

Радио-эпидемиологические исследования на Урале: итоги и перспективы

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

В статье представлены основные этапы и итоги 65-летних исследований канцерогенных последствий аварийного радиационного облучения населения Уральского региона. Радиоактивное загрязнение реки Течи и авария 1957 г. на производственном объединении «Маяк» явились причинами многолетнего облучения населения в широком диапазоне доз. Наиболее важными задачами исследования являлись реконструкция индивидуальных доз, прослеживание состояния здоровья и жизненного статуса членов когорт. Результаты исследований показали, что хроническое облучение человека по сравнению с острым не снижает риск развития злокачественных опухолей и лейкозов, а значение фактора мощности дозы не превышает единицу. Таким образом, по нашим данным, современные рекомендации Международной комиссии по радиологической защите занижают радиационный риск злокачественных опухолей и лейкозов при хроническом облучении населения в 2 раза. Перспективы дальнейших радио-эпидемиологических исследований на Урале связаны с анализом Уральской когорты аварийно-облученного населения, которая включает около 63 000 облученных людей и позволяет оценить радиационный риск солидных раков отдельных локализаций, лейкозов отдельных видов и нераковых эффектов.

Ключевые слова: радио-эпидемиологические исследования, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, злокачественные опухоли, лейкозы, фактор мощности дозы.

Введение

Радиоактивное загрязнение территорий Уральского региона и облучение населения связано с деятельностью и авариями на ПО «Маяк» – предприятии по переработке плутония для атомного оружия, которое начало работу в 1948 г. [1–3]. Наибольшее значение имели сбросы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в реку Течу и авария 1957 г. Регламентные и аварийные сбросы ЖРО с различных стадий технологического цикла радиохимического производства ПО «Маяк» в 1949–1956 гг. стали причиной значительного загрязнения реки Течи. 29 сентября 1957 г. в результате термохимического взрыва емкости хранилища ЖРО, расположенного на промышленной площадке ПО «Маяк», образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Причины обеих аварий достаточно подробно проанализированы и описаны [1–3].

Предпринятые защитные мероприятия по ряду причин оказались недостаточно эффективными, и, как следствие, население подверглось хроническому радиационному воздействию в широком диапазоне доз, включая высокие. Критическим органом по дозе облучения у населения Течи и ВУРСа являлся красный костный мозг (ККМ) вследствие значительного поступления остеотропного ⁹⁰Sr с продуктами питания местного про-

изводства [4]. С 1955 г. в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) ФМБА России проводится анализ медицинских последствий аварийного облучения жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа. По мнению Научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН), эти исследования являются чрезвычайно важными, так как позволяют проанализировать реально имевшие место эффекты хронического облучения человека [5]. Более того, сопоставление отдаленных последствий у жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа, а также у людей, переживших атомные бомбардировки в Японии (когорта «Life Span Study» – LSS), позволяет оценить значение фактора мощности дозы для радиационной индукции злокачественных новообразований (ЗНО).

Медицинское обследование населения прибрежных сел реки Течи было начато в 1951 г. специалистами мобильных бригад Московского института биофизики АМН СССР. В состав бригад также входили врачи медико-санитарной части ПО «Маяк», которые уже имели опыт диагностики лучевой патологии у персонала предприятия. Медицинские осмотры населения ВУРСа были начаты уже в первые дни после аварии. С 1955 г. и до настоящего времени наблюдение за состоянием здоровья населения

Аклеев Александр Васильевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

сел реки Течи и ВУРСа осуществляет клиническое отделение УНПЦ РМ ФМБА России [6].

Для организации долгосрочного медицинского наблюдения и анализа радиационного риска канцерогенных эффектов у населения была создана когорта реки Течи (КРТ), которая включает 29 730 лиц, постоянно проживавших в 1950–1960 гг. в прибрежных селах реки Течи и родившихся до начала сбросов ЖРО [1, 3]. Когорту ВУРСа (КВУРС) составляют 21 427 жителей из 22 переселенных и 15 непереселенных сел, которые родились до аварии и проживали на ВУРСе до отселения или до 31 декабря 1959 г. [2].

Для организации долгосрочного медицинского наблюдения было необходимо сформировать регистр облученных людей, определить территорию медицинского наблюдения, сформировать адекватные группы сравнения, организовать прослеживание мест проживания облученных лиц и их жизненного статуса, а также оценить дозы облучения. Первоочередной задачей являлось создание регистра облученных людей. Основным источником информации для формирования регистра являлись похозяйственные книги, которые ежегодно обновляются и содержат точные сведения об индивидах, состоящих в каждом хозяйстве села. Для отслеживания миграции членов когорт, которая была связана в том числе с радиоактивным загрязнением территорий Уральского региона и переселением части жителей, в течение всего периода наблюдения проводится мониторинг мест проживания облученных лиц. В настоящее время состояние здоровья членов КРТ прослеживается на территории наблюдения, которая включает всю территорию Челябинской и Курганской областей [3].

Дозы облучения населения в период радиоактивных сбросов и в ранние сроки после взрыва не измерялись, а их ретроспективная оценка длительное время представляла значительные сложности. Многолетний комбинированный характер радиационного воздействия (внешнее и внутреннее облучение) предполагал решение ряда сложных проблем, таких как восстановление гамма-полей в ареале жизнедеятельности населения, режима их поведения, оценки рациона и поступления радионуклидов с продуктами питания и речной водой и др. [1, 2].

Первые оценки доз внешнего излучения членов КРТ были сделаны для обоснования контрмер лишь в 1959 г., а для членов КВУРС – в ближайшие несколько дней после аварии. Основными исходными данными для расчета доз являлись результаты измерений гамма-полей в воздухе на территории населенных пунктов с учетом средней продолжительности пребывания жителей на улице и в помещениях. Эти дозовые оценки были получены только для критических групп населения [1]. Индивидуализированные оценки органических доз у членов КРТ и КВУРС стали возможны только в 1990-е гг., когда в рамках Межправительственного соглашения между Российской Федерацией и Соединенными Штатами Америки началась разработка дозиметрической системы реки Течи (TRDS) [7].

Необходимость динамического анализа состояния здоровья облученных людей предопределила создание медико-дозиметрической базы данных (БД). Первоначально БД была представлена на бумажных носителях, а в 1970-е гг. начала создаваться компьютерная

БД. В настоящее время она содержит всю персональную медицинскую и дозиметрическую информацию как о самих облученных лицах, так и об их потомках за период с 1951 г. и до настоящего времени. БД включает регистры идентификации, семейного анамнеза, содержания радионуклидов в организме, органических доз, факторов риска, диагнозов, причин смерти и др. БД является динамической системой и функционирует в режиме постоянного и регулярного пополнения и обновления информации [1].

Достижения в реконструкции доз у аварийно-облученного населения сел реки Течи и ВУРСа

История радиоактивного загрязнения территорий Урала

Основными источниками радиоактивного загрязнения территорий и облучения населения являлись события на ПО «Маяк»: 1) сбросы ЖРО радиохимического завода в реку Течу в 1949–1956 гг.; 2) взрыв в хранилище высокоактивных отходов и образование ВУРСа в 1957 г.; 3) выбросы радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу в 1949–1967 гг.; 4) ветровой перенос загрязнённого ила с берегов озера Карачай (открытого хранилища ЖРО) в 1967 г. Наиболее серьезные последствия имели первые две из перечисленных радиационных ситуаций. Карта-схема загрязнения территорий Урала долгоживущим ^{90}Sr через 50 лет после начала работы предприятия показана на рисунке 1.

