

Оценка доз облучения лимфоцитов и их предшественников при пероральном поступлении стронция-89,90

Е.И. Толстых, М.О. Дегтева

Уральский научно-практический центр радиационной медицины
Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Циркулирующие Т-лимфоциты используются в радиобиологии как «естественные биодозиметры», поскольку частота хромосомных aberrаций, возникающих в них после облучения, пропорциональна накопленной дозе. Более того, стабильные хромосомные aberrации (транслокации) обнаруживаются в них спустя годы и десятилетия после облучения. Оценка доз на циркулирующие лимфоциты требует учета 2 компонентов: дозы, полученной предшественниками (прогениторами) лимфоцитов в красном костном мозге; дозы, полученной лимфоцитами в лимфоидных органах/тканях при циркуляции. Недавно созданная модель облучения циркулирующих Т-лимфоцитов учитывает все эти компоненты, а также возрастные особенности динамики Т-лимфоцитов. Особенно важно применение модельного подхода при оценке доз от остеотропных бета-излучателей ($^{89,90}\text{Sr}$). После попадания в организм они накапливаются в кости и практически локально облучают костный мозг, так что доза на другие лимфоидные органы и ткани оказывается существенно ниже. Целью данного исследования является оценка коэффициентов перехода от перорального поступления $^{89,90}\text{Sr}$ к накопленной дозе на циркулирующие Т-лимфоциты и их предшественников (DK_L). Для расчетов использовали разработанную ранее модель облучения Т-лимфоцитов и новые дозовые коэффициенты для красного костного мозга, оцененные на основе половозрастной биокинетической модели и новой дозиметрической модели скелета человека. В результате проделанной работы впервые были определены значения DK_L . Возраст на момент поступления $^{89,90}\text{Sr}$ варьировал от новорожденного до 35 лет, возраст обследования Т-лимфоцитов (возраст забора крови) — до 75 лет. Максимальные значения дозовых коэффициентов, как для ^{90}Sr , так и для ^{89}Sr , были характерны для детей первых лет жизни. Было показано, что дозы на циркулирующие Т-лимфоциты оказываются ниже, чем дозы на ККМ от этих радионуклидов, но существенно выше, чем дозы на другие лимфоидные ткани. Влияние пола на DK_L выражено для детей 10 лет и старше. Область применения DK_L охватывает работников предприятий атомной промышленности, а также население радиоактивно загрязненных территорий (Уральский регион, зона Чернобыльской аварии).

Ключевые слова: Т-лимфоциты, дозовые коэффициенты, $^{89,90}\text{Sr}$, внутреннее облучение, биодозиметрия.

Введение

Циркулирующие Т-лимфоциты при облучении человека используются как «естественные биодозиметры». Это свойство Т-лимфоцитов связано с тем, что частота хромосомных aberrаций, возникающих в них после облучения, пропорциональна накопленной дозе, а сформированные в лимфоцитах стабильные хромосомные aberrации (транслокации) обнаруживаются спустя годы и десятилетия после облучения [1]. Оцененную на основе хромосомных транслокаций дозу обычно интерпретируют как дозу на красный костный мозг (ККМ) [1]. При внешнем равномерном гамма-облучении это вполне правомерно, поскольку доза на ККМ (местонахождение Т-предшественников) и прочие лимфоидные органы (место циркуляции Т-лимфоцитов) в этом случае практически совпадает. Однако в случае неравномерного об-

лучения, когда доза на ККМ и другие лимфоидные ткани существенно различается, подобная интерпретация может приводить как к занижению дозы на ККМ, так и к ее завышению [2, 3]. Это связано с длительным существованием потомков Т-прогениторов во внескелетных лимфоидных органах и тканях, со способностью к делению Т-лимфоцитов в периферических лимфоидных органах, с длительным поддержанием определенного репертуара клонов Т-лимфоцитов в периферической крови [4–7].

В последние годы была проведена большая работа для прояснения роли облучения предшественников Т-лимфоцитов в ККМ и циркулирующих Т-лимфоцитов при формировании хромосомных aberrаций [8–9]. На основе разработанной нами ранее концепции Т-клеточного рода [8–9] был предложен модельный подход для оценки доз на циркулирующие Т-лимфоциты (модель облучения Т-лимфоцитов) [10]. При этом подходе дозы

Толстых Евгения Игоревна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454141, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: evgenia@urcrm.ru

на Т-лимфоциты рассчитываются как средневзвешенное значение доз, формирующихся в ККМ при облучении Т-клеточных предшественников – прогениторов, а также в других лимфоидных тканях при миграции Т-лимфоцитов. Модельный подход был также использован для определения дозовых коэффициентов, позволяющих перейти от перорального поступления $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb и $^{103,106}\text{Ru}$ к дозе на циркулирующие Т-лимфоциты [3]. Дозы от этих радионуклидов на циркулирующие Т-лимфоциты оказывались выше, чем дозы на ККМ, но ниже, чем дозы на другие лимфоидные ткани, такие как лимфоидные ткани кишечника.

Предварительные оценки доз и валидация модели облучения Т-лимфоцитов были проведены для жителей прибрежных сел реки Течи, облучившихся, в основном, за счет $^{89,90}\text{Sr}$, поступившего с водой и пищей; их кровь исследовалась методом FISH для оценок частоты хромосомных аберраций [10]. Причиной радиоактивного загрязнения реки и территории проживания была производственная деятельность ПО «Маяк» (Челябинская область, Россия) и ряд аварийных ситуаций, случившихся в хранилищах радиоактивных отходов [11, 12]. Поступая в организм, радиоизотопы $^{89,90}\text{Sr}$, ввиду своей остеотропности, практически локально облучают ККМ, очень мало воздействуя на другие лимфоидные ткани. За годы исследований в УНПЦ РМ были накоплены результаты измерений содержания ^{90}Sr в организме жителей загрязненных территорий: около 45 000 прижизненных измерений 25 000 человек, а также результаты более чем 10 000 измерений костных аутопсий [12]. На основе этих данных была разработана биокинетическая модель для стронция, учитывающая пол и возраст индивида [13], которая позволяет оценивать концентрацию $^{89,90}\text{Sr}$ в тканях-источниках (трабекулы губчатой кости и кортикальная кость) после перорального единичного поступления. Недавно при использовании подходов стохастического моделирования была разработана новая дозиметрическая модель скелета человека (SPSD-модель) для 6 референтных возрастов с учетом пола [14, 15]. С ее помощью были определены новые дозиметрические коэффициенты для перехода от концентрации $^{89,90}\text{Sr}$ в тканях-источниках к дозе на ККМ. Результатом объединения этих моделей были рассчитанные новые дозовые коэффициенты в терминах Гр/Бк, связывающие пероральное поступление 1 Бк $^{89,90}\text{Sr}$ с дозой на ККМ (Гр). Основные отличия новых дозовых коэффициентов от ранее использованных [16] касаются детей первых лет жизни. Поскольку дозы на ККМ включены в алгоритм расчета доз на Т-лимфоциты и их предшественников, представляется важным использовать для анализа цитогенетических данных новые дозовые коэффициенты. Следует также отметить, что никогда ранее дозовые коэффициенты для Т-лимфоцитов при пероральном поступлении $^{89,90}\text{Sr}$ не оценивались.

