

Сравнительный анализ медико–дозиметрических последствий аварии 1957 г. и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий

А.В. Аклеев^{1,2}, М.О. Дегтева¹, Л.Ю. Крестинина¹

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Статья посвящена оценке эффективности проведенных защитных мероприятий при аварийном облучении населения Уральского региона, вызванном радиоактивным загрязнением реки Течи и аварией 1957 г. Обе аварийные ситуации имели место в одном и том же регионе в близкие временные сроки и были обусловлены сбросами в реку Течу (1949–1956 гг.) и выбросом в атмосферу (1957 г.) радиоактивных отходов производственного объединения «Маяк». Предпринятые после аварий контрмеры для обеспечения радиационной безопасности населения существенно различались как по характеру мероприятий, так и по срокам их реализации. Если в бассейне реки Течи эффективность их оказалась незначительной, вследствие запоздалого и неполного характера реализации, то на Восточно-Уральском радиоактивном следе эффективность контрмер по медико-дозиметрическим критериям была существенно выше. Как следствие, жители прибрежных сел реки Течи получили значительно большие органические дозы, в том числе на красный костный мозг, а медицинские последствия аварийного облучения у них регистрировались как в ранние, так и в отдаленные сроки после облучения.

Ключевые слова: радиационные аварии, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, доза, медицинские последствия.

Введение

В 1950-е гг. на производственном объединении (ПО) «Маяк» имели место две радиационные аварии, приведшие к радиоактивному загрязнению части территории Уральского региона и облучению населения. Сравнительный анализ долгосрочных последствий этих аварий представляет несомненный интерес с точки зрения оценки эффективности предпринятых защитных мероприятий в отношении населения, проживающего вблизи предприятия. В 1949–1956 гг. ПО «Маяк» осуществлял регламентные и аварийные сбросы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) с различных стадий технологического цикла радиохимического производства в реку Течу. 29 сентября 1957 г. в результате термохимического взрыва емкости хранилища жидких радиоактивных отходов, расположенной на промышленной площадке ПО «Маяк», образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Причины обеих аварийных ситуаций достаточно подробно проанализированы и описаны в литературе [1–3]. Масштабы радиоактивного загрязнения территории Уральского региона, вызванные этими авариями, были сопоставимыми. Суммарная активность, сброшенная в реку Течу, составила

около $3,1 \cdot 10^6$ Ки (115 ПБк). Учитывая, что основная доля активности выброса 1957 г. выпала на территорию промышленной площадки ПО «Маяк», суммарная активность, которая приняла участие в формировании ВУРСа и облучении населения, проживающего на его территории, составила около $2 \cdot 10^6$ Ки по суммарной β -активности (74 ПБк) [4, 5].

Аварийные сбросы в реку Течу имели место преимущественно летом – осенью 1951 г. на фоне регулярных технологических сбросов, которые начались в январе 1949 г. и значительно увеличились в сентябре 1950 г. Происхождение аварийных сбросов было обусловлено неконтролируемыми утечками высокоактивных отходов из резервуаров-хранилищ. Максимальный залп аварийных сбросов пришёлся на 8–12 октября 1951 г. С 28 октября 1951 г. основные сбросы были переключены на закрытое озеро Карачай, что привело к значительному уменьшению поступления радионуклидов в Течу. В 1956 г. русло реки в её верхнем течении было перекрыто глухой плотиной, также были построены обводные каналы, что позволило изолировать сильно загрязненный участок русла от нижележащих частей реки. Таким образом, формирование

Аклеев Александр Васильевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: akleyev@urcrm.ru

радиационной ситуации на реке Тече продолжалось почти 7 лет, причём около половины активности поступило в реку с аварийными сбросами во второй половине 1951 г. [6].

Радионуклидный состав регулярных и аварийных сбросов существенно различался. В регулярных сбросах преобладали $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ (35%), $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$ (21%), ^{89}Sr (19%) и ^{137}Cs (14%). Вклад $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ составлял около 3%. В аварийных сбросах преобладал $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$ (67%), по сравнению с которым вклады $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$ (17%) и $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (6%) были существенно ниже, а вклады всех остальных продуктов деления не превышали 5% [5]. Важно отметить, что периодичность, изотопный состав и активность сбросов ЖРО в реку Течу не имели регулярного характера и существенно отличались во времени, что создавало значительную вариабельность мощности дозы внешнего γ -излучения и внутреннего поступления радионуклидов в организм местных жителей. Основная доля (более 60%) относительно долгоживущих радионуклидов, таких как ^{90}Sr и ^{137}Cs , имевших основное значение в формировании доз облучения населения прибрежных сел реки Течи, была сброшена в Течу в октябре 1951 г. [6].

Формирование ВУРСа полностью завершилось через 10–11 ч после взрыва. В суммарной активности выброса 1957 г. преобладал $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$ (66,0% от суммарной активности). На долю $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ приходилось 24,9% активности, $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y} - 5,4\%$, $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh} - 3,7\%$, а $^{137}\text{Cs} - 0,1\%$ [1–4].

Население в обеих ситуациях подверглось хроническому сочетанному (внешнему γ - и внутреннему) облучению. Внешнее облучение в обеих аварийных ситуациях имело преобладающее значение в формировании доз облучения населения в первые 2 года после аварий и было обусловлено повышенным γ -фоном на территории населенных пунктов и прилегающих районов, которые использовались населением для хозяйственных целей (выпаса скота, покосов и др.). После распада γ -излучающих радионуклидов долгосрочное внутреннее облучение населения с низкой мощностью дозы в обеих ситуациях определялось ^{90}Sr . Особенности аварий были обусловлены разными путями загрязнения окружающей среды: на Тече имел место водный путь, а на ВУРСе – воздушный. Внутреннее облучение было обусловлено поступлением радионуклидов с продуктами питания местного производства (овощи, картофель, рыба, мясо водоплавающей птицы, молоко и др.). У жителей прибрежных сел реки Течи в первые годы после начала сбросов поступление радионуклидов в организм в значительной мере определялось речной водой, которую местное население широко использовало в качестве питьевой. Река использовалась также для водопоя скота, разведения водоплавающей птицы, полива огородов, рыбной ловли, купания и других хозяйственно-бытовых целей. Огороды, пастбища и сенокосы, в основном, располагались на пойменных почвах и заливных лугах реки [3].