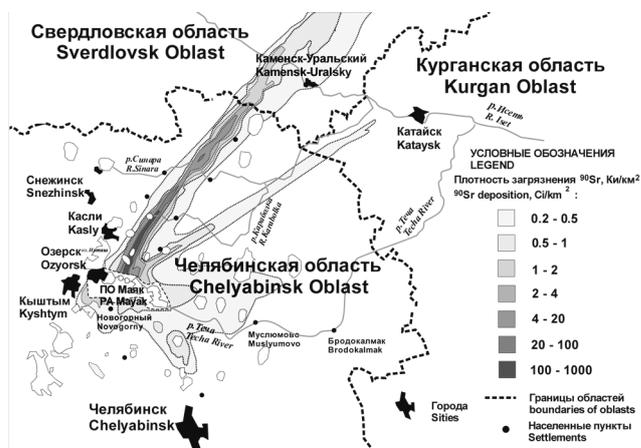


Рис. 1. Карта-схема загрязнения территорий Урала стронцием-90 по состоянию на 1997 г. (1 Ки/км² = 37 КБк/м²)
[Fig. 1. Schematic map of ^{90}Sr contamination of territories of the Urals region as of 1997 (1 Ci/km² = 37 kBq/m²)]

Анализ архивных материалов о технологии хранения и переработки ЖРО на ПО «Маяк» в 1949–1956 гг., которые стали доступны после 2000 г., позволил детально восстановить динамику сбросов радионуклидов в реку Течу, которая была основным источником питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения для жителей прибрежных населенных пунктов (НП) [8, 9]. Сбросы нетехнологических низкоактивных отходов ПО «Маяк» в реку Течу начались в январе 1949 г. (рис. 2). Летом 1950 г. в верховьях реки было проведено обследование воды и донных отложений, которое не выявило заметного радиоактивного загрязнения. Осенью 1950 г. начались регуляр-

ные сбросы технологических отходов низкой и средней активности. В дополнение к этому в 1951 г. случались аварийные утечки высокоактивных отходов из резервуаров-хранилищ. Максимальные уровни аварийных сбросов наблюдались в сентябре – октябре 1951 г. (см. рис. 2). С 28 октября 1951 г. все технологические сбросы были переключены на бессточное озеро Карачай, что привело к значительному уменьшению поступления радионуклидов в реку. В 1956 г. верховья Течи были перекрыты глухой плотиной, а для снабжения нижележащих участков реки чистой водой были построены обводные каналы. Таким образом, было остановлено дальнейшее загрязнение воды и поймы реки в местах проживания людей.

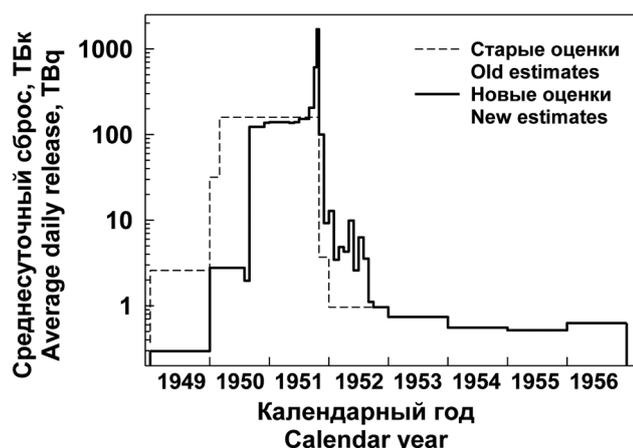


Рис. 2. Сбросы радиоактивных отходов ПО «Маяк» в реку Течу в 1949–1956 гг. Современные оценки из работ [8, 9] показаны в сравнении с оценками из более ранних исследований [10]
Fig. 2. Discharges of radioactive waste from the Mayak PA into the Techa River in 1949–1956. Current-day estimates from [8, 9] are shown in comparison with estimates from previous studies [10]

Регулярные измерения мощности дозы в воздухе в пойме и в населенных пунктах, а также радиоактивного загрязнения воды, донных отложений и пойменных почв на всём протяжении реки Течи (240 км) проводились с лета 1951 г. [3, 11]. Концентрации радионуклидов снижались с расстоянием от места сбросов. Основными путями облучения населения прибрежных НП были: поступление радионуклидов (главным образом, ^{89}Sr , ^{90}Sr и ^{137}Cs) в организм с речной водой и молоком, а также внешнее облучение от поймы реки, загрязнённой в 1951 г. в результате мощного весеннего паводка.

Как отмечалось выше, ВУРС образовался 29 сентября 1957 г. в результате выпадений из радиоактивного облака, которое сформировалось в результате взрыва ёмкости с жидкими высокоактивными отходами [12]. Радиоактивный след имел четкую ось и монотонный спад загрязнённости с расстояния от эпицентра взрыва (см. рис. 1). Были загрязнены обширные территории, населённые в основном сельскими жителями. Радиационно-гигиенический мониторинг на территории ВУРСа, который включал измерения мощности дозы в воздухе в населенных пунктах и вокруг них, а также многочисленные анализы радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных продуктов, проводился с первых дней после аварии. Основными путями облучения населения были:

поступление радионуклидов (главным образом, ^{144}Ce и ^{90}Sr) с продуктами питания (в основном, хлебом и молоком), а также внешнее облучение от загрязнённой почвы.

Реконструкция индивидуальных доз облучения населения загрязнённых территорий

Для дозиметрической поддержки эпидемиологических исследований была разработана специальная система реконструкции индивидуальных доз TRDS (Techa River Dosimetry System) [7, 13, 14]. В системные модули TRDS включена информация о мощностях доз в воздухе и динамике поступления радионуклидов для НП, расположенных на берегах реки Течи и территориях ВУРСа с начальной плотностью загрязнения $^{90}\text{Sr} \geq 0,1 \text{ Ки/км}^2$ ($3,7 \text{ кБк/м}^2$). Системные модули были получены на основе анализа большого объема первичных данных по радиоактивному загрязнению окружающей среды, продуктов питания и организма человека.

Измерения радиоактивного загрязнения воды, донных отложений и пойменных почв реки Течи были использованы для разработки специальной модели переноса радионуклидов в речной системе, которая позволила рассчитать концентрации радионуклидов в воде и пойменных почвах с начала сбросов в 1949 г. [9, 11]. Для расчёта мощности дозы в воздухе над загрязнённой радионуклидами почвой в пойме реки Течи использовался метод имитационного моделирования воздушной кермы [15]. Результаты расчётов мощности дозы в воздухе над береговой полосой хорошо согласуются с данными прямых измерений 1952–1956 гг. [16]. Расчетные оценки интегральной кермы были подтверждены результатами люминесцентных измерений накопленных доз в кирпичах старых зданий, расположенных на берегах реки Течи [17].

