышала 100 мГр, а максимальные уровни были около 1 Гр. Анализ дозовых зависимостей заболеваемости со́лидными опухолями и лейкозами в КРТ позволит верифицировать риск отдаленных эффектов при хроническом облучении с низкой мощностью дозы, что может быть использовано для целей радиационной защиты.

Разработка дозиметрической системы TRDS выполнялась при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России и Департамента энергетики США в рамках Российско-американского Соглашения по исследованию радиационных воздействий.

Для цитирования: Дегтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И., Шишкина Е.А., Бугров Н.Г., Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облученных в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. T. 64. № 3. C. 46–53.

DOI: 10.12737/article\_5cf2364cb49523.98590475

Radiation Medicine

DOI: 10.12737/article\_5cf2364cb49523.98590475

Medical Radiology and Radiation Safety. 2019. Vol. 64. No. 3. P. 46-53

Individual Dose Distribution in Cohort of People Exposed as a Result of Radioactive Contamination of the Techa River

# M.O. Degteva<sup>1</sup>, B.A. Napier<sup>2</sup>, E.I. Tolstykh<sup>1</sup>, E.A. Shishkina<sup>1,3</sup>, N.G. Bougrov<sup>1</sup>, L.Yu. Krestinina<sup>1</sup>, A.V. Akleyev<sup>1,3</sup>

1. Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia. E-mail: marina@urcrm.ru; 2. Battelle Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA;

3. Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

M.O. Degteva - Head of Lab., PhD Tech.; B.A. Napier - Leading Researcher, UNSCEAR Member;

E.I. Tolstykh - Leading Researcher, Dr. Sci. Biol.; E.A. Shishkina - Senior Researcher, Senior Lecturer, PhD Biol.;

N.G. Bougrov – Senior Researcher, PhD Tech.; L.Yu. Krestinina – Head of Lab., PhD Med.; A.V. Akleyev – Director, Head of Dep., Dr. Sci. Med., Prof., UNSCEAR Member

#### Abstract

Purpose: Descriptive analysis of the distributions of organ/tissue doses for individuals exposed to radiation as a result of liquid waste releases into the Techa River by the Mayak Production Association (PA) in 1949-1956.

Material and methods: The dosimetry system TRDS-2016D has been used to compute individual doses of external and internal exposures. TRDS-2016D databases include information on radionuclide intakes and dose rates in air for settlements located in the contaminated areas of the Techa River and the East Ural Radioactive Trace (EURT). Combining these village-average data with the residence history and age of a particular person, the system produces an individual scenario of external exposure and individual radionuclide intakes and then calculates corresponding external and internal doses from the Techa River and EURT. Available <sup>90</sup>Sr body-burden measurements and available information on individual household locations relative to the contaminated river have been used for refinement of individual dose estimates.

<u>Results</u>: Individual doses have been calculated for 29,647 persons included in the Techa River Cohort (TRC). According to residence history data, 5,280 members of the TRC were additionally exposed due to residency in the EURT villages. The cohort-average dose for the majority of extra-skeletal tissues does not exceed 100 mGy, while for the red bone marrow (RBM) it is equal to 350 mGy. In addition to the doses from the Techa River and EURT, individual thyroid doses for TRC members exposed to the Mayak PA atmospheric <sup>131</sup>I releases have been calculated in a separate computer program. The cohort–average thyroid dose is 210 mGy. Maximum doses (about 1 Gy to the majority of extra-skeletal tissues and over 7 Gy to the thyroid and RBM) are observed for the persons who lived in their childhood and adolescence in the upper Techa region at close distance to the Mayak PA.

<u>Conclusion</u>: The TRC members were exposed to chronic radiation over a wide range of doses, but at low-to-moderate-dose rates. Estimates of absorbed doses can be used to analyze the dose dependences of the incidence of solid cancers and leukemias. This can make it possible to verify risk coefficients of low-dose-rate effects of ionizing radiation which can be used for radiation protection purposes.

**Key words:** dose reconstruction, Mayak Production Association, Techa river, East Urals Radioactive Trace, Strontium-90, Cesium-137, Iodine-131