В экономическом отношении радиоактивно-загрязненные районы были типичными сельскохозяйственными. Население занималось, в основном, выращиванием овощей, картофеля, зерновых культур (главным образом, пшеницы) и производило мясо и молоко [2, 3].

Мероприятия по защите населения

Необходимо отметить, что после загрязнения реки Течи защитные меры, направленные на обеспечение безопасности населения, предпринимались с задержкой и не выполнялись в должном объеме. Вследствие отсутствия

научно-обоснованных критериев радиационной защиты населения экстренные защитные мероприятия на Тече не проводились. Плановые мероприятия включали гидротехнические и административные, а также организацию и проведение радиационного мониторинга и медицинского наблюдения (табл. 1) [3].

Таблица 1

Защитные мероприятия в бассейне реки Течи и на территории ВУРСа

[Table 1

Protective measures in the Techa River basin and in the EURT territory]

Мероприятия [Measures]	Река Теча [Techa River]	ВУРС [EURT]
Экстренные [Emergency]	Не проводились [were not implemented]	Эвакуация (1,100 чел.) [Evacuation (1,100 persons)]
		Бракераж продовольствия, фуража и частичная его замена [Quality inspection of food products and fodder with their partial replacement]
Плановые [Scheduled]	Организация санитарно-охранной зоны [Establishment of sanitary-protected zone]	Организация санитарно-охранной зоны (СОЗ) [Establishment of sanitary-protected zone]
	Переселено 7338 чел. [7,338 persons have been resettled]	Переселено 10 580 чел. [10,580 persons have been resettled]
	Санитарно-охранный режим [Sanitary-protective regime]	Санитарно-охранный режим [Sanitary-protective regime]
	Выведено из землепользования 80 км ² территории [A territory of 80 km ² has been withdrawn from the economic use]	Сельскохозяйственные (в том числе выведено из землепользования 700 км ²) [Agricultural (including 700 km ² withdrawn from the economic use)]
Гидротехнические (строительство плотин, каналов, колодцев, водопроводов и др.) [Hydrotechnical (construction of dams, channels, wells, water-supply system)]	Дезактивация населенных пунктов и сельскохозяйственных территорий [Radioactive decontamination of settlements and agricultural areas]	Реорганизация и перепрофилирование сельскохозяйственных предприятий [Restructuring and conversion of farming enterprises]

Окончание таблицы 1

Мероприятия [Measures]	Река Теча [Techa River]	ВУРС [EURT]
Плановые [Scheduled]	Радиационный мониторинг [Radiation monitoring] Медицинское наблюдение [Medical follow up]	Радиационный мониторинг [Radiation monitoring] Медицинское наблюдение [Medical follow up]

Первоочередные меры включали ограничение сбросов ЖРО в реку (конец 1951 г.) и введение официального запрета на использование реки для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд населением. С 1953 г. для ограничения доступа людей, скота и водоплавающей птицы поймы и река в пределах населенных пунктов были огорожены изгородью с колючей проволокой. Для снижения дозы облучения жителей отчужденная пойма (вне территории населенных пунктов) была засажена лесом и оконтурена канавой. В 1954–1960 гг. из 19 прибрежных сел было переселено более 7 тыс. жителей, что составляло около 30% от общей численности населения на Тече. Эвакуация проводилась поэтапно и была начата с жителей наиболее неблагополучных населенных пунктов, расположенных в верховьях реки [3, 4].

Снижение степени воздействия радиации на население, которое осталось проживать в прибрежных селах, предполагалось достигнуть не только за счет введения ряда ограничений на использование реки для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд (полив огородов, стирка белья, разведение водоплавающей птицы, выращивание овощей и картофеля в пойме реки и др.), но и благодаря обеспечению населения источниками чистой воды. Необходимо отметить, что вышеуказанные защитные мероприятия и ограничения были введены только в бассейне реки Течи. Для использования подземных вод в прибрежных населенных пунктах строились колодцы и водопроводы. Как отмечалось выше, для изоляции наиболее загрязненных участков верхнего течения реки от остальной ее части были созданы водоемы-отстойники и обводные каналы [3]. Необходимо отметить, что санитарно-охранной режим для переселенных жителей начал действовать с опозданием. Например, запрет на использование реки как питьевого источника был введен только через 3–4 года после начала сбросов. Однако поскольку строительство колодцев и водопроводов было завершено лишь через 6–7 лет после введения запрета на использование реки, население было вынуждено частично использовать речную воду для хозяйственно-бытовых нужд [3].

Из всех защитных мероприятий наибольшую трудность представляло выполнение требований санитарно-охранного режима. Частыми нарушениями режима являлись рыбная ловля и купание в реке, а также сенокосение в отчужденной пойме. Во всех населенных пунктах в большом количестве имелась водоплавающая птица (гуси, утки), которая в летнее время содержалась на реке. Наиболее частым нарушением был выпас скота в прибрежной отчужденной пойме. Одной из важнейших причин несоблюдения населением санитарно-охранного режима являлось отсутствие на протяжении длительного времени официальной информации о произошедшем ра-

диоактивном загрязнении реки. Другими важными факторами невыполнения ограничительного режима стали нехватка «чистых» территорий для сельскохозяйственной деятельности населения и трудность в изменении привычного образа жизни сельских жителей, чей уклад жизни в течение многих лет формировался в тесной связи с рекой, которая использовалась для разнообразных хозяйственно-бытовых нужд [3, 4].