Цель исследования – используя разработанную нами модель облучения Т-лимфоцитов и новые дозиметрические коэффициенты для ККМ, оценить коэффициенты перехода от перорального поступления $^{89,90}\text{Sr}$ к накопленной дозе на циркулирующие Т-лимфоциты и их предшественников.

Материалы и методы

Расчет дозовых коэффициентов (DK_L), позволяющих перейти от перорального поступления 1 Бк $^{89,90}\text{Sr}$ к накопленной дозе на циркулирующие Т-лимфоциты (здесь и далее доза подразумевает учет облучения предшественников), осуществляется с использованием модели, которая была подробно описана ранее [3, 8–10]. В модели учитывается, что при облучении Т-прогенитора в ККМ потенциальный груз хромосомных аберраций несут все его потомки, то есть целый набор Т-клонов с уникальными Т-клеточными рецепторами. Все потомки одного прогенитора и сам прогенитор объединяются в Т-клеточный род или Т-Genus (TG), который является объектом моделирования [8].

Средневзвешенный DK_L рассчитывается как сумма двух дозовых коэффициентов, которые представляют собой: (1) DK_{LP} – средневзвешенная доза облучения Т-лимфоцитов (Гр), накопленная в период пребывания прогениторов Т-клеток в ККМ при поступлении 1 Бк радионуклида $^{89,90}\text{Sr}$; и (2) DK_{LC} – средневзвешенная доза на циркулирующие лимфоциты (Гр), которая представляет собой дозу, накопленную Т-лимфоцитами в период их циркуляции в организме человека после поступления 1 Бк $^{89,90}\text{Sr}$.

DK_{LP} рассчитывается как среднее значение, взвешенное в соответствии с долей потомков каждого предшественника в периферической крови на момент забора крови:

$$DK_{LP} = \frac{1}{P_{TG}(age_s)} \int_{t_1}^{t_s} p_{TG}(age) D_{ККМ}(t, age) dt; \quad (1)$$

где

t_1 – первый год накопления дозы от момента острого поступления 1Бк радионуклида с рационом;

t_s – год, на который рассчитывается накопленная доза;

age – возраст человека (годы), который варьирует от age_t (возраст поступления $^{89,90}\text{Sr}$) до возраста, на который считается накопленная доза age_s .

$P_{TG}(age)$ – общее число Т-клеточных родов, произведенных в период от рождения до указанного возраста (в относительных единицах), определяется как интеграл функции $f_{TG}(age)$:

$$P_{TG}(age) = \int_0^{age} f_{TG}(t) dt; \quad (2)$$

$$f_{TG}(age) = \begin{cases} 0,5 + 0,5 \cdot age, & 0 \leq age \leq 1 \\ \exp(-0,12 \cdot (age - 1)), & 1 < age \leq 8 \\ 0,4317 \cdot \exp(-0,04 \cdot (age - 8)), & 8 < age \leq 20 \\ 0,2671 \cdot \exp(-0,08 \cdot (age - 20)), & 20 < age \end{cases} \quad (3)$$

$P_{TG}(age)$ – число Т-клеточных родов (TG), произведенных за 1 год (в относительных единицах), которая рассчитывается интегрированием функции (3) для заданного возраста age .

$$p_{TG}(age) = \int_{age}^{age+1} f_{TG}(t) dt. \quad (4)$$

$D_{\text{ККМ}}(t, \text{age})$ – поглощенная доза на ККМ от поступления 1 Бк $^{89,90}\text{Sr}$, накопленная к возрасту age , рассчитывается на основе биокинетической и дозиметрической модели [13, 14].

D_{LC} представляет собой дозу, накопленную лимфоцитами в период их циркуляции в организме человека при поступлении 1 Бк $^{89,90}\text{Sr}$. Во время циркуляции лимфоциты проводят определенные доли времени в лимфоидных органах/тканях. D_{LC} рассчитывается как среднее значение, взвешенное в соответствии с долей лимфоцитов, которые включены в режим циркуляции в каждом возрасте; а также долей времени, проводимой циркулирующими лимфоцитами в 4 органах/тканях, наиболее подверженных облучению от $^{89,90}\text{Sr}$: красный костный мозг (ККМ), тонкий кишечник (sm), толстый кишечник (col), остальные внескелетные лимфоидные ткани (ВТ):

$$D_{\text{LC}, \text{Sr}} = \frac{1}{P_{\text{TG}}(\text{age}_{\text{samp}})} \int_{t_0}^{t_{\text{samp}}} P_{\text{TG}}(\text{age}) [K_{\text{ККМ}} \dot{D}_{\text{ККМ}}(t, \text{age}) + K_{\text{col}} \dot{D}_{\text{col}}(t, \text{age}) + K_{\text{sm}} \dot{D}_{\text{sm}}(t, \text{age}) + K_{\text{ВТ}} \dot{D}_{\text{ВТ}}(t, \text{age})] dt \quad (5)$$

где

$P_{\text{TG}}(\text{age})$ – количество Т-клеточных родов, произведенных в течение периода от рождения до age и переключившихся в режим циркуляции (рассчитывается согласно (2) в относительных единицах);

$\dot{D}_{\text{ККМ}}(t, \text{age})$ – годовая мощность поглощенной дозы в ККМ, которая зависит от возраста на момент поступления и текущего/календарного возраста, рассчитывалась на основе биокинетической и дозиметрической модели для Sr [13, 14];

$\dot{D}_{\text{col}}(t, \text{age})$ – годовая мощность поглощенной дозы в толстом кишечнике, зависит от возраста на момент поступления и текущего/календарного возраста; рассчитывалась на основе биокинетической и дозиметрической модели МКРЗ [16];

$\dot{D}_{\text{sm}}(t, \text{age})$ – годовая мощность поглощенной дозы в тонком кишечнике, зависит от возраста на момент поступления и текущего/календарного возраста; рассчитывалась на основе биокинетической и дозиметрической модели МКРЗ [16].