Дозовые коэффициенты, рассчитанные с использованием вычислительных фантомов, имитирующих тело человека разного пола и возраста, позволяют конвертировать воздушную керму в значения дозы на органы [18]. Также в расчётах доз внешнего облучения используются режимы поведения людей в загрязнённой пойме реки, которые зависят от возраста. Расчётные значения индивидуальных доз внешнего облучения на реке Тече были подтверждены результатами измерений поглощенной дозы в эмали зубов методом электронного парамагнитного резонанса и оценками частоты транслокаций в лимфоцитах периферической крови методом флуоресцентной *in situ* гибридизации [16, 19].

Для расчёта мощности дозы внешнего облучения на территории ВУРСа использовали те же методы, что и на реке Тече. Плотности радиоактивного загрязнения территории были взяты в соответствии с данными Атласа ВУРС [20].

Основой реконструкции доз внутреннего облучения являлся регистр измерений ^{90}Sr в организме, который включает около 10 000 посмертных измерений образцов костной ткани; данные прижизненных измерений ^{90}Sr в зубах, а также содержание ^{90}Sr во всем теле, измеренное на уникальном спектрометре излучений человека СИЧ-9.1 у 20 000 человек [21–23]. По измерениям ^{90}Sr в зубах жителей сел реки Течи была восстановлена динамика поступления радионуклида в организм в 1949–1956 гг. [24, 25]. Результаты измерений ^{90}Sr в костях и во всем теле у жителей ВУРСа позволили уточнить уровни поступления этого

радионуклида в организм [26]. Уникальные данные СИЧ-9.1 были использованы для разработки биокинетической модели, связывающей поступление стронция и его содержание в организме, с учётом изменений минерального обмена у мужчин и женщин в возрасте от рождения до 80 лет [27]. Поступление ¹³⁷Cs и других радионуклидов на реке Тече и на ВУРСе было оценено по данным о радиоактивном загрязнении воды, молока и других продуктов питания [26, 28]. Для расчёта доз внутреннего облучения использовались дозовые коэффициенты на единицу поступления из Публикации 67 МКРЗ [29].

Входными данными для расчёта индивидуальной дозы для каждого человека являются: год рождения, пол, история проживания на загрязнённых территориях и конечная точка накопления дозы (дата заболевания, смерти, миграции с наблюдаемой территории и т.п.). Комбинируя средние по НП данные для каждого календарного периода с историей проживания и возрастом конкретного

человека, TRDS продуцирует индивидуальный сценарий внешнего облучения и индивидуальные поступления радионуклидов, а затем рассчитывает соответствующие им дозы внешнего и внутреннего облучения. Необходимо отметить, что интенсивная миграция населения привела к тому, что многие люди облучались как на реке Тече, так и на ВУРСе.

В таблице 1 показаны основные этапы развития TRDS. В первой версии системы, TRDS-2000 [13, 14], рассчитывались дозы только от загрязнения реки Течи и были использованы имеющиеся на то время приблизительные оценки сбросов [9]. В 2006 г. стали доступны для анализа более детальные данные о сбросах [8, 9, 30], которые стали основой последующих версий системы: TRDS-2009 и TRDS-2016. Помимо этого, были включены дополнительные источники облучения: ВУРС и газо-аэрозольные выбросы ПО «Маяк» (см. табл. 1). Необходимо отметить, что дозы от ¹³¹I на щитовидную железу рассчитываются с

Сравнительные характеристики дозиметрических систем TRDS, разработанных в разные годы

Таблица 1

[Table 1

Comparative characteristics of the dosimetry systems TRDS developed in different years]

Основные характеристики системы расчёта доз [Major characteristics of the dose calculation system]	TRDS-2000	TRDS-2009	TRDS-2016
Информация о сбросах ЖПО в реку Течу [Information about LRW releases into the Techa River]	Приблизительные оценки сбросов, усреднённые по годам [Averaged annual approximate assessment of the releases]	Детальные оценки динамики сбросов [Detailed assessment of the release dynamics]	Уточнённые детальные оценки динамики сбросов [Improved detailed assessments of the release dynamics]
Дополнительные источники облучения населения Урала (кроме реки Течи) [Additional sources of population exposure in the Urals (besides the Techa River)]	Нет [No]	ВУРС [EURT]	ВУРС Рутинные газо-аэрозольные выбросы [EURT Operational gas-aerosol emissions]
Список радионуклидов, учтённых в расчётах доз [List of radionuclides considered in dose calculations]	⁹⁰ Sr, ⁸⁹ Sr, ¹³⁷ Cs, ⁹⁵ Zr, ⁹⁵ Nb, ¹⁴⁴ Ce, ¹⁰³ Ru, ¹⁰⁶ Ru	⁹⁰ Sr, ⁸⁹ Sr, ¹³⁷ Cs, ⁹⁵ Zr, ⁹⁵ Nb, ¹⁴¹ Ce, ¹⁴⁴ Ce, ¹⁰³ Ru, ¹⁰⁶ Ru	⁹⁰ Sr, ⁸⁹ Sr, ¹³⁷ Cs, ⁹⁵ Zr, ⁹⁵ Nb, ¹⁴¹ Ce, ¹⁴⁴ Ce, ¹⁰³ Ru, ¹⁰⁶ Ru, ¹³¹ I
Количество органов/тканей, на которые рассчитываются дозы [Number of organs/tissues the doses were calculated to]	9	23	23
Период поступления радионуклидов/ внешнего облучения [Time interval of radionuclide intake/external exposure]	1950–1960	1950–1980	1950–2009
Параметры индивидуализации доз внешнего и внутреннего облучения [Parameters of external and internal dose individualization]	История проживания на реке Тече, возраст, конечная точка накопления дозы [Residence history in the Techa River basin, end point of dose accumulation]	История проживания на реке Тече и ВУРСе, возраст, пол, конечная точка накопления дозы, измерения содержания ⁹⁰ Sr в организме [Residence history in the Techa River basin and in the EURT territory, age, gender, end point of dose accumulation, measurements of ⁹⁰ Sr body-burden]	История проживания на реке Тече и ВУРСе, возраст, пол, конечная точка накопления дозы, измерения содержания ⁹⁰ Sr в организме, локализация индивидуального хозяйства [Residence history in the Techa River basin and in the EURT territory, age, gender, end point of dose accumulation, measurements of ⁹⁰ Sr body-burden, location of the individual household]

Основные характеристики системы расчета доз [Major characteristics of the dose calculation system]	TRDS-2000	TRDS-2009	TRDS-2016
Результаты расчётов: Медиана / среднее / максимум индивидуальных доз в КРТ, мГр ККМ Желудок [Calculation results: Median/mean/ maximum individual dose in TRC, mGy RBM Stomach]	210 / 296 / 2000 6 / 28 / 450	240/420/ 9000 10 / 35 / 960	203 / 346 / 7920 20 / 59 / 1130
Оценка неопределённостей индивидуальных доз: Средний коэффициент вариации (минимум – максимум), % ККМ Желудок [Estimation of individual dose uncertainties: Mean variation coefficient (minimum – maximum), % Bone marrow Stomach]	Нет [No]	Нет [No]	140 (64–330) 98 (55–410)

помощью отдельного комплекса программ на основании данных по газо-аэрозольным выбросам, предоставленных ПО «Маяк» [31].

Важной характеристикой качества системы являются параметры индивидуализации доз. Если у человека в дополнение к его истории проживания имеются измерения ^{90}Sr в организме, то в TRDS-2009 и TRDS-2016 они используются для уточнения дозы внутреннего облучения (см. табл. 1). А если у человека имеются данные по расположению индивидуального хозяйства, где он проживал в начальный период загрязнения реки Течи, то эти данные также используются в TRDS-2016 для уточнения дозы внешнего излучения (см. табл. 1).