В основу принятия решений по контрмерам после аварии 1957 г. были положены данные по уровням загрязнения окружающей среды и дозам облучения населения. Экономическая целесообразность защитных мероприятий не оценивалась; все мероприятия были направлены на минимизацию неблагоприятных последствий для здоровья населения [1, 7].

Защитные мероприятия в отношении населения ВУРСа (см. табл. 1) включали как неотложные, так и плановые мероприятия. Уже 2 октября 1957 г. была принята программа экстренных мероприятий по ликвидации последствий аварии, которая включала: эвакуацию населения из близлежащих населенных пунктов, бракераж продовольствия, фуража и замену их на «чистые», определение плотностей и границ загрязненной территории для образования санитарно-охранной зоны. Жители сел Бердяниш, Сатлыково, Галикаево и Кирпичики, расположенных наиболее близко к месту взрыва, были эвакуированы в течение 10 дней после аварии вследствие высокой мощности дозы внешнего излучения. Была проведена полная санитарная обработка всех жителей этих сел с заменой одежды. Эвакуированное население было обеспечено новым жильем. Дома и дворовые постройки в этих селах были полностью разрушены, а сельскохозяйственные животные – забиты и захоронены [1, 2].

В оставшихся селах ВУРСа на основе массового радиометрического контроля с целью снижения внутреннего облучения с осени 1957 г. был начат бракераж продовольствия и фуража с частичной заменой грязных продуктов. Бракераж осенью 1957 г. был затруднен вследствие отсутствия в этот период допустимых уровней их загрязнения. Временные предельно допустимые уровни суточного поступления радионуклидов для отдельных компонентов рациона и фуража были приняты 7 мая 1958 г. Отсутствие территориальной радиологической службы в Челябинской и Свердловской областях при необходимости обследования большого объема образцов продуктов и фуража существенно затрудняло бракераж. Содержание радионуклидов в продуктах питания и фураже в этот период определяла только радиологическая лаборатория ПО «Маяк». Как следствие, поступление радиоактивных веществ в организм жителей некоторых населенных пунктов с продуктами превышало допустимые уровни [2, 7].

Предварительная оценка уровней и границ загрязнения территории ВУРСа, сделанная в первые сутки после аварии, и повторные съемки в октябре – декабре 1957 г. позволили уточнить зону загрязнения. В начале 1958 г. была организована СОЗ с ограничительным режимом (запрещено проживание и хозяйственная деятельность). Плотность загрязнения территории 2 Ки/км² по ⁹⁰Sr была признана предельной для безопасного проживания населения и принята в качестве официальной границы ВУРСа. Однако вследствие нехватки «чистых» пастбищ и сенокос-

сов население продолжало частично использовать территорию СОЗ [2].

Плановые мероприятия включали: дополнительное переселение с территории СОЗ, дезактивацию населенных пунктов и сельскохозяйственных территорий, создание системы радиационного мониторинга, а также реорганизацию и перепрофилирование сельскохозяйственных предприятий. Население 7 сел (2280 человек) было переселено через 250 дней после аварии, а 12 сел (8300 человек) – через 330–670 дней после аварии [1, 2, 4].

Совокупность мер, предпринятых на загрязненных территориях ВУРСа с плотностью загрязнения по ^{90}Sr менее $2 \text{ Ки}/\text{км}^2$, таких как введение допустимых нормативов, упорядочивание условий жизнедеятельности населения, производства и переработки продуктов, установление системы ограничений позволила создать условия для безопасного проживания населения и получения продуктов питания на территории ВУРСа. Для жителей, оставленных на прежнем месте жительства, предпринимались усилия, направленные на снижение доз внешнего облучения и годового поступления ^{90}Sr и ^{137}Cs , такие как дезактивация посредством перепашки радиоактивно-загрязненных территорий, реорганизация и перепрофилирование предприятий, производящих продукты питания. Мелкие хозяйства были реорганизованы в более крупные, специализирующиеся на производстве говядины и свинины с использованием особых условий содержания и кормления животных. Использование естественных кормовых угодий было ограничено. Усилиями специализированных хозяйств в 1960-е гг. было достигнуто снижение ^{90}Sr в говядине, которая являлась их основной продукцией, в 2–7 раз. Производство зерна и овощей было запрещено, а производство молока ограничено. Укрупнение хозяйств значительно облегчило радиационный мониторинг сельскохозяйственной продукции [2, 4].

Организация медицинской помощи облученному населению

Поскольку Уральский регион характеризуется высокой плотностью населения, в сферу потенциального влияния радиации попала достаточно большая по численности группа населения. Только в бассейне загрязненной речной системы Теча – Исеть – Тобол – Обь проживало около 124 тыс. человек [3, 4]. Наиболее неблагоприятная радиационная обстановка имела место в бассейне реки Течи, где на начало сбросов ЖРО проживало около 24 тыс. человек, и еще около 6 тыс. человек приехали или родились в прибрежных селах в период с 1952 по 1960 г. На территории ВУРСа протяженностью 300 км и площадью около 20 тыс. км² (плотность загрязнения по ^{90}Sr составляла $0,1 \text{ Ки}/\text{км}^2$ и более) располагалось 217 населенных пунктов, в которых проживало около 270 тыс. человек. На территории СОЗ находилось 22 населенных пункта с общей численностью населения около 18 тыс. человек. Как отмечалось выше, в зависимости от уровня загрязнения территории жители этих населенных пунктов в течение 2 лет были поэтапно переселены.

Важно отметить, что первые специализированные медицинские осмотры жителей прибрежных сел реки Течи были начаты через 1,5 года после начала сбросов (1951 г.),

тогда как осмотры жителей сел Бердяниш, Сатлыково, Галикаево и Кирпичики, расположенных наиболее близко к месту взрыва, были начаты в первые дни после аварии. До настоящего времени специализированное медицинское наблюдение за жителями прибрежных сел реки Течи и ВУРСа осуществляет клиническое отделение Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) ФМБА России.