$\dot{D}_{\text{ВТ}}(t, \text{age})$ – годовая мощность поглощенной дозы в ВТ, которая зависит от возраста на момент поступления и текущего/календарного возраста, рассчитывалась на основе биокинетической модели [13, 16].

K_i – численные коэффициенты, отражающие долю времени, которую Т-лимфоциты при циркуляции проводят в соответствующих тканях [3], оценены для возрастных периодов 0–2 года и старше 2 лет (табл. 1).

Полная средневзвешенная лимфоцитарная доза D_{L} рассчитывается как сумма значений, полученных из уравнений (1) и (5). Численные значения $p_{\text{TG}}(\text{age})$ и $P_{\text{TG}}(\text{age})$ представлены в Приложении.

Влияние пола в биокинетической и дозиметрической модели учитывалось для возрастов старше 10 лет. Поэтому D_{L} для этих возрастов также рассчитывали с учетом пола.

Все дозовые коэффициенты для ^{90}Sr учитывают энергию распада ^{90}Sr и дочернего ^{90}Y , находящегося в равновесии.

Результаты и обсуждение

Рассчитанные дозовые коэффициенты для ^{90}Sr представлены в таблицах 2 и 3 для мужчин и женщин соответственно. Для ^{89}Sr дозовые коэффициенты представлены в таблицах 4 и 5. Поскольку параметры биокинетической модели для стронция в период от рождения до 5 лет меняются быстро и нелинейно, то для этого диапазона age , коэффициенты D_{L} рассчитывали с шагом по году. Именно для этого периода характерны максимальные значения D_{L} как для ^{90}Sr , так и для ^{89}Sr . Значительное уменьшение D_{L} с увеличением age , связано с возрастным снижением дозовых коэффициентов для ККМ и других тканей, а также с тем, что с возрастом увеличивается доля Т-клеточных родов, сформировавшихся до начала облучения. Вклад высокой «прогениторной дозы» ($D_{\text{L}, \text{P}}$, соответствует дозе на ККМ), в средневзвешенную дозу D_{L} снижается с 98% у новорожденных до 31% у 35-летнего человека.

Влияние пола на D_{L} выражено для детей 10 лет и старше. Однако и для детей младшего возраста можно отметить небольшие половые различия, которые накапливаются по мере взросления индивида. В целом, дозовый коэффициент D_{L} является результирующей действия многих зависящих от возраста процессов, включая всасывание радионуклида в кишечнике, отложение в костных объемах и т.п., которые происходят на фоне изменения размеров и структуры тканей человека.

Применяя модельный подход, мы впервые рассчитали дозовые коэффициенты D_{L} для изотопов стронция, которые могут загрязнять окружающую среду при аварийных ситуациях на предприятиях ядерного цикла. Основное преимущество нашей модели в том, что учитывается облучение Т-клеточных прогениторов в ККМ, а не только дозы на лимфоциты, полученные во время их пребывания в лимфоидных органах при циркуляции. Следует отметить, что наша модель опирается на средние значения продукции тимуса в разном возрасте [17–18] и параметров циркуляции Т-лимфоцитов [19–21], которые могут быть пересмотрены после накопления новых научных

Таблица 1

Значения коэффициентов K_i , отражающих долю времени, которую Т-лимфоциты при циркуляции проводят в соответствующих лимфоидных тканях

[Table 1

The values of the K_i coefficients that show the proportion of time T-lymphocytes spend in the corresponding lymphoid tissues during circulation]

Возрастной диапазон, годы [Age range, years]	ККМ, $K_{\text{ККМ}}$ [RBM, K_{rbm}]	Тонкий кишечник, K_{sm} [Small intestine, K_{sm}]	Толстый кишечник, K_{col} [Colon, K_{col}]	ВТ, $K_{\text{ВТ}}$
0–2	0,09	0,03	0,04	0,854
>2	0,10	0,022	0,025	0,853

Накопленная доза от ^{90}Sr на Т-лимфоциты и их предшественники (DC_L) для мужчин различного возраста, Гр/Бк
 Таблица 2
 Accumulated ^{90}Sr dose to T-lymphocytes and their progenitors (DC_L) for men of different age, Gy/Bq
 [Table 2]

Возраст забора крови (age_s), годы [Age at blood sampling (age_s), years]	Возраст (age_i) на момент поступления 1 Бк ^{90}Sr , годы [Age (age_i) at ingestion of 1 Bq ^{90}Sr , years]									
	0	1	2	3	4	5	10	15	25	35
5	5.20E-06	1.27E-06	3.27E-07	1.38E-07	6.39E-08	-	-	-	-	-
10	5.81E-06	1.59E-06	4.85E-07	2.56E-07	1.65E-07	1.16E-07	-	-	-	-
15	6.10E-06	1.74E-06	5.62E-07	3.15E-07	2.18E-07	1.67E-07	5.32E-08	-	-	-
20	6.27E-06	1.83E-06	6.05E-07	3.48E-07	2.48E-07	1.96E-07	8.00E-08	4.36E-08	-	-
25	6.36E-06	1.88E-06	6.30E-07	3.67E-07	2.65E-07	2.13E-07	9.60E-08	6.69E-08	-	-
30	6.41E-06	1.90E-06	6.44E-07	3.78E-07	2.75E-07	2.22E-07	1.06E-07	8.21E-08	1.72E-08	-
35	6.44E-06	1.92E-06	6.53E-07	3.85E-07	2.81E-07	2.28E-07	1.12E-07	9.20E-08	2.54E-08	-
40	6.46E-06	1.93E-06	6.58E-07	3.89E-07	2.85E-07	2.32E-07	1.16E-07	9.87E-08	3.04E-08	1.42E-08
45	6.48E-06	1.94E-06	6.62E-07	3.92E-07	2.87E-07	2.35E-07	1.18E-07	1.03E-07	3.36E-08	1.99E-08
50	6.48E-06	1.94E-06	6.64E-07	3.94E-07	2.89E-07	2.36E-07	1.20E-07	1.06E-07	3.57E-08	2.31E-08
55	6.49E-06	1.95E-06	6.65E-07	3.95E-07	2.90E-07	2.37E-07	1.21E-07	1.08E-07	3.71E-08	2.50E-08
60	6.49E-06	1.95E-06	6.67E-07	3.96E-07	2.91E-07	2.38E-07	1.22E-07	1.10E-07	3.80E-08	2.62E-08
65	6.50E-06	1.95E-06	6.67E-07	3.96E-07	2.91E-07	2.39E-07	1.22E-07	1.11E-07	3.87E-08	2.70E-08
70	6.50E-06	1.95E-06	6.68E-07	3.97E-07	2.91E-07	2.39E-07	1.23E-07	1.12E-07	3.91E-08	2.76E-08
75	6.50E-06	1.95E-06	6.68E-07	3.97E-07	2.92E-07	2.39E-07	1.23E-07	1.12E-07	3.94E-08	2.79E-08

