

Анализ эффективности мероприятий по снижению доз облучения населения от техногенных и природных источников на примере села Муслюмово, река Теча

М.В. Жуковский¹, И.В. Ярошенко¹, Г.П. Малиновский¹, Е.И. Толстых²

¹Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия

Цель исследования: провести анализ эффективности мероприятий по снижению доз облучения населения, проживающего на территориях, подвергшихся аварийному радиоактивному загрязнению, на основе расчета и сравнения полученных и предотвращенных доз облучения за счет техногенных и природных источников. Материалы и методы: эффективные дозы за счет радиоактивного загрязнения реки Теча в селе Муслюмово рассчитаны с использованием данных о поступлении радионуклидов в организм и коэффициентов, рекомендованных МКРЗ. Облучение радоном оценивалось по результатам радоновых обследований в 1992 г. в Муслюмово и в 2015 г. в Новом Муслюмово. Результаты: суммарная эффективная доза, обусловленная загрязнением реки Теча, накопленная за 1950–2000 гг., составила 144 мЗв. Годовые эффективные дозы облучения от радона в Муслюмово и Новом Муслюмово составляют 9,2 и 5,1 мЗв соответственно. Общая эффективная доза, накопленная к 2000 г. от двух источников, составила 0,7 Зв (вклад радона – 77%). Предотвращенная к 2015 г. в результате переселения в 2007 г. доза составляет 38 мЗв. Снижение в основном достигнуто за счет меньшей объемной активности радона в зданиях. Заключение: максимальное сокращение дозы облучения населения с. Муслюмово могло быть осуществлено в случае своевременного переселения на незагрязненную территорию и применения превентивных радонозащитных мероприятий.

Ключевые слова: Теча, радиоактивное загрязнение, радон, переселение, предотвращенная доза.

Введение

В период 1949–1956 гг. в результате деятельности производственного объединения (ПО) «Маяк» (первого советского предприятия по производству оружейного плутония) радиоактивные отходы производства попали в реку Теча, что привело к загрязнению воды, донных отложений и поймы [1, 2]. На загрязненной территории поймы реки находилось более 40 населенных пунктов, в которых проживало более 20 000 человек [1]. Радиоактивные сбросы содержали ряд продуктов деления, включая короткоживущие (⁸⁹Sr, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru + ¹⁰⁶Rh и ¹⁴⁴Ce + ¹⁴⁴Pr) и долгоживущие (⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs) радионуклиды. Вклад других радионуклидов составлял менее 10% (⁹¹Y, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁴¹Ce и др.) [2]. Основные сбросы в реку пришли на период с сентября 1950 г. по октябрь 1951 г. [2, 3].

Сброс технологических отходов в открытую речную систему был прекращен в конце 1951 г. Однако несколько последующих лет продолжались сбросы малоактивных нетехнологических отходов и поступление радиоактивности из загрязненных верховий. Полностью пути поступления радиоактивного загрязнения были перекрыты после поэтапного сооружения системы плотин, водоемов

и обводных каналов в 1952–1965 гг. Прекращение сброса и строительство гидротехнической системы привели к снижению содержания радионуклидов в воде и мощности дозы гамма-облучения в пойме реки Теча за счет распада короткоживущих гамма-излучающих радионуклидов.

Для снижения облучения населения в первые годы после загрязнения было введено ограничение на использование речной воды для питья и других хозяйственных нужд. Одновременно осуществлялось строительство новых водопроводных сетей и бурение артезианских скважин. На территории населенных пунктов доступ к реке был ограничен заграждениями из колючей проволоки. За пределами деревень по берегу реки высаживались плотные лесные насаждения. В период 1955–1960 гг. жители 26 населенных пунктов (более половины из них расположены на реке Теча) были эвакуированы.

В целом, мероприятия, направленные на снижение облучения населения, включали:

- прекращение сбросов радиоактивных отходов;
- запрет на использование воды из реки;
- снабжение пострадавших населенных пунктов чистой водой;

Жуковский Михаил Владимирович

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук.

Адрес для переписки: 620219, Россия, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; e-mail: michael@ecko.uran.ru

- строительство плотин, системы технологических водоемов и обводных каналов для предотвращения поступления радиоактивных веществ в реку Теча;
- отселение.