В настоящее время дозиметрическая система представляет собой комплекс из нескольких компьютерных программ: TRDS-2016D, которая рассчитывает точечные оценки индивидуальных доз [7], и TRDS-2016MC, которая рассчитывает вероятностные распределения, характеризующие неопределенности оценок индивидуальных доз [32]. В таблице 1 показаны основные характеристики оценок индивидуальных доз для членов КРТ [33]. Также приведены данные для ККМ, для которого наибольший вклад в дозу вносил ^{90}Sr , и для стенок желудка, для которых основным было внешнее облучение и поступление ^{137}Cs .

Как видно из таблицы 1, для ККМ значения медианы находятся на уровне 200–240 мГр, а оценки средней дозы – на уровне 300–400 мГр, то есть достаточно стабильны. Однако учёт на индивидуальном уровне измерений ^{90}Sr в организме привёл к значительному уширению диапазона доз в когорте и увеличению максимальных значений до 8–9 Гр. Что касается желудка, то здесь наблюдается заметная тенденция к увеличению оценок доз: например, среднее значение возрастает с 28 мГр (TRDS-2000) до

59 мГр (TRDS-2016). Это связано с уточнением сбросов, удлинением периода поступления долгоживущих радионуклидов и внешнего облучения (см. табл. 1), а также уточнением мощностей доз внешнего облучения и уровня поступления ^{137}Cs с молоком.

Неопределённости оценок индивидуальных доз, которые имеются только для TRDS-2016, характеризуются средним по когорте коэффициентом вариации, равным 140% для ККМ и 98% для желудка. При этом нужно отметить, что неопределённости тоже оценивались на индивидуальном уровне для всех членов когорты, и для отдельных людей (при наличии дополнительных уточняющих дозу данных) индивидуальные коэффициенты вариации понижаются до уровней 55–64% (см. табл. 1). В целом, можно сказать, что оценки неопределенностей в TRDS-2016 сопоставимы с аналогичными оценками, которые были получены с использованием дозиметрических систем, основанных на реконструкции радиоактивного загрязнения окружающей среды в других радиационных ситуациях [34].

Радиационный риск канцерогенных эффектов у населения прибрежных сел реки Течи и ВУРСА

Исследуемые когорты

Для оценки отдаленных эффектов облучения населения на качественном уровне, кроме информации об индивидуальных дозах, были необходимы регистр облученных лиц, данные наблюдений за их жизненным статусом, информация о заболеваемости и причинах смерти.

Река Теча, в которую осуществлялись сбросы ЖРО ПО «Маяк», протекает по территории 5 районов Челябинской области, включавшей 26 прибрежных населенных пунктов, и 2 районов Курганской области с 15 прибрежными

селами. В конце 1950-х гг. одновременно с первыми медицинскими осмотрами жителей была начата регистрация населения прибрежных сел. В 1967 г. была зафиксирована Оригинальная когорта реки Течи, включавшая жителей прибрежных сел Течи, родившихся до 01.01.1950 г. и проживавших на реке в период с 1950 по 1952 г. Позже в когорту были добавлены лица, проживавшие в прибрежных селах с 1953 по 1960 г. Лица, приехавшие в прибрежные села после 1960 г., в когорту не включались в связи со значительным улучшением радиационной обстановки к тому времени и значительно более низкими дозами облучения. Общая численность КРТ составила около 30 000 человек [1, 3].

Когорта ВУРСа была сформирована в конце 1980-х гг. и включала около 24 000 человек, родившихся до аварии и проживавших во время аварии на территории 22 населенных пунктов, население которых было переселено на более чистые территории, и 15 населенных пунктов, наиболее близко прилегающих к эпицентру взрыва, но с плотностями загрязнения, не превышавшими 2 Ки/км² по ⁹⁰Sr [11]. Основные характеристики когорты представлены в таблице 2 [35–39].

Территория и период наблюдения, источники информации

В связи с процессами миграции населения территория наблюдения (ТН) за облученными жителями, их заболеваемостью и смертностью была шире территории мест первоначального проживания в прибрежных селах. Она также определялась возможностями сбора информации о местах проживания, онкологической заболеваемости и причинах смерти. Основными источниками информации о местах проживания вплоть до 2008 г. являлись запросы в адресные бюро (с 2006 г. отделы адресно-справочной работы УФМС России) по Челябинской и Курганской

областям. Для причин смерти основным источником являлись медицинские свидетельства о смерти или их копии, которые были доступны для резидентов всех НП Челябинской и Курганской областей [1, 3]. Обе области были определены как территория наблюдения за причинами смерти (ТНС).

Основным источником информации о случаях ЗНО являлось «Извещение о больном с впервые в жизни установленным диагнозом рака или другого злокачественного новообразования» (ф.090/у). Регулярный доступ к этой информации был возможен только для 5 районов Челябинской области (Каслинский, Кунашакский, Красноармейский, Аргаяшский и Сосновский), по которым протекала Теча и которые включали территорию ВУРСа, а также для мест наиболее частой миграции облученного населения (г. Челябинск и г. Озерск). Данная территория была определена как территория наблюдения за заболеваемостью ЗНО [1, 3].

Период наблюдения для анализа смертности и заболеваемости также отличался в связи с доступностью для анализа информации. Если причины смерти в России регистрировались в отделах ЗАГС, начиная с декабря 1917 г. (после официального отстранения Русской православной церкви от выполнения этой функции), то официальная регистрация онкологических заболеваний на государственном уровне фактически началась во второй половине 1950-х гг. В связи с этим период наблюдения за смертностью начинается с первых дней наблюдения, связанных с началом облучения, т.е. с 01.01.1950 г., а за заболеваемостью ЗНО – с 01.01.1956 г. Указанные различия периодов наблюдения объясняют разную численность когорты при анализе смертности и заболеваемости ЗНО.

Основными источниками информации для создания регистра облученного населения являлись: похозяй-

Таблица 2

Сравнительные характеристики Уральских когорт

[Table 2]

Comparative characteristics of the Urals cohorts

Параметр [Parameter]	КРТ [TRC]	КВУРС [EURTC]
Начало наблюдения [Start of follow-up]	01.01.1950	29.09.1957
Численность [Size]	29 730	21 427
Возраст на начало облучения [age at the onset of exposure] < 20 лет, [years old], %	Все возрасты [all ages] 43	Все возрасты [all ages] 42
Женщины [Women], %	58	56
Тюрки [Tyurkits], %	20	40
Доза средняя (максимальная), мГр [Mean dose (maximum), mGy]		
на костный мозг [to bone marrow]	346 (7 920) [33]	90 (7 180) [38]
на стенки желудка [to stomach wall],	59 (1 130) [33]	36 (1 130) [39] 11 (121)*

* – исключая 2055 человек, дополнительно облученных на реке Тече [* – excluding 2,055 persons additionally exposed on the Techa River].

ственные книги, результаты переписи и медицинского наблюдения населения сотрудниками УНПЦ РМ [1, 3].

В связи с длительным периодом наблюдения было принято решение кодировать причины смерти и случаи ЗНО согласно правилам МКБ-9 (1977 г.).