Накопленная доза от ^{90}Sr на Т-лимфоциты и их предшественники (DC_L) для женщин различного возраста, Гр/Бк
 Таблица 3
 Accumulated ^{90}Sr dose to T-lymphocytes and their progenitors (DC_L) for women of different age, Gy/Bq
 [Table 3]

Возраст забора крови age_s , годы [Age at blood sampling (age_s), years]	Возраст (age_i) на момент поступления 1 Бк ^{90}Sr , годы [Age (age_i) at ingestion of 1 Bq ^{90}Sr , years]									
	0	1	2	3	4	5	10	15	25	35
5	5.20E-06	1.27E-06	3.27E-07	1.38E-07	6.39E-08	-	-	-	-	-
10	5.81E-06	1.59E-06	4.85E-07	2.57E-07	1.66E-07	1.17E-07	-	-	-	-
15	6.10E-06	1.74E-06	5.63E-07	3.16E-07	2.18E-07	1.68E-07	5.77E-08	-	-	-
20	6.27E-06	1.83E-06	6.07E-07	3.50E-07	2.49E-07	1.98E-07	8.83E-08	6.11E-08	-	-
25	6.36E-06	1.88E-06	6.32E-07	3.70E-07	2.67E-07	2.16E-07	1.07E-07	9.69E-08	-	-
30	6.42E-06	1.91E-06	6.47E-07	3.81E-07	2.78E-07	2.26E-07	1.19E-07	1.21E-07	2.19E-08	-
35	6.45E-06	1.93E-06	6.56E-07	3.88E-07	2.84E-07	2.33E-07	1.27E-07	1.37E-07	3.23E-08	-
40	6.47E-06	1.94E-06	6.62E-07	3.93E-07	2.88E-07	2.37E-07	1.32E-07	1.48E-07	3.88E-08	1.81E-08
45	6.49E-06	1.94E-06	6.66E-07	3.96E-07	2.91E-07	2.39E-07	1.35E-07	1.56E-07	4.30E-08	2.53E-08
50	6.50E-06	1.95E-06	6.68E-07	3.98E-07	2.93E-07	2.41E-07	1.37E-07	1.61E-07	4.57E-08	2.92E-08
55	6.50E-06	1.95E-06	6.70E-07	3.99E-07	2.94E-07	2.42E-07	1.39E-07	1.64E-07	4.74E-08	3.13E-08
60	6.51E-06	1.95E-06	6.71E-07	4.00E-07	2.95E-07	2.43E-07	1.40E-07	1.67E-07	4.86E-08	3.27E-08
65	6.51E-06	1.96E-06	6.72E-07	4.00E-07	2.95E-07	2.44E-07	1.41E-07	1.68E-07	4.94E-08	3.35E-08
70	6.51E-06	1.96E-06	6.72E-07	4.01E-07	2.96E-07	2.44E-07	1.41E-07	1.70E-07	4.99E-08	3.41E-08
75	6.51E-06	1.96E-06	6.72E-07	4.01E-07	2.96E-07	2.44E-07	1.41E-07	1.70E-07	5.03E-08	3.45E-08

Накопленная доза от ^{89}Sr на Т-лимфоциты и их предшественники (DC_L) для мужчин различного возраста, Гр/Бк

Таблица 4

[Table 4]

Accumulated ^{89}Sr dose to T-lymphocytes and their progenitors (DC_L) for men of different age, Gy/Bq]

Возраст забора крови age_s , годы [Age at blood sampling (age_s), years]	Возраст age_i , на момент поступления 1 Бк ^{89}Sr , годы [Age (age_i) at ingestion of 1 Bq ^{90}Sr , years]									
	0	1	2	3	4	5	10	15	25	35
5	4.59E-07	1.15E-07	2.88E-08	1.36E-08	7.76E-09	-	-	-	-	-
10	4.56E-07	1.20E-07	3.30E-08	1.74E-08	1.17E-08	8.62E-09	-	-	-	-
15	4.55E-07	1.22E-07	3.47E-08	1.90E-08	1.33E-08	1.03E-08	3.05E-09	-	-	-
20	4.55E-07	1.24E-07	3.57E-08	1.99E-08	1.43E-08	1.13E-08	3.79E-09	2.52E-09	-	-
25	4.55E-07	1.24E-07	3.62E-08	2.04E-08	1.48E-08	1.18E-08	4.20E-09	3.11E-09	-	-
30	4.54E-07	1.25E-07	3.65E-08	2.07E-08	1.51E-08	1.21E-08	4.44E-09	3.44E-09	9.16E-10	-
35	4.54E-07	1.25E-07	3.67E-08	2.09E-08	1.52E-08	1.23E-08	4.58E-09	3.65E-09	1.05E-09	-
40	4.54E-07	1.25E-07	3.68E-08	2.10E-08	1.54E-08	1.24E-08	4.67E-09	3.78E-09	1.13E-09	7.49E-10
45	4.54E-07	1.25E-07	3.69E-08	2.11E-08	1.54E-08	1.25E-08	4.73E-09	3.86E-09	1.19E-09	8.09E-10
50	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.11E-08	1.55E-08	1.26E-08	4.77E-09	3.91E-09	1.22E-09	8.48E-10
55	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.11E-08	1.55E-08	1.26E-08	4.79E-09	3.95E-09	1.24E-09	8.74E-10
60	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.26E-08	4.81E-09	3.97E-09	1.26E-09	8.91E-10
65	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.26E-08	4.82E-09	3.99E-09	1.27E-09	9.02E-10
70	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.26E-08	4.83E-09	4.00E-09	1.28E-09	9.10E-10
75	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.27E-08	4.83E-09	4.00E-09	1.28E-09	9.15E-10