Село Муслюмово с населением около 2000 чел. [1], располагавшееся в 78 км от источника сбросов, оказалась ближайшим к ПО «Маяк» неотселенным пунктом. В то же время загрязнение донных отложений и поймы реки долгоживущими радионуклидами было значительным, и дозы облучения населения при проживании в прибрежной зоне превышали фоновые. Решение об отселении было принято с учетом экологических и социальных факторов в 2006 г. Для строительства нового села была выбрана площадка на большем удалении от реки (рис. 1). Переселение жителей в новый населенный пункт было предпринято в 2007–2012 гг.

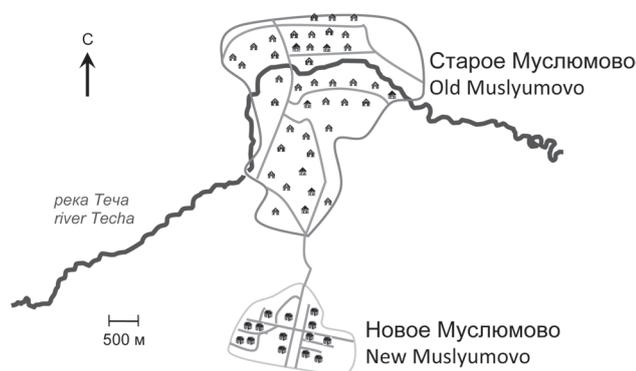


Рис. 1. Схема расположения старого и нового Муслюмово относительно реки Теча

[Fig. 1. The layout of the old and new Muslyumovo in relation to the river Techa]

Наряду с облучением, обусловленным радиоактивным загрязнением среды, человек подвергается воздействию природных источников ионизирующего облучения, в первую очередь – радона и его дочерних продуктов [4]. Поступление радона, инертного радиоактивного газа, в воздух жилых помещений – один из наиболее существенных факторов облучения человека. Источником радона (^{222}Rn) является радий (^{226}Ra), содержащийся в грунте под зданием и в строительных материалах. Опасность радона как фактора облучения связана с образованием короткоживущих дочерних продуктов, которые присоединяются к аэрозолям и после вдыхания оседают в легких. Облучение радоном в помещениях зданий вносит основной вклад в природную составляющую облучения населения. Так, согласно современным данным, объемная активность (ОА) радона $100 \text{ Бк}/\text{м}^3$ приводит к увеличению риска рака легкого на 16% [5].

Анализ эффективности мероприятий по снижению доз облучения населения при радиационных авариях требует сопоставления воздействия на человека различных по биологической эффективности источников при неравномерном облучении органов и тканей. Такой анализ можно провести на основе сравнения ущербов. Поэтому в настоящей работе рассчитываются и сравниваются эффективные дозы, несмотря на то, что эту величину не рекомендуется использовать для эпидемиологических оценок и расчета индивидуального риска. Эффективная

доза оценивается на основании справочных показателей и используется для планирования и оптимизации защиты, подтверждения соблюдения пределов дозы или сравнения с референтными уровнями [6].

Цель исследования – провести анализ эффективности мероприятий по снижению доз облучения населения, проживающего на территориях, подвергшихся аварийному радиоактивному загрязнению, на основе расчета и сравнения полученных и предотвращенных доз облучения за счет техногенных и природных источников.

Материалы и методы

Эффективные дозы облучения для репрезентативного среднего взрослого человека, проживающего в Муслюмово (возраст 20 лет в 1950 г.), рассчитаны специалистами УНПЦ РМ, с учетом внешних и внутренних источников облучения. Дозы внешнего облучения рассчитывались с использованием дозиметрической системы реки Теча [7]. Дозы внутреннего облучения оценивались на основе референтных функций поступления радионуклидов [8, 9] и дозовых коэффициентов, представленных в 72-й публикации МКРЗ [10]. Современные дозы облучения населения пос. Муслюмово, ж. д. станция, в состав которого административно входит Новое Муслюмово, приведены в Комплексном докладе о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2015 г. [11].