Как уже отмечалось, в течение многолетнего наблюдения имела место миграция облученного населения. Члены когорт, выехавшие с территории наблюдения на постоянное проживание в другие регионы, попадали в группу мигрантов, начиная с даты выезда. Часть людей (чаще молодого возраста) могла быть потеряна на ТН, если официально не меняла свою регистрацию в связи с переездом на учебу, новые места работы, по новому адресу проживания в связи с созданием семьи. Информация о жизненном статусе членов КРТ и КВУРС по опубликованным данным на конец 2007 г. и 2006 г. соответственно [40] представлена в таблице 3.

Поскольку наблюдение членов КРТ началось почти на 8 лет раньше, чем членов КВУРС, то к концу периода наблюдения доля умерших на ТНС в КРТ была в 1,5 раза выше, тогда как доля потерянных из наблюдения на ТНС в КВУРС была больше, чем в КРТ в 2,7 раза. По-видимому, большая часть потерянных из наблюдения облученных людей покинула радиоактивно-загрязненные территории в первые годы после аварий без регистрации отъезда. Большие потери в КВУРС были связаны с более поздним формированием когорты (через 30 лет после аварии). Данные потери уменьшают статистическую силу анализа, но не должны привести к значимым смещениям радиационного риска, так как эти процессы не были связаны с дозой облучения. Кроме того, цензурирование данных с использованием точной даты выезда из наблюдения (исключение из анализа как случаев, так и человеко-лет после этой даты) минимизирует возможное смещение оценок риска. Доля мигрантов, выехавших за пределы двух областей к концу наблюдения, была одинаковой и составила около 16%.

Радиационный риск канцерогенных эффектов

Исследования радиационных последствий у членов КРТ в первые 30 лет после облучения показали тенденцию к увеличению показателей смертности и заболеваемости как от лейкозов, так и в целом от ЗНО с увеличением дозы [41].

Создание дозиметрической системы TRDS позволило рассчитать органные индивидуальные дозы для членов когорт и величины избыточного относительного риска (ИОР) смертности и заболеваемости от ЗНО. Исследования показали достоверное увеличение ИОР смертности от лейкозов и солидных ЗНО [42], а также заболеваемости солидными ЗНО и лейкозами у членов КРТ на единицу дозы [35, 36].

Последние оценки величин ИОР солидных ЗНО в обеих когортах представлены в таблице 4. Зависимость смертности [40, 42] и заболеваемости [36, 38] солидными ЗНО от дозы облучения в обеих когортах хорошо описывается линейной моделью, а величины ИОР сопоставимы для смертности и заболеваемости в когортах. ИОР смертности от солидных раков имел близкие значения в КРТ и всей КВУРС. Атрибутивный риск смертности от солидных раков в исследованных когортах составлял от 1,6 до 2,4%, а для заболеваемости – от 1,7 до 3,6%.

Важно отметить, что КВУРС включает 2055 членов КРТ, которые до аварии 1957 г. проживали в верховьях реки Течи и были переселены на территории, впоследствии ставшие частью ВУРС. Для исключения влияния доз облучения, полученных на реке Тече, у членов КВУРС был оценен ИОР солидных ЗНО в субкогорте КВУРС при исключении из нее лиц, ранее проживавших в прибрежных селах реки. Как видно из таблицы 4, у членов этой субкогорты не отмечалось статистически значимого повышения ИОР заболеваемости и смертности от солидных ЗНО.

Анализ радиационного риска заболеваемости всеми формами лейкозов, а также лейкозами при исключении хронического лимфолейкоза (ХЛЛ) в КРТ показал статистически значимо высокий ИОР (табл. 5). В КВУРС не

Жизненный статус членов когорты

Vital status of the cohort members]

Жизненный статус на 31.12.2018 г. [Vital status as of December 31, 2018]	КРТ на 31.12.2007 г. [TRC as of 31.12.2007]		КВУРС на 31.12.2006 г. [EURTC as of 31.12.2006]	
	n	%	n	%
Жив [Alive]	5 684	19	5 731	27
Умер, включая [Deceased, including]	17 307	58	8 016	37
Причина смерти известна [Known cause of death]	15 763	91	7 164	89
Потерянные из наблюдения [Lost to follow-up]	2 043	7	4 169	19
Всего на ТНС* к концу наблюдения [Total in the MCA* as of the end of the follow-up]	25 034	84	17 916	84
Мигранты [Migrants]	4 696	16	3 511	16
Всего [Total]	29 730	100	21 427	100

*ТНС – территория наблюдения за смертностью [Note: *MCA – mortality catchment area].

Таблица 3

[Table 3

Величины ИОР развития солидных ЗНО в КРТ и КВУРСа

Таблица 4

[Table 4]

ERR values of solid cancers in TRC and EURTC]

Параметры [Parameters]	КРТ [TRC]	КВУРС [EURTC]	
		вся когорта [Total]	исключая облученных на реке [excluding exposed on the river]
Смертность от солидных ЗНО [Solid cancer mortality]			
Период наблюдения [Follow-up period]	1950–2007	1957–2006	1957–2006
Число солидных ЗНО [Number of solid cancers]	2303	1039	866
Избыточные ЗНО [Excess cases], (атрибутивный риск, %) ([attributable risk, %])	50 (2,2)	25 (2,4)	14 (1,6)
ИОР/100 мГр [ERR/100mGy]	0,06	0,06	0,15
95% доверительный интервал [95% confidence interval]	0,004; 0,13	0,001; 0,13	–0,21; 0,63
Заболеваемость солидными ЗНО [Solid cancer incidence]			
Период наблюдения [Follow-up period]	1956–2007	1957–2014	1957–2014
Число солидных ЗНО [Number of solid cancers]	1933	1609	1366
Избыточные ЗНО [Excess cases], (атрибутивный риск [attributable risk], %)	69 (3,6)	37(2,3)	23 (1,7)
ИОР/100 мГр [ERR/100mGy]*	0,08	0,05	0,16
95% доверительный интервал [95% confidence interval]	0,01; 0,15	0,01; 0,10	–0,06; 0,42

* – с коррекцией на курение [36] [* – smoking adjusted [36]] .

Избыточный относительный риск (линейная модель) заболеваемости лейкозами в КРТ и КВУРСа

Таблица 5

[Table 5]

Excess relative risk (linear model) of leukemia incidence in TRC and EURTC]

Параметры [Parameters]	КРТ [35] [TRC]	КВУРС [38] [EURTC]
Период наблюдения [Follow-up period]	1953–2007	1957–2009
Число лейкозов (лейкозов без ХЛЛ) [Number of leukemias (excluding CLL)]		
Все лейкозы [All leukemias]	99	37
Исключая ХЛЛ [Excluding CLL]	72	29
Атрибутивный риск [Attributable risk], %		
Все лейкозы [All leukemias]	30	10
Исключая ХЛЛ [Excluding CLL]	47	11
ИОР/100 мГр (95% доверительный интервал) [ERR/100mGy, (95% confidence interval)]		
Все лейкозы [All leukemias]	0,12 (0,04; 0,24)	0,10 (nf <0; 0,37)
Исключая ХЛЛ [Excluding CLL]	0,22 (0,08; 0,54)	0,12 (nf <0; 0,45)

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 program].

выявлено статистически значимого повышения ИОР заболеваемости всеми лейкозами и лейкозами при исключении ХЛЛ [35, 38].