Накопленная доза от ^{89}Sr на Т-лимфоциты и их предшественники (DC_L) для женщин различного возраста, Гр/Бк

Таблица 5

[Table 5]

Accumulated ^{89}Sr dose to T-lymphocytes and their progenitors (DC_L) for women of different age, Gy/Bq]

Возраст забора крови age_s , годы [Age at blood sampling (age_s), years]	Возраст age_i , на момент поступления 1 Бк ^{89}Sr , годы [Age (age_i) at ingestion of 1 Bq ^{90}Sr , years]									
	0	1	2	3	4	5	10	15	25	35
5	4.59E-07	1.15E-07	2.88E-08	1.36E-08	7.76E-09	-	-	-	-	-
10	4.56E-07	1.20E-07	3.30E-08	1.74E-08	1.17E-08	8.62E-09	-	-	-	-
15	4.55E-07	1.22E-07	3.47E-08	1.90E-08	1.33E-08	1.03E-08	3.70E-09	-	-	-
20	4.55E-07	1.24E-07	3.57E-08	1.99E-08	1.43E-08	1.13E-08	4.63E-09	3.08E-09	-	-
25	4.55E-07	1.24E-07	3.62E-08	2.04E-08	1.48E-08	1.18E-08	5.15E-09	3.82E-09	-	-
30	4.54E-07	1.25E-07	3.65E-08	2.07E-08	1.51E-08	1.21E-08	5.45E-09	4.25E-09	1.13E-09	-
35	4.54E-07	1.25E-07	3.67E-08	2.09E-08	1.52E-08	1.23E-08	5.63E-09	4.50E-09	1.30E-09	-
40	4.54E-07	1.25E-07	3.68E-08	2.10E-08	1.54E-08	1.24E-08	5.74E-09	4.67E-09	1.41E-09	9.23E-10
45	4.54E-07	1.25E-07	3.69E-08	2.11E-08	1.54E-08	1.25E-08	5.82E-09	4.77E-09	1.48E-09	9.99E-10
50	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.11E-08	1.55E-08	1.26E-08	5.86E-09	4.84E-09	1.52E-09	1.05E-09
55	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.11E-08	1.55E-08	1.26E-08	5.90E-09	4.88E-09	1.55E-09	1.08E-09
60	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.26E-08	5.92E-09	4.91E-09	1.57E-09	1.10E-09
65	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.26E-08	5.93E-09	4.93E-09	1.58E-09	1.12E-09
70	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.26E-08	5.94E-09	4.95E-09	1.59E-09	1.13E-09
75	4.54E-07	1.25E-07	3.70E-08	2.12E-08	1.55E-08	1.27E-08	5.95E-09	4.95E-09	1.60E-09	1.13E-09

данных. Таким образом, рассчитанные нами значения DC_L следует рассматривать как приблизительные, однако они позволяют сопоставить дозы от изотопов стронция, накопленные в лимфоидных органах и Т-лимфоцитах.

Для примера на рисунке показано сопоставление доз от единичного поступления ^{90}Sr , накопленных к возрасту

60 лет (age_s) в лимфоидных органах и Т-лимфоцитах. Сопоставление сделано для различных возрастов на момент поступления радионуклида age_i . Рисунок хорошо иллюстрирует неравномерность воздействия ^{90}Sr на организм, различия между дозовыми коэффициентами для ККМ и других лимфоидных тканей составляют около