Информационной основой для осуществления медицинского наблюдения за облученными людьми и анализа медицинских последствий радиационного воздействия является медико-дозиметрическая база данных УНПЦ РМ [3]. Регистр облученного населения начал формироваться в 1967 г. и содержит персонифицированную информацию как о самих облученных лицах, так и об их потомках. Для анализа медико-биологических последствий хронического облучения жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа были созданы две когорты, которые получили название Когорта реки Течи (КРТ) и Когорта Восточно-Уральского радиоактивного следа (КВУРС). КРТ составили люди, родившиеся до 1950 г. и постоянно проживавшие в 1950–1960 гг. в населенных пунктах (НП) вдоль реки Течи. В когорту ВУРСа вошли жители 22 переселенных населенных пунктов и 14 сел, находившихся близко к границе отселения в головной части ВУРСа, которые родились до аварии и проживали там до отселения или до 31 декабря 1959 г. (непереселенные жители) [7]. Основные характеристики когорт представлены в таблице 2. В когорту ВУРСа не были включены лица из 3 переселенных сел Свердловской области (около 1 тыс. человек) в связи с отсутствием постоянного доступа к данным о смертности и заболеваемости в этой области.

Анализ основных параметров КРТ и КВУРСа свидетельствует о достаточной их сопоставимости по численности, периоду наблюдения, соотношению полов, этническому фактору и возрастной структуре населения. В обеих когортах на время облучения преобладали женщины и была большая доля детей и лиц молодого возраста (табл. 2). Важно отметить, что в когорту ВУРСа включено около 1,5 тыс. человек, которые ранее были переселены из прибрежных сел реки Течи и уже подвергались облучению в результате ее загрязнения.

Отслеживание жизненного статуса и состояния здоровья у членов когорт осуществлялось на территории наблюдения, которая несколько различалась по доступности информации о случаях онкозаболеваемости и причинах смерти. Территория наблюдения для анализа онкозаболеваемости включала Красноармейский, Кунашакский, Аргаяшский, Каслинский и Сосновский районы Челябинской области, а также г. Челябинск и г. Озерск. Территория наблюдения для анализа смертности включала всю Челябинскую и Курганскую области.

Информация о нерадиационных факторах риска, результатах медицинского и дозиметрического обследования членов когорт сохраняется в медико-дозиметрической базе данных УНПЦ РМ. Актуализация жизненного статуса, мест проживания, а также состояния здоровья осуществляется на регулярной основе с использованием единых источников информации [8]. Жизненный статус в сравниваемых когортах представлен в таблице 3.

Основные характеристики исследуемых когорт

Таблица 2

Main characteristics of the studied cohorts

[Table 2]

Показатель [Parameter]	Когорта реки Течи (КРТ) [Techa River Cohort (TRC)]	Когорта ВУРСа (КВУРС) [EURT Cohort (EURTC)]
Численность [Size of the cohort]	29 730	21 427
Период наблюдения [Follow up period]	58 лет * [58 years] 1950–2007 гг. [1950–2007]	50 лет [50 years] 1957–2006 гг. [1957–2006]
Число чел.-лет под наблюдением [Number of person-years under follow up]	927 743	458 131
Доля женщин, % [Percentage of females, %]	58	56
Этнический состав [Ethnic composition]	Татары и башкиры – 20%, славяне – 80% [Tartars and Bashkirs – 20%, Slavs – 80%]	Татары и башкиры – 40%, славяне -60% [Tartars and Bashkirs – 40%, Slavs – 60%]
Доля лиц моложе 20 лет, % [Percentage of people under 20 years old, %]	43	42

* – представлены данные на период последней публикации
[* – the data are given as of the last publication].

Жизненный статус в сравниваемых когортах

Таблица 3

Vital status in the cohorts under comparison

[Table 3]

Жизненный статус [Vital status]	КРТ [TRC]		КВУРС [EURTC]	
	Человек [Number of persons]	%	Человек [Number of persons]	%
Живы на ТН [Alive in the catchment area]	5 684	19	5 731	27
Умерли [Deceased]	17 307	58	8 016	37
Из них причина известна [With known cause of death]	15 763	91	7 164	89
Потеряны для наблюдения [Lost to follow up]	6 739	23	7 680	35
Из них: мигранты [Out of them: migrants]	4 696	16	3 511	16
Статус неизвестен [Status unknown]	2 043	7	4 169	19
Всего [Total]	29 730	100	21 427	100

В обеих когортах преобладает доля умерших членов, которая составляет 58% в КРТ и 37% в когорте ВУРСа. Большая доля умерших людей в КРТ, по-видимому, обусловлена более старшим возрастом членов данной когорты. Так, самые молодые члены КРТ к 2007 г. достигли возраста 58 лет, а возраст молодых членов когорты ВУРСа составлял 50 лет.

Доля живых на территории наблюдения в КРТ составляет 19%, а в когорте ВУРСа – 27%. Потерянными для наблюдения (вышедшими из анализа до конца периода наблюдения) являются 23% и 35% членов когорт соответственно. Значительную долю потерянных для наблюдения составляют люди, мигрировавшие за пределы

наблюдаемой территории, доля которых за весь период наблюдения составила в обеих когортах 16%.

Дозиметрические оценки эффективности защитных мероприятий

Как отмечалось выше, характер облучения населения прибрежных сел реки Течи и ВУРСа был сопоставимым. В обеих ситуациях имело место многолетнее (хроническое) радиационное воздействие, обусловленное сочетанным воздействием внешнего γ -излучения и внутреннего облучения за счет поступивших в организм местных жителей продуктов деления урана, преимущественно ^{90}Sr и ^{137}Cs . Критическим органом по дозе облучения у членов обеих когорт являлся красный костный мозг (ККМ) вследствие значительного поступления остеотропного ^{90}Sr с продуктами питания местного производства, преимущественно с молоком [2, 3].