Для анализа облучения радоном были использованы результаты двух радоновых обследований. Радоновое обследование в старом Муслюмово было проведено в 1992 г. сотрудниками Санкт-Петербургского института радиационной гигиены под руководством Э.М. Крисюка – одного из инициаторов радоновых исследований в нашей стране. Обследование выполнялось в рамках Государственной программы Российской Федерации по радиационной реабилитации Уральского региона и мерах по оказанию помощи пострадавшему населению на период до 1995 г. по заданию Института промышленной экологии УрО РАН [12]. Результаты исследования 1992 г. в форме отчета хранятся в архиве ИПЭ УрО РАН. Радоновое обследование в Новом Муслюмово было проведено в 2015 г. сотрудниками радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН [13] в рамках ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 и на период до 2015 года». В целом, методика обследования в обоих случаях была сходной. Для измерения использовались твердотельные трековые детекторы, чувствительные к альфа-излучению, помещенные в диффузионные камеры [14, 15]. Радиометры радона в обоих исследованиях экспонировались в атмосфере помещений в течение 2–3 месяцев. Для проведения измерений выбирались дома, равномерно распределенные по территории населенных пунктов и представляющие все основные типы зданий.

Результаты двух радоновых обследований представлены в таблице 1. Таблица содержит среднее арифметическое (СА) и среднее геометрическое (СГ) значения ОА радона, стандартное отклонение натурального логарифма ОА радона (σ_{LN}), а также оценку доли жилищ, в которых ОА радона превышает $400 \text{ Бк}/\text{м}^3$, что соответствует предельно допустимому значению эквивалентной равновесной объемной активности $200 \text{ Бк}/\text{м}^3$.

Таблица 1

Основные результаты радоновых обследований

[Table 1

The main results of the radon surveys]

Населенный пункт [Settlement]	Год [Year]	N	СА, Бк/м ³ [Arithmetic mean, Bq/m ³]	СГ, Бк/м ³ [Geometric mean, Bq/m ³]	σ_{LN}	% >400 Бк/м ³ [%>400 Bq/m ³]
Муслюмово [Muslyumovo]	1992	104	290	190	1,05	24%
Новое Муслюмово [New Muslyumovo]	2015	27	160	120	0,79	6%

Эффективные дозы, связанные с облучением радонном и дочерними продуктами, рассчитывались с использованием дозового коэффициента 9 (нЗв×м³)/(Бк×ч), представленного в отчете НКДАР ООН [16].

Результаты и обсуждение

Сравнение результатов радоновых обследований 1992 и 2015 г. показывает заметно более низкие значения средней ОА радона в новом населенном пункте. Высокие значения ОА радона в старом Муслюмово, по-видимому, связаны с более высоким геогенным радоновым потенциалом территории [13]. Старое Муслюмово расположено в зоне молодых аллювиальных отложений, в то время как Новое Муслюмово расположено на менее проницаемых геологических формациях. Необходимо отметить также различие в характеристиках зданий двух населенных пунктов. Старое Муслюмово было преимущественно застроено избами – бревенчатыми домами с печным отоплением и подполом. В Новом Муслюмово дома были построены с применением новых типовых проектов и строительных технологий. Дома преимущественно двухэтажные с пластиковыми стеклопакетами, газовым отоплением.

Накопленные эффективные дозы, обусловленные загрязнением реки Теча и облучением радонном в жилищах, представлены на рисунке 2. Согласно проведенным оценкам, суммарная эффективная доза, связанная с радиоактивным загрязнением, накопленная репрезентативным взрослым человеком за период 1950–2000 гг., составила 144 мЗв. Значительную часть аварийной дозы составляет внутреннее облучение в результате накопления ⁹⁰Sr в костной ткани. Около 80% эффективной дозы было получено к 1958 г. Радиационно-защитные меры, предпринятые после 1951 г. (в первую очередь – прекращение сбросов радиоактивных отходов), согласно нашим оценкам, позволили снизить годовую эффективную дозу в 34 раза к 1956 г. Позже двукратное снижение было достигнуто к 1965 г.

Годовые эффективные дозы за счет ингаляционного поступления радона и дочерних продуктов в н.п. Муслюмово и Новое Муслюмово составляют 9,2 и 5,1 мЗв соответственно. Накопленная эффективная доза для репрезентативного взрослого жителя Муслюмово составляет 460 мЗв к 2000 г. Общая эффективная доза от двух источников составила примерно 0,7 Зв. Вклад радона – примерно 77%, вклад загрязнения реки Теча – 23%.