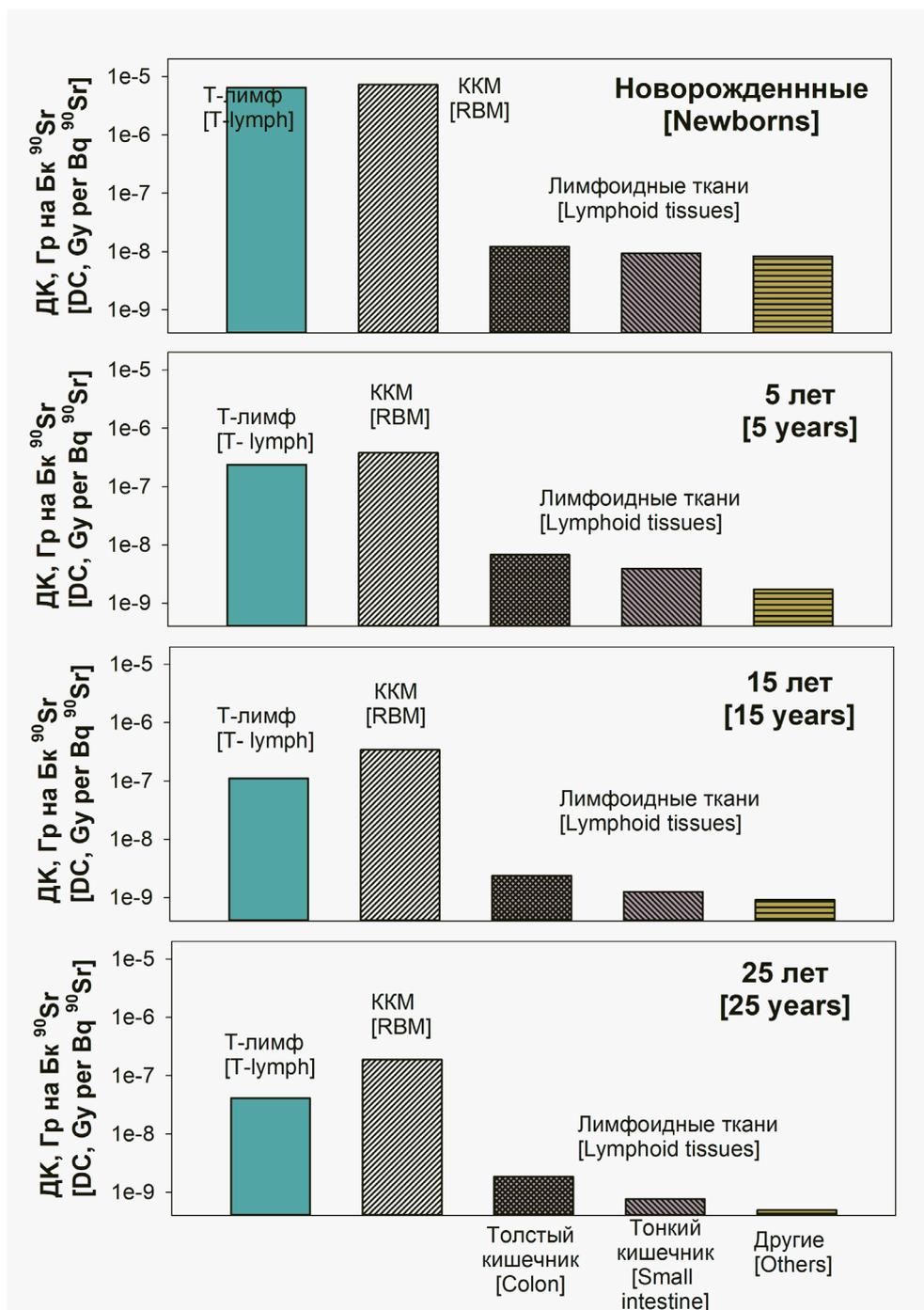


Рис. Сопоставление доз от единичного поступления ^{90}Sr , накопленных к возрасту 60 лет (age_2) в Т-лимфоцитах, красном костном мозге (ККМ), лимфоидных тканях толстого и тонкого кишечника и других лимфоидных внескелетных тканях для следующих возрастов на момент поступления ^{90}Sr (age_1): новорожденные, 5, 15, 25 лет

[Fig.] Comparison of doses from a single intake of ^{90}Sr accumulated by the age of 60 (age_2) in T-lymphocytes, red bone marrow (RBM), lymphoid tissues of the colon and small intestine, and other lymphoid extra-skeletal tissues for the following age at the time of ^{90}Sr intake (age_1): newborns, 5, 15, 25 years]

3 порядков величины. Как следует из рисунка, дозы на Т-лимфоциты во всех случаях ниже, чем дозы на ККМ, но выше, чем дозы на лимфоидные ткани кишечника и другие ткани. С увеличением age_1 различия между дозами на ККМ и Т-лимфоциты увеличиваются.

В продолжении нашей работы мы планируем решить задачу, которая имеет важное практическое значение для

биодозиметрии: создать алгоритм и определить численные значения переходных коэффициентов, позволяющих оценить дозу на ККМ непосредственно по частоте транслокаций в Т-лимфоцитах периферической крови в зависимости от возраста донора при внутреннем облучении ^{90}Sr . Следует отметить, что алгоритмы расчета дозы на ККМ по частоте хромосомных aberrаций в Т-лимфоцитах

при неравномерном облучении человека разработаны только для нестабильных хромосомных aberrаций (дигцентрики, кольца), частоту которых необходимо оценить в короткий период после радиационного воздействия [1].

Выводы

1. Впервые были определены дозовые коэффициенты, позволяющие перейти от перорального поступления $^{89,90}\text{Sr}$ к дозе на циркулирующие Т-лимфоциты; эти радионуклиды могут вносить существенный вклад в аварийное радиоактивное загрязнение и приводят к неравномерному внутреннему облучению человека.

2. Дозы на циркулирующие Т-лимфоциты оказываются ниже, чем дозы на ККМ от этих радионуклидов, но существенно выше, чем дозы на другие лимфоидные ткани. Эти дозы впервые учитывают облучение Т-прогениторов в ККМ.

Личный вклад авторов

Толстых Е.И. – написание статьи, дизайн исследований; Дегтева М.О. – разработка концепции, редактирование статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.А. Кривошапову за техническую помощь в работе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники финансирования

Работа была выполнена при финансовой поддержке ФМБА России, номер государственного учёта НИР в ЕГИСУ 122040400135-0.