Поступление ^{90}Sr длительное время в обеих аварийных ситуациях определяло внутреннее облучение населения жителей прибрежных НП реки Течи и ВУРСа, а его содержание в организме можно рассматривать в качестве показателя эффективности защитных контрмер в отношении фактора внутреннего облучения. Мониторинг содержания ^{90}Sr в организме жителей радиоактивно-загрязненных территорий проводился с использованием спектрометра излучения человека (СИЧ-9.1) и по данным аутопсии. Содержание ^{90}Sr в образцах костей было оценено радиохимическим методом у 246 членов КРТ и 1646 жителей ВУРСа, тогда как методом спектрометрии излучения человека – у 10 174 и 369 человек соответственно. Результаты оценки содержания ^{90}Sr у жителей Челябинской области представлены на рисунке [9].

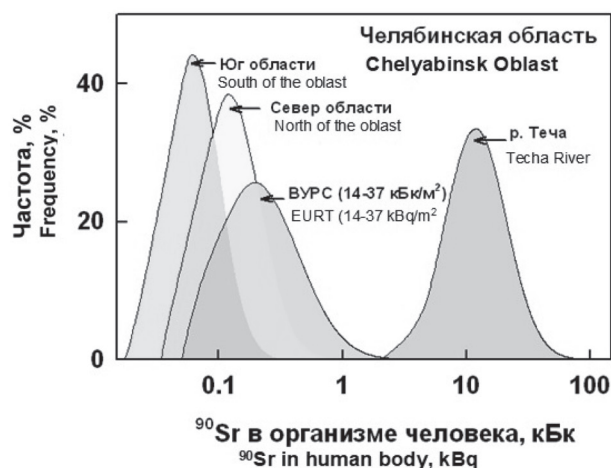


Рис. Распределение содержания ^{90}Sr в организме для различных субпопуляций Челябинской области
[Fig.] Distribution of the ^{90}Sr body-burden for various subpopulations of the Chelyabinsk Oblast

Хотя введение санитарно-охранного режима привело к снижению поступления ^{90}Sr в организм жителей прибрежных сел реки Течи с молоком в 6,7 раза в средней и в 3 раза в дальней части реки [3], содержание ^{90}Sr у них было высоким и примерно на два порядка превышало аналогичные значения у жителей ВУРСа. Значительная доля членов когорты ВУРСа имела содержание ^{90}Sr существен-

но выше, чем население северных районов Челябинской области, которые проживали на территориях, подвергшихся низким уровням загрязнения в результате локальных выпадений от выбросов ПО «Маяк». Содержание ^{90}Sr у жителей южных районов Челябинской области определялось исключительно глобальными выпадениями после испытаний ядерного оружия.

Индивидуализированные расчеты органичных доз, выполненные с использованием дозиметрической системы реки Течи – TRDS-2016D [8], свидетельствуют о значительном превышении поглощенной дозы на ККМ по сравнению с дозой на желудок у членов КРТ (табл. 4).

Таблица 4
Основные характеристики доз облучения ККМ и желудка у населения Течи и ВУРСа

[Table 4
Main characteristics of the exposure doses to RBM and stomach in residents of the Techa River and EURT settlements]

Поглощенная доза [Absorbed dose]	КРТ [TRC]	КВУРС [EURTC]
ККМ, Гр [RBM, Gy]		
Среднее значение [Mean value]	0,43	0,12
Медиана [Median]	0,27	0,01
Максимальное значение [Maximum value]	9,02	2,04
Желудок, Гр * [Stomach, Gy]*		
Среднее значение [Mean value]	0,04	0,03
Медиана [Median]	0,01	0,02
Максимальное значение [Maximum value]	0,96	0,69

* представлены дозы на желудок, которые используются при оценке радиационного риска заболеваемости и смертности от всех злокачественных опухолей, исключая остеосаркому и рак кожи
 [* the provided doses to the stomach are used in the assessment of radiation risk of incidence and mortality from all malignant tumors excluding osteosarcoma and skin cancer].

Максимальные значения органичных доз были отмечены у постоянных жителей верховьев реки Течи, которые располагались недалеко от места сброса ЖРО. Средняя доза облучения ККМ в КРТ составляла 0,43 Гр, а средняя доза на желудок – на порядок меньше. В когорте ВУРСа поглощенные дозы на ККМ были значительно меньше, чем у жителей прибрежных сел Течи, тогда как дозы на желудок в обеих когортах были сопоставимыми.

Анализ эффективности такой радикальной меры защиты при радиационных авариях, как переселение, показал высокую зависимость ее эффективности от сроков реализации (табл. 5) [10]. Максимальные значения предотвращенных доз облучения населения отмечались при отселении в первые 10 суток после аварии. Отселение в ранние сроки явилось одной из самых эффективных контрмер, которое значительно снизило дозы от внешнего γ -излучения и прекратило поступление относительно короткоживущих радионуклидов (преимущественно ^{144}Ce) с пищевым рационом.

Таблица 5

Предотвращенная отселением доза
(% от потенциальной дозы) у жителей ВУРСа

Table 5

Dose averted through resettlement (% of the potential dose)
in residents of the EURT]

Доза [Dose]	Сроки отселения, сут. [Resettlement time, days]			
	10	250	330	670
Эффективная [Effective]	94	41	34	10
Поглощенная на ЖКТ * [Absorbed to GIT*]	96	37	30	3,7
Поглощенная на ККМ * [Absorbed to RBM*]	93	41	32	20
Поглощенная от внешнего облучения [Absorbed dose of external exposure]	92	43	35	30

ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; * – поглощенные дозы от сочетанного радиационного воздействия, которые были обусловлены преимущественно внутренним облучением [GIT – gastrointestinal tract; * – absorbed doses of combined radiation exposure that were determined largely by internal exposure].