Предотвращенные эффективные дозы оценивались для одного реализованного и трех гипотетических (несостоявшихся) сценариев облучения:

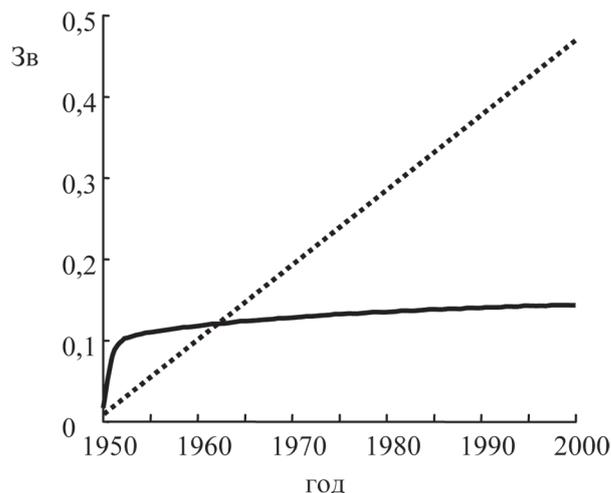


Рис. 2. Накопленные эффективные дозы облучения жителей Муслюмово за счет радиоактивного загрязнения реки Теча (сплошная линия) и радона (пунктирная линия), Зв [Fig. 2. The accumulated effective radiation dose to the residents of Muslyumovo due to radioactive contamination of the Tеча river (solid line) and radon (dashed line), Sv]

- состоявшееся переселение в Новое Муслюмово в 2007 г.;
- несостоявшаяся эвакуация в 1952 г.;
- несостоявшаяся эвакуация в 1960 г.

В качестве дополнительного гипотетического сценария рассмотрено переселение в здания с превентивной защитой от радона в 1952 г. В реальности такой сценарий не мог быть реализован в связи с тем, что на тот момент не имелось достаточно сведений о проблеме облучения человека радонном. В качестве допущения при расчетах предполагалось, что в радонозащищенных зданиях нового села ОА радона не превышала среднемировой уровень примерно 40 Бк/м³, что соответствует годовой эффективной дозе 1 мЗв.

Результаты оценок предотвращенных доз облучения к 2015 г. представлены в таблице 2. Общая доза, предотвращенная в результате переселения в 2007 г., составляет всего 38 мЗв.

Дозы облучения, связанные с загрязнением реки Теча, в основном, сформированы в первые пять лет, в то время как накопленная доза от облучения радонном равномерно возрастает и, начиная с середины 1960-х гг., превышает дозу от техногенного источника. К моменту состоявшегося переселения загрязнение реки Теча не создавало

Достиженные и возможные предотвращенные дозы, мЗв

Таблица 2

[Table 2]

Achieved and possible averted dose, mSv

Мероприятие по снижению дозы [Measures to reduce doses]	Источник облучения [Source of exposure]	
	Загрязнение р. Теча [Contamination of the Techa river]	Радон [Radon]
Переселение в 2007 г. (состоявшееся) [Resettlement in 2007 (held)]	<5*	33
Эвакуация в 1952 г. (не состоялась) [Evacuation in 1952 (not held)]	60	240
Эвакуация в 1960 г. (не состоялась) [Evacuation in 1960 (not held)]	34	210
Эвакуация в 1952 г. и переселение в здания с превентивной защитой от радона в 1952 г. (не состоялось) [Evacuation in 1952 and relocating to buildings with a preventive protection Rn in 1952 (not held)]	60	480

* Предполагалось, что годовая эффективная доза облучения в 2007–2015 гг. могла составлять не более 0,5 мЗв.

В 2015 г. в пос. Муслюмово, ж.д. станция, доза облучения составила примерно 0,2 мЗв [11].

[It was expected that the annual effective dose in 2007–2015, could be no more than 0.5 mSv. In 2015 in the village Muslyumovo the radiation dose was approximately 0.2mSv [11] (In Russ..)]

значимых доз облучения для жителей Муслюмово при соблюдении режима ограничения доступа к реке.

В Новом Муслюмово (реализованный сценарий) снижение средней дозы облучения на 4 мЗв было достигнуто за счет меньшей ОА радона. Эвакуация жителей Муслюмово в 1952 г. позволила бы снизить суммарную дозу на 40% также в большей степени за счет меньшего геогенного радонового потенциала на территории Нового Муслюмово.

Значительное снижение дозы облучения населения села Муслюмово могло быть достигнуто при выполнении двух условий: во-первых, срочная эвакуация в первый год после загрязнения реки, во-вторых, применение превентивных радонозащитных мероприятий, включающих выбор территории для переселения с наименьшим геогенным радоновым потенциалом и использование радонобезопасных технологий строительства. Переселение в дома, в которых дозы от облучения радонам составляют 1 мЗв в год, позволило бы снизить накопленные дозы облучения до менее чем 0,5 Зв.