Перспективы исследования Уральской когорты аварийно-облученного населения (УКАОН)

В ходе проспективного наблюдения за состоянием здоровья членов КРТ и КВУРС разработана и использо-

вана единая методология многолетнего прослеживания когорт и анализа медико-дозиметрических данных. Была определена ТН, источники информации о случаях заболеваний и причинах смерти, выработаны единые методы и технологии наблюдения за здоровьем облученного населения, жизненным статусом, процессами миграции и др. Для расчета индивидуальных органических доз в обеих когортах была разработана единая дозиметрическая си-

стема TRDS-2016 и сделаны оценки неопределенностей органных доз.

Единые методы наблюдения и источники информации, общая территория проживания (Уральский регион), сходные социально-экономические условия жизни, одинаковый поло-возрастной и этнический состав облученного населения, близкие годы возникновения аварий и единая дозиметрическая система позволили создать в настоящее время Уральскую когорту аварийно-облученного населения (УКАОН). Она объединяет лиц, подвергшихся хроническому облучению в обеих радиационных авариях в период с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г. УКАОН также включает внутриутробно облученных людей и потомков облученных, если они облучились в указанный период постнатально.

УКАОН, которая в англоязычных публикациях получила название «South Urals Population Exposed to Radiation» (SUPER), была сформирована в 2018 г., и ее потенциальная численность в соответствии с вышеприведенными критериями составила около 63 000 человек [43]. Состав когорты представлен на рисунке 3.

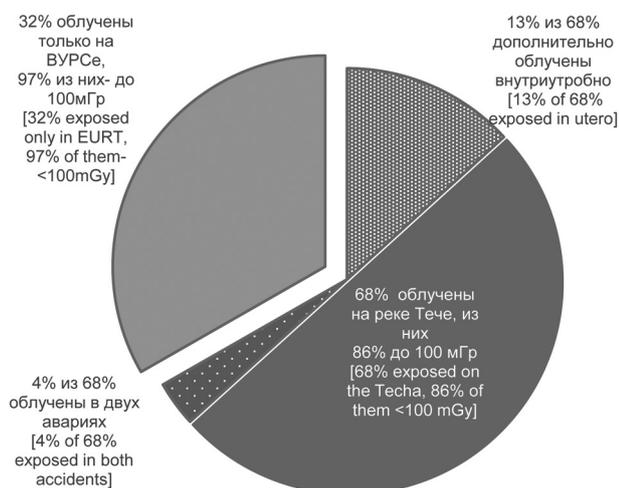


Рис. 3. Структура Уральской когорты аварийно-облученного населения (УКАОН)
[Fig.3. Structure of the South Urals Population Exposed to Radiation (SUPER) cohort]

Объединение аварийно-облученного населения Уральского региона в единую когорту позволило увеличить численность когорты более чем в 2 раза по сравнению с КРТ и КВУРС и привело к увеличению статистической силы исследования. Число человеко-лет под наблюдением в когорте УКАОН к 2017 г. составило 1 283 267, число случаев смерти – около 30 000, а число случаев заболеваний солидными раками – более 4500. Дальнейшее увеличение периода наблюдения также позволит повысить статистическую силу исследования новой когорты.

Первые исследования УКАОН подтвердили статистически значимый риск заболеваемости солидными ЗНО. Всего за период с 1956 по 2017 г. в аналитической когорте было зарегистрировано 4537 случаев солидных ЗНО, из них 167 случаев (3,7%) могли быть связаны с облучением. Величина ИОР/100 мГр, согласно линейной модели, составила 0,075 (95% ДИ: 0,04–0,11), $p < 0,001$ [43].

Снижение неопределенностей радиационного риска в УКАОН будет достигнуто и за счет совершенствования дозиметрической системы, и за счет снижения неопределенностей оценки доз облучения. Перспективы развития дозиметрической системы для оценки доз в когорте УКАОН связаны с включением в систему модуля для расчета доз внутриутробного облучения; использованием современной дозиметрической модели скелета для уточнения доз от $^{89,90}\text{Sr}$; расширением и обновлением системных модулей; усовершенствованием программ расчета вероятностных распределений, характеризующих неопределенности оценок индивидуальных доз.

В свою очередь, повышение статистической силы исследования УКАОН позволит:

- сделать прямые оценки ИОР на единицу дозы для заболеваемости и смертности от отдельных нозологий онкологических заболеваний и нераковых заболеваний (таких как болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера и др.), а также для отдельных поло-возрастных групп населения (например, облученных в детском возрасте или внутриутробно);
- оценить пожизненный риск канцерогенных и нераковых эффектов;
- оценить модифицирующее влияние нерадиационных факторов на индукцию стохастических эффектов радиации;
- оценить значение фактора мощности дозы у человека для различных стохастических эффектов радиации.

Заключение

В статье представлены основные итоги радио-эпидемиологических исследований канцерогенных последствий хронического облучения в КРТ и КВУРС, проведенных в УНПЦ РМ в период с 1955 по 2021 г. В результате 65-летних исследований в обеих когортах:

- прослежено состояние здоровья, жизненный статус и места проживания облученных людей с использованием унифицированных подходов и источников информации;
- ретроспективно восстановлены индивидуальные значения годовых поглощенных доз (с начала облучения до даты выхода из-под наблюдения) в 23 органах от внешнего и внутреннего излучений;
- на основании вариабельности исходных данных оценена неопределенность индивидуальных доз;
- оценен радиационный риск онкологических заболеваний (солидных раков и лейкозов) у населения, подвергшегося многолетнему низкоинтенсивному облучению в широком диапазоне доз, представленного людьми разного возраста, пола и с различным исходным состоянием здоровья.

Результаты исследований на реке Тече показали, что хроническое радиационное воздействие на человека не снижает риск злокачественных опухолей и лейкозов по сравнению с острым облучением, как это принято Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) в настоящее время [44]. Сравнивая значения радиационного риска лейкозов в КРТ (исключая ХЛЛ) и в когорте LSS [45], можно отметить статистически значимо повышенные, но очень близкие значения ИОР на единицу дозы. Полученные данные свидетельствуют о том, что радиационный риск лейкозов вследствие облучения в широком диапазоне доз с высокой и низкой мощностью

дозы является сопоставимым. Из этого можно сделать вывод, что протрагирование облучения человека не оказывает влияния на радиационный риск лейкозов, а фактор мощности дозы равен единице.

Фактор дозы и мощности дозы для индукции радиацией солидных ЗНО также близок к единице. ИОР солидных раков, по данным онкологической заболеваемости и смертности в КРТ, в которой преобладали малые дозы хронического облучения, был сопоставим с таковым у людей, переживших атомные бомбардировки и подвергшихся острому облучению преимущественно в больших дозах [46–48]. Сопоставимые оценки радиационного риска лейкозов и солидных раков были отмечены в когортах LSS и INWORKS [49].

Таким образом, из наших данных следует, что современные рекомендации МКРЗ занижают радиационный риск солидных раков и лейкозов при хроническом облучении населения в 2 раза. В этой связи необходимо отметить, что Всемирная организация здравоохранения в отчете, посвященном прогнозу канцерогенных последствий аварии на АЭС «Фукусима-1», использовала оценки канцерогенных рисков, полученных в КРТ [50]. Оценивая качество радио-эпидемиологических исследований, НКДАР ООН в 2018 г. на основе организации нескольких наблюдений за облученными людьми, включая вышеприведенные Уральские исследования, разработал критерии качества исследований в радиационной эпидемиологии [51].