Отселение жителей ВУРСа в более поздние сроки (250–670 дней после аварии) не приводило к значительному уменьшению доз, включая дозы внешнего и внутреннего облучения ЖКТ, так как основная доля дозы уже была сформирована в первые месяцы после аварии. Например, переселение через 670 дней предотвратило только 10% эффективной дозы и 20% дозы на ККМ. Анализ дозы, предотвращенной отселением в разные сроки, позволяет сделать вывод, что переселение людей с радиоактивно-загрязненных территорий ВУРСа в поздние сроки после аварии не было достаточно обоснованным и могло ухудшить условия и качество жизни переселенных людей [11].

Результаты измерений содержания маркерного радионуклида ^{90}Sr в организме, а также оценок индивидуализированных органных доз у жителей прибрежных сел реки Течи и когорты ВУРСа свидетельствуют о значительно большей эффективности контрмер, принятых после аварии 1957 г. Они позволили существенно снизить дозы как внутреннего, так и внешнего облучения населения ВУРСа и минимизировать у них неблагоприятные последствия для здоровья. Анализ коллективных эффективных доз для членов КРТ и когорты ВУРСа показал, что теоретический ущерб, причиненный авариями здоровью населения прибрежных сел реки Течи и оцененный на основе рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите [11] с использованием индивидуальных поглощенных доз на органы на основе TRDS-2016D, значительно выше, чем для населения ВУРСа. Коллективная эффективная доза для 29 647 членов КРТ составила 2980 чел.-Зв, а для 21 014 членов когорты ВУРСа – 340 чел.-Зв.

Медицинские последствия аварий

Ранние эффекты облучения в виде хронического лучевого синдрома (ХЛС) и реакций тканей (кровенворной, иммунной, центральной нервной системы и др.) регистрировались преимущественно у жителей прибрежных сел реки Течи, расположенных наиболее близко к месту сброса ЖРО. Точное количество случаев ХЛС среди жителей бассейна реки Течи неизвестно, так как медицинское обследование населения в период максимального радиационного воздействия (1951–1956 гг.) не охватывало всего облученного населения. Среди выявленных 940 случаев ХЛС преобладала легкая по степени тяжести форма заболевания (899 случаев – 95,5%), которая могла протекать под видом других заболеваний и спонтанно регрессировать после реализации защитных мероприятий и особенно переселения [12].

Наиболее выраженные изменения гемопоэза отмечались в виде нейтропении, лимфоцитопении и тромбоцитопении в 1951–1953 гг. у жителей верховьев реки Течи, когда регистрировалась максимальная мощность дозы внешнего γ -излучения. Неврологические синдромы (вегетативная дисфункция, астения и органическое поражение нервной системы) также отмечались преимущественно у жителей верховьев (в основном у населения села Метлино, расположенного в 7 км от места сброса ЖРО), но сохранялись более длительное время [3, 8]. Факт преимущественного выявления ХЛС и реакций критических систем организма у жителей НП, расположенных в верховьях реки Течи, свидетельствовал о преобладающей значимости внешнего облучения в развитии ранних медицинских последствий аварийного облучения, контрмеры в отношении которого в селах бассейна реки Течи не предпринимались.

Случаев ХЛС среди населения ВУРСа не было зарегистрировано. Ранние реакции тканей отмечались со стороны гемопоэза только у отдельных жителей ВУРСа в течение первого года после аварии. У них регистрировалось транзитное умеренное снижение количества лейкоцитов, нейтрофилов и тромбоцитов в периферической крови [7].

В качестве медицинских критериев эффективности защитных мероприятий в сравниваемых аварийных ситуациях рассматривались такие доказанные отдаленные последствия облучения человека, как злокачественные опухоли и лейкозы, избыточный относительный риск (ИОР) которых в КРТ и когорте ВУРСа представлен в таблице 6 [7, 8, 13].

Как видно из таблицы 6, радиационный риск злокачественных опухолей по данным смертности в обеих когортах был сопоставимым. В обеих когортах дозовая зависимость хорошо описывается линейной моделью. Атрибутивный риск для раков составляет 1,9–3,6%.

У жителей прибрежных районов реки Течи отмечалось повышение ИОР злокачественных опухолей (исключая рак кожи и остеосаркому) как по данным заболеваемости, так и по данным смертности. ИОР злокачественных опухолей у членов когорты ВУРСа был достоверно повышен только по данным смертности. Однако при исключении из когорты ВУРСа жителей, ранее проживавших в прибрежных селах реки Течи, ИОР злокачественных опухолей становится статистически незначимым.

Таблица 6

Избыточный относительный риск (линейная модель) злокачественных опухолей в Уральских когортах облученного населения

[Table 6]

Excess relative risk (linear model) of malignant tumors in Urals cohorts of exposed population]

Когорта [Cohort]	ИОР/100 мГр (95% ДИ) ERR/100 mGy (95%CI)	p	AP,% ATR,%
КРТ, заболеваемость [TRC, incidence]			
1956–2007, 1933 случая [1956–2007, 1,933 cases]	0,09 (0,02; 0,16)	0,008	3,6 (69)
КРТ, смертность [TRC, mortality]			
1950–2007, 2303 случая [1950–2007, 2,303 cases]	0,06 (0,004; 0,13)	0,03	2,2 (50)
КВУРС, заболеваемость [EURTC, incidence]			
1957–2009, 1426 случаев [1957–2009, 1426 cases]	0,05 (-0,005; 0,11)	0,08	1,9 (27)
КВУРС, смертность [EURTC, mortality]			
1957–2006, 1039 случаев [1957–2006, 1039 cases]	0,06 (0,001; 0,13)	0,046	2,4 (25)

AP – атрибутивный риск, * – в скобках обозначено избыточное число случаев
[ATR – attributable risk, * – excess number of cases is given in parentheses].