Литература

- МАГАТЭ. Использование цитогенетической дозиметрии для обеспечения готовности и реагирования при радиационных аварийных ситуациях. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/EPR_Biodosimetry2011R_web.pdf (Дата обращения: 17.05.2022).
- Giussani A., Lopez M.A., Romm H., et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications // *Radiation Environmental Biophysics*. 2020. Vol. 59., No 3. P. 357-387. DOI: 10.1007/s00411-020-00845-y.
- Толстых Е.И., Дегтева М.О., Аклеев А.В. Оценка доз облучения лимфоцитов при пероральном поступлении радионуклидов различной тропности. // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 3. С. 18-28. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-18-28>.
- Mayer A., Balasubramanian V., Mora T., Walczak A.M. How a well-adapted immune system is organized // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2015. V.112. № 19. P. 5950-5955. DOI:10.1073/pnas.1421827112.
- Britanova O.V., Shugay M., Merzlyak E.M., et al. Dynamics of individual T cell repertoires: from cord blood to centenarians // *Journal of Immunology*. 2016. Vol. 196, No 12. P. 5005–5013. DOI: 10.4049/jimmunol.1600005.
- Naumova E.N., Gorski J., Naumo Y.N. Simulation studies for a multistage dynamic process of immune memory response to influenza: experiment in silico // *Annales Zoologici Fennici*. 2008. Vol. 45. P. 369–384. DOI: 10.5735/086.045.0502.
- Yoshida K., Cologne J.B., Cordova K., et al. Aging-related changes in human T-cell repertoire over 20 years delineated by deep sequencing of peripheral T-cell receptors // *Experimental Gerontology*. 2017. Vol. 1, No 96. P. 29–37. DOI: 10.1016/j.exger.2017.05.015.
- Толстых Е.И., Возилова А.В., Дёгтева М.О., и др. Концепция Т-клеточного рода как основа для анализа результатов цитогенетических исследований при локальном облучении костного мозга // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60, № 1. С. 12-25. DOI: 10.31857/S0869803120010142.
- Tolstykh E.I., Degteva M.O., Vozilova A.V., et al. Local bone-marrow exposure: how to interpret the data on stable chromosome aberrations in circulating lymphocytes? (some comments on the use of FISH method for dose reconstruction for Techa riverside Residents) // *Radiation Environmental Biophysics*. 2017. Vol. 56, No 4. P. 389-403. DOI: 10.1007/s00411-017-0712-7.
- Tolstykh E.I., Degteva M.O., Vozilova A.V., et al. Interpretation of FISH results in the case of nonuniform internal radiation exposure of human body with the use of model approach // *Russian Journal of Genetics*. 2019. Vol. 55, No 10. P.1227–1233. <https://doi.org/10.1134/S1022795419100132>.
- Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И., и др. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949–1956 гг. // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, № 5. С. 523–534. DOI: 10.7868/S0869803116050039.
- Дёгтева М.О., Толстых Е.И., Суслова Г.К., и др. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 3. С. 30-39. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-30-39>.
- Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O., et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, No 1. P. 87-127. DOI: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
- Дёгтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., и др. Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 2. С. 66-75. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
- Shishkina E.A., Timofeev Y.S., Volchkova A.Y., et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry // *Health Physics*. 2020. Vol. 118, No 1. P. 53-59. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127. PMID: 31764420.
- ICRP. Human alimentary tract model for radiological protection. Publication 100. A report of The International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP. 2006. Vol. 36, No 1-2. P. 25-327, iii. DOI: 10.1016/j.icrp.2006.03.004. PMID: 17188183.
- Bains I. Mathematical Modelling of T Cell Homeostasis. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University College London, 2010. URL: <http://discovery.ucl.ac.uk/20159/1/20159.pdf> (Дата обращения: 23.07.2021).
- Bains I., Yates A.J., and Callard R.E., Heterogeneity in thymic emigrants: implications for thymectomy and immunosenescence // *PLoS One*. 2013. Vol. 8, No 2. P. e49554. DOI: 10.1371/journal.pone.0049554.
- Westermann J., Pabst R. Distribution of lymphocyte subsets and natural killer cells in the human body // *Journal of Clinical Investigation*. 1992. Vol. 70, No 7. P. 539-44. DOI: 10.1007/BF00184787.
- Blum K.S., Pabst R. Lymphocyte numbers and subsets in the human blood. Do they mirror the situation in all organs? // *Immunology Letters*. 2007. Vol. 108, No 1. P. 45-51. DOI: 10.1016/j.imlet.2006.10.009.
- Kumar B.V., Connors T.J., Farber D.L. Human T. Cell Development, Localization, and Function throughout Life // *Immunity*. 2018. Vol. 48, No. 2. P. 202-213. DOI: 10.1016/j.immuni.2018.01.007.

Поступила: 23.05.2022 г.

Приложение

Численные значения ρ_{TG} и P_{TG} в относительных единицах для различных возрастов

Таблица А

[Appendix

Table A

Numerical values ρ_{TG} and P_{TG} in relative units for different ages]

Возраст age, год	ρ_{TG}	P_{TG}	Возраст age, год	ρ_{TG}	P_{TG}
0	0.75	0.75	35	0.077315	12.01048
1	0.94233	1.69233	36	0.071371	12.08185
2	0.835771	2.528101	37	0.065884	12.14773
3	0.741263	3.269364	38	0.060818	12.20855
4	0.657441	3.926805	39	0.056142	12.26469
5	0.583098	4.509903	40	0.051826	12.31652
6	0.517162	5.027065	41	0.047841	12.36436
7	0.458681	5.485746	42	0.044163	12.40853
8	0.42318	5.908926	43	0.040768	12.44929
9	0.406587	6.315512	44	0.037633	12.48693
10	0.390644	6.706157	45	0.03474	12.52167
11	0.375327	7.081484	46	0.032069	12.55373
12	0.36061	7.442094	47	0.029603	12.58334
13	0.34647	7.788564	48	0.027327	12.61066
14	0.332885	8.12145	49	0.025226	12.63589
15	0.319833	8.441282	50	0.023287	12.65918
16	0.307292	8.748574	51	0.021496	12.68067
17	0.295243	9.043817	52	0.019844	12.70052
18	0.283666	9.327483	53	0.018318	12.71884
19	0.272543	9.600026	54	0.01691	12.73575
20	0.256695	9.856721	55	0.01561	12.75136
21	0.23696	10.09368	56	0.01441	12.76577
22	0.218741	10.31242	57	0.013302	12.77907
23	0.201924	10.51435	58	0.012279	12.79135
24	0.186399	10.70074	59	0.011335	12.80268
25	0.172068	10.87281	60	0.010463	12.81314
26	0.158839	11.03165	61	0.009659	12.8228
27	0.146627	11.17828	62	0.008916	12.83172
28	0.135353	11.31363	63	0.008231	12.83995
29	0.124947	11.43858	64	0.007598	12.84755
30	0.115341	11.55392	65	0.007014	12.85456
31	0.106473	11.66039	66	0.006475	12.86104
32	0.098287	11.75868	67	0.005977	12.86701
33	0.09073	11.84941	68	0.005517	12.87253
34	0.083754	11.93316	69	0.005093	12.87762

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, Россия, Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А; E-mail: evgenia@urcrm.ru

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

Для цитирования: Толстых Е.И., Дегтева М.О. Оценка доз облучения лимфоцитов и их предшественников при пероральном поступлении стронция-89,90 // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 82-91. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-82-91

Estimation of radiation doses on lymphocytes and their progenitors after ingestion of strontium-89,90