Вместе с тем, важно отметить, что даже 65-летнее прослеживание КРТ и КВУРС не позволило получить ответов на ряд вопросов. Ограниченность этих когорт, обусловленная, прежде всего, их численностью, не позволила оценить радиационный риск злокачественных опухолей отдельных локализаций и различных типов лейкозов, а также отдельных форм сердечно-сосудистых заболеваний и более редких нейродегенеративных заболеваний.

Для решения вышеуказанных проблем в настоящее время в УНПЦ РМ сформирована УКАОН, которая включает всех аварийно-облученных жителей Уральского региона (около 63 000 человек). Увеличение доли членов когорты с малыми дозами позволит уточнить значения ИОР солидных раков и нераковых эффектов при облучении человека малыми дозами и с низкой мощностью дозы.

В рамках исследования УКАОН планируется продолжить работу, направленную на снижение неопределенностей индивидуализированных доз облучения членов новой когорты. Оценка неопределенностей доз позволит оценить неопределенности в оценках радиационного риска отдаленных последствий хронического облучения человека.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России и в рамках Межправительственного соглашения между РФ и США «О сотрудничестве в области изучения радиационных воздействий с целью минимизации последствий радиоактивного загрязнения на здоровье человека и окружающую среду».

Авторы признательны сотрудникам отдела «База данных» УНПЦ РМ (заведующий Н.В. Старцев) за прослеживание жизненного статуса членов когорт, биофизической

лаборатории УНПЦ РМ за оценку индивидуализированных доз облучения и эпидемиологической лаборатории УНПЦ РМ, участвовавшей в сборе и подготовке данных для анализа.

Литература

1. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: Медбиоэкстрем, 2001. 531 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. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи / под ред. А.В. Аклеева. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
4. Akleyev A.V., Degteva M.O. Radioecological consequences of radioactive releases due to weapons-grade plutonium production at the «Mayak» facility in the Russian Federation // *Journal of Radiological Protection*. 2021. Vol. 41, No 2. P. 67–78. DOI:10.1088/1361-6498/abdfbb.
5. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations. 2011. 82 p.
6. Akleyev A.V. Specific features of medical care provision to the population of the Techa riverside settlements // *Journal of Radiological Protection*. 2021. DOI:10.1088/1361-6498/ac0c02; 2021.
7. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I., et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // *Health Physics*. 2019. Vol. 117, No 4. P. 378–387.
8. Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobiova M.I. et al. Re-evaluation of waterborne releases of radioactive materials from the «Mayak» Production Association into the Techa River in 1949–1951 // *Health Physics*. 2012. Vol. 102. P. 25–38.
9. Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И., и др. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949–1956 годах // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, № 5. С. 1–12.
10. Vorobiova M.I., Degteva M.O., Burmistrov D.S., et al. Review of historical monitoring data on Techa River contamination // *Health Physics*. 1999. Vol. 76. P. 605–618.
11. 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 // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2012. Vol. 51. P. 349–366.
12. Akleyev A.V., Krestinina L.Yu., Degteva M.O., Tolstykh E.I. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 // *Journal of Radiological Protection*. 2017. Vol. 37, No 3. P. 19–42. DOI: 10.1088/1361-6498/aa7f8d.
13. Degteva M.O., Kozheurov V.P., Tolstykh E.I., et al. The Techa River Dosimetry System: Methods for the reconstruction of internal dose // *Health Physics*. 2000. Vol. 79. P. 24–35.
14. 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 // *Radiation Research*. 2006. Vol. 166. P. 255–270.
15. Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б.А. Оценка мощностей доз в воздухе при неравномерном вертикальном распределении -излучающих радионуклидов в различных типах почв // *Вопросы радиационной безопасности*. 2016. № 3. С. 43–52.
16. Дегтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., и др. Использование методов ЭПР и FISH для реконструкции доз у людей, облучившихся на реке Теча // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2017. Т. 57, № 1. С. 30–41.

17. Hiller M.M., Woda C., Bougrov N.G., et al. External dose reconstruction for the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modelling // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2017. Vol. 56, No 2. P. 139-159. DOI: 10.1007/s00411-017-0688-3.
18. Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б.А. Дозовые коэффициенты для конвертации воздушной кермы в значения мощности дозы в органах людей разного возраста при внешнем облучении от ^{137}Cs в почве // *Вопросы радиационной безопасности*. 2018. Т. 89, № 1. С. 36-47.
19. Shishkina E.A., Volchkova A.Yu., Timofeev Y.S., et al. External dose reconstruction in tooth enamel of Techa riverside residents // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2016. Vol. 55, No 4. P. 1-23. DOI 10.1007/s00411-016-0666-1.
20. Израэль Ю.А., Василенко В.Н., Снакин В.В., и др. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года. Москва: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2013. 140 с.
21. Kozheurov V.P. SICN-9. 1-A unique whole-body counting system for measuring Sr-90 via bremsstrahlung: The main results from a long-term investigation of the Techa River population // *Science of the Total Environment*. 1994. Vol. 14, No 1-2. P. 37-48.
22. Толстых Е.И., Бугров Н.Г., Кривошапов В.А., и др. Результаты прижизненных измерений стронция-90 в организме жителей Уральского региона: анализ данных за 2006-2012 гг. // *Радиационная гигиена*. 2013. Т. 6, № 1. С. 5-11.
23. Дёгтева М.О., Толстых Е.И., Суслова К.Г., и др. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 3. С. 30-39.
24. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90 // *Health Physics*. 2011. Vol. 101, No 1. P. 28-47.
25. Толстых Е.И., Дёгтева М.О., Кривошапов В.А., Напье Б.А. Метод оценки индивидуальных значений поступления ^{90}Sr с рационом на основе измерений зубного датчика у жителей прибрежных сёл р. Теча // *Вопросы радиационной безопасности*. 2019. Т. 93, № 4. С. 55-63.
26. Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O., Napier B.A. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011) // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2017. Vol. 56, No 1. P. 27-45. DOI 10.1007/s00411-016-0677-y.
27. 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.
28. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ^{137}Cs // *Health Physics*. 2013. Vol. 104, No 5. P. 481-498.
29. ICRP, 1993. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67 // *Ann. ICRP*. 1993. Vol. 23, No 3-4.
30. Anspaugh L.R., Degteva M.O., Vorobiova M.I., et al. Dosimetry for members of the Extended Techa River Cohort // *Health Physics*. 2006. Vol. 91, No 4. P. 393-394.
31. Napier B.A., Eslinger P.W., Tolstykh E.I., et al. Calculations of individual doses for Techa River Cohort members exposed to atmospheric radioiodine from Mayak releases // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 178-179. P. 156-167. DOI 10.1016/j.jenvrad.2017.08.013
32. Напье Б.А., Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Анспо Л.П. Анализ неопределенностей в дозиметрической системе реки Теча // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2013. Т. 58, № 1. С. 5-28.
33. Дёгтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И., и др. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облученных в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2019. Т. 64, № 3. С. 46-53.
34. Drozdovitch V., Chumak V., Kesminiene A., et al. Doses for post-Chernobyl epidemiological studies: are they reliable? // *Journal of Radiological Protection*. 2016. Vol. 36, No 3. P. 36-73. DOI: 10.1088/0952-4746/36/3/R36.
35. Krestinina L.Yu., Davis F.G., Schonfeld S., et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953-2007 // *British Journal of Cancer*. 2013. Vol. 109. P. 2886-2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614.
36. Davis F.G., Krestinina L.Yu., Preston D., et al. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956-2007 // *Radiation Research*. 2015. Vol. 184, No 1. P. 56-65. DOI: <http://dx.doi.org/10.1667/RR14023.1>.
37. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Епифанова С.Б. Анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на территории Восточно-уральского радиоактивного следа за 50-летний период // *Радиационная гигиена*. 2014. Том 7, № 1. С. 23-29.
38. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Аклев А.В. Риск заболеваемости гемобластомами у членов когорты Восточно-Уральского радиоактивного следа // *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2019. Т. 28, № 2. С. 36-50. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-2-36-50.
39. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклев А.В. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа населения за 1957-2014 гг. // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020. Т. 65, № 4. С. 58-64. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64.
40. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., и др. Сравнительный анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на реке Тече и Восточно-Уральском Радиоактивном Следе // *Радиация и риск*. 2017. Т. 26. № 1. С. 100-114. DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-100-114.
41. Косенко М.М., Аклев А.В., Старцев Н.В., и др. Эпидемиологический анализ отдаленных канцерогенных последствий хронического облучения населения Урала // *International Journal of Radiation Medicine*. 1999. Т. 2, № 2. С. 34-41.
42. Schonfeld S.J., Krestinina L.Yu., Epifanova S.B., et al. Solid Cancer Mortality in the Techa River Cohort (1950-2007) // *Radiation Research*. 2013. Vol. 179. P. 183-189. DOI: 10.1667/RR2932.1.
43. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956-2017 // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 3. С. 6-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
44. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // *Ann ICRP*. 2007. 331 p.
45. Hsu W.-Li., Preston D.L., Soda M., et al. The Incidence of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma among Atomic Bomb Survivors: 1950-2001 // *Radiation Research*. 2013. Vol. 179, No 3. P. 361-382. DOI: 10.1667/RR2892.1
46. Grant E.J., Brenner A., Sugiyama H., et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009 // *Radiation Research*. 2017. Vol. 187, No 5. P. 513-537. DOI: 10.1667/RR14492.1.
47. Ozasa K., Shimizu Y., Suyama A., et al. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases // *Radiation*