Анализ радиационного риска заболеваемости всеми формами лейкозов, а также лейкозами при исключении хронического лимфолейкоза (ХЛЛ) показал повышение ИОР в КРТ с увеличением дозы, но не выявил статистически значимой дозовой зависимости в когорте ВУРСа (табл. 7) [8, 14].

Высокие значения атрибутивного риска лейкозов (и особенно с исключением ХЛЛ) по сравнению с солидными злокачественными опухолями в КРТ в значительной мере обусловлены преимущественно внутренним облучением ККМ у жителей прибрежных сел реки Течи вследствие поступления в их организм ⁹⁰Sr.

Таким образом, результаты анализа медицинских последствий у аварийно-облученного населения Уральского региона позволили установить, что предпринятые защитные мероприятия в отношении населения прибрежных сел реки Течи были неэффективными и, как следствие, в ранние сроки у них регистрировались случаи ХЛС и лучевые реакции тканей, а в отдаленные сроки – повышенный радиационный риск развития злокачественных опухолей и лейкозов.

Таблица 7

Избыточный относительный риск (линейная модель) лейкозов в Уральских когортах облученного населения

[Table 7]

Excess relative risk (linear model) of leukemias in Urals cohorts of exposed population]

Лейкозы [Leukemias]	ИОР/100 мГр (95% ДИ) [ERR/100 mGy (95% CI)]	p	AP,% [ATR,%]
КРТ, 1953–2007 [TRC, 1953–2007]			
Все лейкозы (99) [All leukemias (99)]	0,12 (0,04; 0,24)	<0,001	30% (29)
Лейкозы, исключая ХЛЛ (72) [Leukemias excluding CLL (72)]	0,22 (0,08; 0,54)	<0,001	47% (34)
КВУРС, 1957–2009 [EURTC, 1957–2009]			
Все лейкозы (37) [All leukemias (37)]	0,10 (nf <0; 0,37)	0,14	–
Лейкозы, исключая ХЛЛ (29) [Leukemias excluding CLL (29)]	0,12 (nf <0; 0,45)	0,17	–

nf (not found) – граница доверительного интервала не может быть точно вычислена программой
[nf (not found) – the limit of the confidence interval could not be calculated by the software].

Выводы

1. Сравнительный анализ долгосрочных медико-дозиметрических последствий двух радиационных аварий, имевших место в 1950-е гг. в Уральском регионе (сбросы ЖРО в реку Течу и авария 1957 г.), которые были сопоставимыми по выброшенной активности, характеру облучения населения, его численности и возрастно-половому составу, позволил сопоставить эффективность проведенных защитных мероприятий в отношении облученного населения.

2. Результаты многолетнего мониторинга радиационной обстановки и состояния здоровья облученных жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа свидетельствуют о значительно большей эффективности предпринятых защитных мероприятий в отношении населения Уральского региона после аварии 1957 г. Коллективная эффективная доза облучения жителей ВУРСа оценена на порядок ниже, чем у жителей прибрежных сел реки Течи (340 чел.-Зв и 2 980 чел.-Зв соответственно).

3. Чрезвычайную эффективность в отношении внешнего и внутреннего облучения населения продемонстрировали экстренные мероприятия на ВУРСе. Эвакуация людей, проживавших в непосредственной близости к месту взрыва 29 сентября 1957 г., позволила предотвратить развитие у них острого лучевого синдрома и лучевых реакций тканей.

Плановые контрмеры (дезактивация, переселение, реорганизация сельскохозяйственных предприятий

и др.), предпринятые на ВУРСе для снижения поступления ^{90}Sr , также позволили значительно уменьшить дозы внутреннего облучения ККМ у населения и минимизировать риск развития лейкозов и злокачественных опухолей в отдаленные сроки. Важно отметить, что эффективность такой радикальной контрмеры, как переселение жителей ВУРСа в более поздние сроки (через 250–670 дней после аварии), значительно снижалась по критерию предотвращенной дозы.

4. В условиях отсутствия экстренных мероприятий по защите населения в период максимальных радиоактивных сбросов в реку Течу, и особенно в 1950 и 1951 гг., когда имели место наибольшие мощности дозы внешнего γ -излучения, у населения регистрировались такие детерминированные эффекты, как ХЛС и реакции тканей критических органов (иммунодепрессия и центральная нервная система). Предпринятые плановые защитные мероприятия в отношении жителей прибрежных сел реки Течи (гидротехнические, переселение, введение санитарно-охранного режима и др.) вследствие неполного и запоздалого характера их реализации не позволили существенно снизить остаточные дозы облучения, особенно красного костного мозга. Тяжелые детерминированные эффекты, а также повышенные радиационные риски лейкозов и злокачественных опухолей у жителей прибрежных сел реки Течи свидетельствуют о неэффективности контрмер, предпринятых после радиоактивного загрязнения реки Течи.

5. В условиях низкой эффективности защитных мероприятий в поставарийном периоде, которые не обеспечивают снижения дозы внешнего облучения и задержку поступления в организм радионуклидов, важным фактором минимизации медицинских эффектов аварийного радиационного воздействия является регулярная специализированная медицинская помощь населению, направленная на раннюю диагностику лучевых тканевых реакций и канцерогенных эффектов.

Благодарности

Данные исследования выполнены при поддержке Федерального медико-биологического агентства РФ. Авторы признательны членам биофизической лаборатории УНПЦ РМ за работу по расчету индивидуализированных оценок доз для членов КРТ и когорты ВУРСа, сотрудникам отдела «База данных Человек» УНПЦ РМ (заведующий Н.В. Старцев) за помощь в проведении работы по прослеживанию жизненного статуса членов когорт, персоналу клинического отделения (главный врач В.Н. Коваленко) за многолетнее наблюдение за состоянием здоровья облученных людей и сотрудникам эпидемиологической лаборатории, участвовавшим в сборе и подготовке данных для анализа.