Evgenia I. Tolstykh, Marina O. Degteva

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

In radiobiology circulating T-lymphocytes are used as “natural biosimeters” since the frequency of chromosomal aberrations that occur in them after radiation exposure is proportional to the accumulated dose. In addition, stable chromosomal aberrations (translocations) are detected in them years and decades after radiation exposure. Estimation of doses to circulating lymphocytes requires consideration of two dose components: the dose accumulated by the lymphocyte precursors (progenitors) in the red bone marrow; and dose accumulated by the lymphocytes in the lymphoid organs/tissues during circulation. A recently created model of T-lymphocyte exposure takes into account all these dose components, as well as the age-dependent dynamics of T-lymphocytes. The use of a model approach is especially important in assessing doses from osteotropic beta emitters ($^{89,90}\text{Sr}$). They accumulate in the bone and locally expose predominately bone marrow. The dose to other lymphoid organs and tissues is much lower. The objective of this study is to evaluate the conversion factors from ingested $^{89,90}\text{Sr}$ to the cumulative dose to circulating T-lymphocytes and their progenitors (DC_L). For calculations, the previously developed model of T-lymphocyte exposure and new dose coefficients for the red bone marrow, estimated on the basis of a sex-and-age-dependent biokinetic model and a new dosimetric model of the human skeleton were used. As a result, the DC_L values were evaluated for the first time. The age at the time of $^{89,90}\text{Sr}$ intake varied from a newborn to 35 years, the age of T-lymphocyte examination (blood sampling age) was up to 75 years. The maximum values of DC_L for both ^{90}Sr and ^{89}Sr were typical of children in the first years of life. It has been shown that doses to circulating T-lymphocytes from these radionuclides are lower than those to bone marrow, but are significantly higher than doses to other lymphoid tissues. The effect of sex on DC_L is manifested for children 10 years of age and older. The area of DC_L application covers the population of radioactively contaminated territories (the Urals region, the zone of the Chernobyl accident), as well as personnel of the nuclear industry enterprises.

Key words: T-lymphocytes, dose coefficients, $^{89,90}\text{Sr}$, internal exposure; biodosimetry.

Authors' personal contribution

Tolstykh E.I. – article writing, research design; Degteva M.O. – concept development, article editing.

Acknowledgment

The authors are grateful to V.A. Krivoshchapov for technical assistance in the work.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Financial support

The work was carried out with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia,

Evgenia I. Tolstykh

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: evgenia@urcrm.ru

state registration number of research work in EGISU 122040400135-0].

References

1. IAEA Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies (EPR-Biodosimetry-2011). International Atomic Energy Agency, Department of Nuclear Safety and Security, Incident and Emergency Centre, Vienna (Austria) (2011). Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/025/43025992.pdf?r=1 (Accessed 19 May 2022).
2. Giussani A, Lopez MA, Romm H, et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications. *Radiation Environmental Biophysics*. 2020; 59(3):357-387. DOI: 10.1007/s00411-020-00845-y.
3. Tolstykh EI, Degteva MO, Akleyev AV. Estimation of lymphocyte radiation doses after the ingestion of radionuclides of different tropicity. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 18-28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-18-28.
4. Mayer A, Balasubramanian V, Mora T, Walczak AM. How a well-adapted immune system is organized. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2015;112(19): 5950-5955. DOI:10.1073/pnas.1421827112.
5. Britanova OV, Shugay M, Merzlyak EM, et al. Dynamics of individual T cell repertoires: from cord blood to centenarians. *Journal of Immunology*. 2016;196(12): 5005-5013. DOI:10.4049/jimmunol.1600005.
6. Naumova EN, Gorski J, Naumov YN. Simulation studies for a multistage dynamic process of immune memory response to influenza: experiment in silico. *Annales Zoologici Fennici*. 2008;45: 369-384. DOI: 10.5735/086.045.0502.
7. Yoshida K, Cologne JB, Cordova K, et al. Aging-related changes in human T-cell repertoire over 20 years delineated by deep sequencing of peripheral T-cell receptors. *Experimental Gerontology*. 2017;1(96): 29-37. DOI:10.1016/j.exger.2017.05.015.
8. Tolstykh EI, Vozilova AV, Degteva MO, Akleyev AV. Concept of T-Cell Genus as the Basis for the Analysis of Fish Results after Local Bone Marrow Exposure. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2020;60(1): 12-25. (In Russian). DOI: 10.31857/S0869803120010142.
9. Tolstykh EI, Degteva MO, Vozilova AV, et al. Local bone-marrow exposure: how to interpret the data on stable chromosome aberrations in circulating lymphocytes? (some comments on the use of FISH method for dose reconstruction for Techa riverside Residents). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017;56(4): 389-403. DOI: 10.1007/s00411-017-0712-7.
10. Tolstykh EI, Degteva MO, Vozilova AV, et al. Interpretation of FISH results in the case of nonuniform internal radiation exposure of human body with the use of model approach. *Russian Journal of Genetics*. 2019;55(10): 1227-1233. <https://doi.org/10.1134/S1022795419100132>.
11. Degteva MO, Shagina NB, Vorobyeva MI, et al. Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Techa River in 1949-1956. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2016;56(5): 523-534. (In English, In Russian). DOI: 10.7868/S0869803116050039.
12. 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. *Radiatsionnaya gygiena=Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 30-39. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-30-39>.
13. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(1): 87-127. DOI: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
14. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smith MA, Napier BA. Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2):66-75. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
15. Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AY, et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry. *Health Physics*. 2020;118(1): 53-59. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127. PMID: 31764420.
16. ICRP, Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. A report of The International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP. 2006;36(1-2):25-327, iii. DOI: 10.1016/j.icrp.2006.03.004. PMID: 17188183.
17. Bains I. Mathematical Modelling of T Cell Homeostasis. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University College London, 2010. Available from: <http://discovery.ucl.ac.uk/20159/1/20159.pdf> (Accessed 23 Jul 2021).
18. Bains I, Yates AJ, Callard RE. Heterogeneity in thymic emigrants: implications for thymectomy and immunosenescence. *PLoS One*. 2013;8(2): e49554. doi 10.1371/journal.pone.0049554.
19. Westermann J, Pabst R. Distribution of lymphocyte subsets and natural killer cells in the human body. *Journal of Clinical Investigation*. 1992;70(7): 539-44. DOI: 10.1007/BF00184787.
20. Blum KS, Pabst R. Lymphocyte numbers and subsets in the human blood. Do they mirror the situation in all organs? *Immunology Letters*. 2007;108(1): 45-51. DOI: 10.1016/j.imlet.2006.10.009.
21. Kumar BV, Connors TJ, Farber DL. Human T. Cell Development, Localization, and Function throughout Life. *Immunity*. 2018;48(2): 202-213. DOI: 10.1016/j.immuni.2018.01.007.

Received: May 23, 2022

For correspondence: Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of biophysical laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: evgenia@urcrm.ru)

Marina O. Degteva – Candidate of Technical Sciences, Head, biophysical laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

For citation: Tolstykh E.I., Degteva M.O. Estimation of radiation doses on lymphocytes and their progenitors after ingestion of strontium-89,90. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 82-91. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-82-91