Заключение

Облучение населения прибрежных сел реки Теча имеет сложную структуру, включающую дозы за счет техногенных и природных источников. Соотношение между источниками облучения меняется в пространстве и во времени. Цели радиационной безопасности могут быть достигнуты за счет оптимизации облучения от всех источников.

Максимальное сокращение дозы облучения населения с. Муслюмово могло быть осуществлено в случае своевременного переселения на незагрязненную территорию и применения превентивных радонозащитных мероприятий, включающих выбор территории с наименьшим геогенным радоновым потенциалом и использование радонобезопасных технологий строительства.

Литература

1. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / под ред. А.В. Клеева, М.Ф. Киселева. – М., 2001. – 532 с.

2. Дегтева, М.О. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949–1956 гг. / М.О. Дегтева [и др.] // Радиационная Биология. Радиэкология. – 2016. – Т. 56, № 5. – С. 523–534.

3. Shagina N.B., Vorobiova M.I., Degteva M.O. [et al.] 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(4), pp. 349-66. – Available from: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00411-012-0414-0> (дата обращения: 03.02.2017).

4. Ярмошенко, И.В. Обзор рекомендаций МАГАТЭ по защите от облучения радонам в жилищах / И.В. Ярмошенко, Г.П. Малиновский, А.В. Васильев, М.В. Жуковский // АНРИ. - № 4 (83), 2015. - С. 22-28.

5. Публикация 115 МКРЗ. Риск возникновения рака легкого при облучении радонам и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина. – М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2013. – 92 с. http://www.icrp.org/docs/P115_russian%20edition.pdf (дата обращения: 03.02.2017).

6. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / под общей ред. М.Ф.Киселева, Н.К.Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с. http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (дата обращения: 03.02.2017)

7. Degteva M.O., Vorobiova M.I., Tolstykh E.I. [et al.] Development of an improved dose reconstruction system for the Techa River population affected by the operation of the Mayak Production Association. Radiat. Res. 2006, 166, pp. 255-70.

8. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: strontium-90. Health Phys. 2011, 101(1), pp. 28-47.

9. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. Health Phys. 2013, 104(5), pp. 481-98.

10. ICRP, 1995. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26 (1).

11. Официальный сайт Министерства экологии Челябинской области. Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2015 году. <http://www.mipесо174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic/2015> (дата обращения 30.01.2017)
12. Чуканов, В.Н. Генезис и концепция Государственной программы Российской Федерации по радиационной реабилитации Уральского региона / В.Н. Чуканов [и др.]. – Екатеринбург, 1993. – 66 с.
13. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A. [et al.] Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Tеча River region. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 1298-303.
14. Маренный, А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом / А.М. Маренный // АНРИ. – 2012. – № 4. – С. 13–20.
15. Николаев, В.А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях / В.А. Николаев. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012. – 283 с.
16. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects Atomic Radiations), 2009. Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2006 report to the General Assembly, vol. II. Annex E: Source-to-effects assessment for radon in homes and workplaces, United Nations (NY). – Available from: http://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR_2006_Annex-E-CORR.pdf (дата обращения: 03.02.2017)

Поступила: 26.01.2017 г.

Жуковский Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, директор Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук. **Адрес для переписки:** 620219, Россия, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20. E-mail: michael@ecko.uran.ru

Ярмошенко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Малиновский Георгий Петрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии Наук, Екатеринбург, Россия

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

Для цитирования: Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Толстых Е.И. Анализ эффективности мероприятий по снижению доз облучения населения от техногенных и природных источников на примере села Муслюмово, река Теча // *Радиационная гигиена*. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 30–35. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-30-35.