Литература

1. Бурназян А.И. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. М: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
2. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк» / под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ», 2001. 294 с.
3. Аклеев А.В. и др. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча. М.: Вторая типография ФУ «Медбиоэкстрем», 2001. 531 с.
4. Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. – 752 с.
5. Василенко Е.К., Аладова Е.Е., Горелов М.В. и др. Авария 1957 года: радиационная обстановка и дозы облучения участников ликвидации аварии на территории промышленной площадки ПО «Маяк» // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (Спецвыпуск). С. 31–49.
6. Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И., Толстых Е.И. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949 – 1956 гг. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 5. С. 523–534.
7. Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the Kyshtym Accident) // J Radiol Prot. 2017 Sep; 37(3): 19–42.
8. Аклеев А.В., Аклеев А.А., Андреев С.С. и др. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
9. Дегтева М.О., Толстых Е.И., Суслова К.Г., Романов С.А., Аклеев А.В. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 30–37.
10. Романов Г.Н. Радиационная авария на ПО «Маяк»: практика контрмер, их эффективность и извлеченные уроки. Вопросы радиационной безопасности. 1997. № 3. С. 3 – 17.
11. ICRP, 2007. Recommendations of the ICRP: ICRP Publication 103. Annals of the ICRP. 2007. V. 37, No. 2–4.
12. Аклеев А.В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга, 2012. 461 с.
13. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Сравнительный анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на реке Теча и Восточно-Уральском радиоактивном следе // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 1. С. 100–114.
14. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Аклеев А.В. Риск заболеваемости гемобластозами у членов когорты Восточно-Уральского радиоактивного следа. Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 2. С. 36–50.

Поступила: 24.12.2019 г.

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А.; E-mail: akleyev@urcrm.ru

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

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: **Аклеев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю. Сравнительный анализ медико-дозиметрических последствий аварии 1957 г. и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий // Радиационная гигиена. 2020. Т.13, № 1. С. 16 – 26. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26**

Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency

Alexander V. Akleyev^{1,2}, Marina O. Degteva¹, Lyudmila Yu. Krestinina¹

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

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

The paper deals with the evaluation of the efficiency of the implemented protective measures in the event of accidental exposure of the Urals region population due to radioactive contamination of the Techa River and the 1957 accident. Both of the accidents occurred in one and the same region within approximately the same time frame, and were caused by discharges of Mayak Production Association radioactive waste into the Techa River (1949–1956) and into the atmosphere (1957). Counter-measures that had been undertaken to provide radiation safety of the population differed both in nature and in timeline. Their efficiency was insufficient in the Techa River basin as they were delayed in time and were not implemented to a full extent. But counter-measures in the East Urals Radioactive Trace were much more effective according to medical and dosimetric criteria. As a result, residents of the Techa riverside settlements received much higher organ doses, including doses to red bone marrow, and health effects of accidental exposure were registered in them both soon after and long after the radiation exposure.

Key words: radiation accidents, Techa River, East Urals Radioactive Trace, dose, health effects.

References

1. Burnazyan AI. Results of the study and experience in elimination of the consequences of accidental contamination of a territory with uranium fission products. Moscow: Energoatomizdat; 1990. 144 p. (in Russian).
2. Akleyev AV, Kiselev MF, Eds. Ecological and health effects of the radiation accident of 1957 at the Mayak PA. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001. 290 p. (in Russian).
3. Akleyev AV, et al. Medical-biological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001. 531 p. (in Russian).
4. Aleksakhin RM, Buldakov LA, Gubanov VA, Drozhko EG, Ilyin LA, et al. Large-scale radiation accidents: consequences and protective measures. Moscow: Izdat; 2001. 752 p. (in Russian).
5. Vasilenko EK, Aladova EE, Gorelov MV, Knyazyev VA, Kolupayev DN, Romanov SA. The accident of 1957: radiation situation and doses to the liquidators of the accident on the territory of the PO «Mayak» facility. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 31–49. (in Russian).
6. Degteva MO, Shagina NB, Shishkina EA, Tolstykh EI. Current status of the radioactive contamination of the Techa river in 1949-1956. *Radiation biology. Radioekology*. 2016;56(5): 523 – 34 (in Russian).
7. Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the «Kyshtym Accident»). *J Radiol Prot*. 2017 Sep; 37(3): 19-42.
8. Akleyev AV, et al. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health. Chelyabinsk: Kniga. 2016: 390 p. (in Russian).
9. Degteva MO, Tolstykh EI, Suslova KG, Romanov SA, Akleyev AV. Analysis of the results of the monitoring of the contents of the long-lived radionuclides in residents of the Ural region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 30–7 (in Russian).
10. Romanov GN. Issues of the radiation safety. 1997;3: 3–17(in Russian).
11. ICRP, 2007. Recommendations of the ICRP: ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007. V. 37, No. 2-4.
12. Akleyev A.V. Chronic radiation syndrome in Techa riverside residents. Chelyabinsk: Kniga; 2012: 461p. (in Russian).

Alexander V. Akleyev

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovskogo Str., 68-A, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: akleyev@urcrm.ru

13. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Comparative analysis of the risk of the mortality from solid malignant tumors for the public exposed at Techa river and East-Ural radioactive trace. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2017;26(1): 100–114 (in Russian).
14. Krestinina LYu, Silkin SS, Akleyev AV. Risk of hemoblastosis morbidity for the members of the East-Ural radioactive trace cohort. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2019;28(2): 36–50 (in Russian).

Received: December 24, 2019

For correspondence: Alexander V. Akleyev – Doctor of Medical Science, Professor, Honoured Science Worker of the Russian Federation, Director, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: akleyev@urcrm.ru)

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

Lyudmila Yu. Krestinina – Candidate of Medical Sciences, Head, Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Akleyev A.V., Krestinina L.Yu., Degteva M.O. Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 16-26. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26