Article recieved: 21.11.2018. Accepted for publication: 19.04.2019

### REFERENCES

- Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Shishkina EA, Tolstykh EI, Akleyev AV. Contemporary understanding of radioactive contamination of the Techa River in 1949–1956. Radiation Biology. Radioecology. 2016;56(5):523-34. DOI: 10.7868/S0869803116050039. (Russian).
- Shagina NB, Vorobiova MI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shishkina EA, Anspaugh LR, Napier BA. Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949-1951 as a result of releases from the "MAYAK" Production Association. Radiat Environ Biophys. 2012;51:349-66. DOI: 10.1007/s00411-012-0414-0.
- 3. Consequences of Radioactive Contamination of the Techa River. Akleyev AV (ed). Chelyabinsk: Kniga; 2016. 400 p. (Russian).
- Davis FG, Krestinina LYu, Preston D, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007. Radiat Res. 2015;184:56-65. DOI: 10.1667/ RR14023.1.
- Krestinina LYu, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, AkleyevAV. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. Brit J Cancer. 2013;109:2886-93. DOI:10.1038/bjc.2013.614.
- Schonfeld SJ, Krestinina LYu, Epifanova SB, Degteva MO, Akleyev AV, Preston DL. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950-2007). Radiat Res. 2013;179(2):183-9. DOI: 10.1667/RR2932.1.
- Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LYu, Stram DO. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and atomic bomb survivor studies. Radiat Prot Dosim. 2017;173(1):26-31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316.
- Ruhm W, Woloschak GE, Shore RE, Azizova TV, Grosche B, Niwa O, et al. Dose and dose-rate effects of ionizing radiation: a discussion in the light of radiological protection. Radiat Environ Biophys. 2015;54(4):379-401. DOI: 10.1007/s00411-015-0613-6.
- 9. Degteva MO, Tolstykh EI, Vorobiova MI, Shagina NB, Shishkina EA, Bougrov NG, et al. Techa River Dosimetry System: Current status and future. Radiation Safety Issues. 2006;(1):66-80. (Russian).
- 10. Napier BA, Degteva MO, Shagina NB, Anspaugh LR. Uncertainty analysis for the Techa River Dosimetry System. Medical Radiology and Radiation Safety. 2013;58(1):5-28. (Russian and English).
- 11. Degteva MO, Tolstykh EI, Suslova KG, Romanov SA, Akleyev AV. Analysis of the results of long-lived radionuclide body burden monitoring in residents of the Urals region. Radiation Hygiene. 2018;11(3):30-9. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-30-39. (Russian).
- 12. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoschapov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. Health Phys. 2011;101(1):28-47. DOI: 10.1097/ HP.0b013e318206d0ff.

- 13.Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. J Radiol Prot. 2015;35(1):87-127. DOI: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
- 14. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). Radiat Environ Biophys. 2017;56(1):27-45. DOI: 10.1007/s00411-016-0677-y.
- 15. Napier BA, Eslinger PW, Tolstykh EI, Vorobiova MI, Tokareva EE, Akhramenko BN, et al. Calculations of individual doses for Techa River Cohort members exposed to atmospheric radioiodine from Mayak releases. J Environ Radioact. 2017;178-179:156-67. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.08.013.
- 16. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, Napier BA. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: <sup>137</sup>Cs. Health Phys. 2013;104(5):481-98. DOI: 10.1097/HP.0b013e318285bb7a.
- 17. Degteva MO, Shagina NB, Shishkina EA, Vozilova AV, Volchkova AY, Vorobiova MI, et al. Analysis of EPR and FISH studies of radiation doses in persons who lived in the upper reaches of the Techa River. Radiat Environ Biophys. 2015;54:433-44. DOI: 10.1007/s00411-015-0611-8.
- Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957. J Radiol Prot. 2017;37:R19-R42. DOI: 10.1088/1361-6498/aa7f8d.
- 19.Degteva MO, Shagina NB, Tolstykh EI, Bougrov NG, Zalyapin VI, Anspaugh LR, Napier BA. An approach to reduction of uncertainties in internal doses reconstructed for the Techa River population. Radiat Prot Dosim. 2007;127:480-5. DOI: 10.1093/rpd/ncm410.
- 20. Shishkina EA, Volchkova AYu, Degteva MO, Napier BA. Evaluation of dose rates in the air at non-uniform vertical distribution of gamma-emitting radionuclides in different types of soil. Radiation Safety Issues. 2016;(3):43-52. (Russian).
- 21. Hiller MM, Woda C, Bougrov NG, Degteva MO, Ivanov O, Ulanovsky A, Romanov S. External dose reconstruction for the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modelling. Radiat Environ Biophys. 2017;56(2):139-59. DOI: 10.1007/s00411-017-0688-3.
- 22. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Vozilova AV, Shagina NB, Volchkova AYu, et al. Application of EPR and FISH methods to dose reconstruction for people exposed in the Techa River area. Radiation Biology. Radioecology. 2017;57:30-41. DOI: 10.7868/S0869803117010052. (Russian).

**For citation:** Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Bougrov NG, Krestinina LYu, Akleyev AV. Individual Dose Distribution in Cohort of People Exposed as a Result of Radioactive Contamination of the Techa River. Medical Radiology and Radiation Safety. 2019;64(3):46-53. (Russian).

DOI: 10.12737/article\_5cf2364cb49523.98590475