Analysis of the effectiveness of measures on reduction population radiation doses due to technogenic and natural sources on the example of Muslyumovo village, the river Tеча

Mikhail V. Zhukovsky¹, Ilya V. Yarmoshenko¹, Georgy P. Malinovsky¹, Evgeniya I. Tolstykh²

¹ Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

²Ural Research Center For Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

The aim of the study was to analyze the effectiveness of measures on reduction of population radiation exposure at the radioactively contaminated territories by comparing radiation doses due to natural and technogenic sources. Materials and methods: the effective doses of radiation exposure due to the Tеча River contamination in Muslyumovo were calculated using the data on radionuclide intakes and coefficients recommended by ICRP. Exposure to radon was estimated based on the results of radon surveys of Muslyumovo in 1992 and New Muslyumovo in 2015. Results: the total effective dose due to the Tеча River contamination accumulated over the period 1950–2000 was 144 mSv. Annual effective doses due to

Mikhail V. Zhukovsky

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Address for correspondence: Sofia Kovalevskaya Str., 20, Ekaterinburg, 620219, Russia; Email: onischenko@ecko.uran.ru

radon in Muslyumovo and New Muslyumovo were 9,2 and 5,1 mSv respectively. The total effective dose received due to the natural and technogenic radiation was about 0,7 Sv (a contribution of radon is 77%). The total averted dose by the year 2015 due to resettlement in 2007 is 38 mSv. The dose reduction appeared mostly due to lower radon exposure. Conclusion: the maximum reduction of population exposure could be achieved by means of timely evacuation to uncontaminated territory together with the indoor radon prevention measures.

Key words: *Techa River, radioactive contamination, radon, evacuation, averted dose.*

References

1. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Ed.: A.V. Akleyev, M.F. Kiselev. M., 2001, 532 p. (in Russian).
2. Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobiova M. I. [et al.] Contemporary understanding of radioactive contamination of the Techa River in 1949–1956. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*, 2016, No 56(5), pp. 523–534 (in Russian).
3. Shagina N.B., Vorobiova M.I., Degteva M.O. [et al.] 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, No 51(4), pp. 349–66. – Available from: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00411-012-0414-0> (Accessed: February 03, 2017).
4. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovsky M., Review of the IAEA Recommendations on Protection Against Exposure to Indoor Radon. ANRI, 2015, Vol. 4, pp. 22–28 (In Russian).
5. ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1). – Available from: http://www.icrp.org/docs/P115_russian%20edition.pdf (Accessed: February 03, 2017) (In Russian).
6. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4) – Available from: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (Accessed: February 03, 2017) (In Russian).
7. Degteva M.O., Vorobiova M.I., Tolstykh E.I. [et al.] Development of an improved dose reconstruction system for the Techa River population affected by the operation of the Mayak Production Association. *Radiat. Res.*, 2006, Vol. 166, pp. 255–70.
8. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: strontium-90. *Health Phys.*, 2011, No 101(1), pp. 28–47.
9. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Phys.*, 2013, No 104(5), pp. 481–98.
10. ICRP, 1995. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26 (1).
11. Official website of the Ministry of ecology of the Chelyabinsk region. A comprehensive report on the state of environment of the Chelyabinsk region in 2015. Available from: <http://www.mineco174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic/2015> (Accessed: January 30, 2017) (In Russian).
12. Chukanov V.N., Volobuev P.V., Drozhko E.G. [et al.] The genesis and the concept of the State program of the Russian Federation on radiation rehabilitation of the Ural region. Ekaterinburg, 1993, 66 p. (In Russian).
13. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A. [et al.] Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Techa River region. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 1298–303.
14. Marennyy A.M. Methodical Aspects of Measurements Average Indoor Radon Volume Activity Using the Integral Track Method. ANRI, 2012, No 4, pp. 13–20 (In Russian).
15. Nikolaev V.A. Solid-state track detectors in the radiation researches. St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2012, 283 p. (in Russian).
16. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects Atomic Radiations), 2009. Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2006 report to the General Assembly, vol. II. Annex E: Source-to-effects assessment for radon in homes and workplaces, United Nations (NY). Available from: http://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR_2006_Annex-E-CORR.pdf (Accessed: February 03, 2017).

Received: January 26, 2017

For correspondence: Mikhail V. Zhukovsky – Doctor of Technical Science, Professor, Director, Chief Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Sofia Kovalevskaya Str., 20, Ekaterinburg, 620219, Russia; Email: onischenko@ecko.uran.ru)

Ilya V. Yarmoshenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director, Senior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Georgy P. Malinovsky – Candidate of Biological Science, Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Evgeniya I. Tolstykh – Lead Researcher, Urals Research Center For Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Tolstykh E.I. Analysis of the effectiveness of measures on reduction population radiation doses due to technogenic and natural sources on the example of Muslyumovo village, the river Techa. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2017, Vol. 10, No 1, pp. 30–35. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-30-35.