- Research. 2012. Vol. 177. P. 229–243. DOI: 10.1667/RR2629.1.
48. Preston D.L., Sokolnikov M.E., Krestinina L.Yu., Stram D.O. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and Atomic bomb survivor studies // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 173. P. 26–31.
49. Leurad K., Richardson D.B., Cardis E., et al. Risk of cancer associated with low-dose radiation exposure: comparison of results between the INWORKS nuclear workers study and the A-bomb survivors study // Radiation and Environmental Biophysics. 2021. Vol. 60. P. 23–39. DOI:10.1007/s00411-020-00890-7. doi:10.1093/rpd/ncw316.
50. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. Geneva: World Health Organization. 2013. 166 p.
51. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations. 2018. 184 p.

Поступила: 13.09.2021 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. Радио-эпидемиологические исследования на Урале: итоги и перспективы // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 31–44. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44

Radioepidemiological studies in the Urals: outcomes and future directions

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 presents the key milestones and outcomes of 65-year studies of the carcinogenic consequences of accidental radiation exposure of the population of the Urals region. The radioactive contamination of the Techa River and the 1957 accident at the Mayak PA were the reasons for the long-term exposure of the population at a wide range of doses. The most important tasks of the study were the reconstruction of individual doses, follow-up of the health and life status of cohort members. The research results have shown that chronic human exposure, in comparison to acute exposure, does not reduce the risk of developing malignant tumors and leukemias, and the value of the dose-rate factor does not exceed “one”. Thus, according to our data, the current recommendations of the International Commission on Radiological Protection underestimate the radiation risk of malignant tumors and leukemias in case of chronic exposure of the population by a factor of two. Prospects for further radio-epidemiological studies in the Urals are associated with the analysis of the cohort of Southern Urals Populations Exposed to Radiation (SUPER), which includes about 63 thousand exposed people and makes it possible to assess the radiation risk of solid cancers of certain localizations, certain types of leukemia, and non-cancer effects.

Key words: radio-epidemiological studies, Techa River, East Urals Radioactive Trace, malignant tumors, leukemias, dose-rate factor.

Alexander V. Akleyev

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovskogo Str., 68-A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: akleyev@urcrm.ru

References

1. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Eds. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 531 p. (In Russian).
2. Ecological and medical consequences of the 1957 radiation accident at Mayak PA. Eds. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 294 p. (In Russian).
3. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Ed. Akleyev AV. Chelyabinsk: Kniga; 2016. 390 p. (In Russian).
4. Akleyev AV, Degteva MO. Radioecological consequences of radioactive releases due to weapons-grade plutonium production at the 'Mayak' facility in the Russian Federation. *Journal of Radiological Protection*. 2021 Jun;41(2): S67–S78. DOI:10.1088/1361-6498/abdfbb.
5. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations. 2011. 82 p.
6. Akleyev AV. Specific features of medical care provision to the population of the Techa riverside settlements. *Journal of Radiological Protection*. 2021 Jun; DOI:10.1088/1361-6498/ac0c02.
7. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019 Oct;117(4): 378–387.
8. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, Napier BA. Re-evaluation of waterborne releases of radioactive materials from the "Mayak" Production Association into the Techa River in 1949-1951. *Health Physics*. 2012 Jan; 102(1): 25–38.
9. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Shishkina EA, Tolstykh EI, Akleyev AV. Current view of the Techa River radioactive contamination in 1949-1956. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(5): 1-12. (In Russian).
10. Vorobiova MI, Degteva MO, Burmistrov DS, Safronova NG, Kozheurov VP, Anspaugh LR, et al. Review of historical monitoring data on Techa River contamination. *Health Physics*. 1999 Jun;76(6): 605–618.
11. Shagina NB, Vorobiova MI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shishkina EA, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949-1951 as a result of releases from the "MAYAK" Production Association. *Radiation Environmental Biophysics*. 2012 Nov;51(4): 349-366.
12. Akleyev AV, Krestinina LYU, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957. *Journal of Radiological Protection*. 2017 Sep;37(3): R19-R42. DOI: 10.1088/1361-6498/aa7f8d.
13. Degteva MO, Kozheurov VP, Tolstykh EI, Vorobiova MI, Anspaugh LR, Napier BA, et al. The Techa River Dosimetry System: Methods for the reconstruction of internal dose. *Health Physics*. 2000 Jul;79(1): 24–35.
14. Degteva MO, Vorobiova MI, Tolstykh EI, Shagina NB, Shishkina EA, Anspaugh LR, et al. Development of an improved dose reconstruction system for the Techa River population affected by the operation of the Mayak Production Association. *Radiation Research*. 2006 Jul;166(1 Pt 2): 255–70.
15. Shishkina EA, Volchkova AYU, Degteva MO, Napier BA. Evaluation of dose rates in the air at non-uniform vertical distribution of gamma-emitting radionuclides in different types of soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2016;3: 43-52. (In Russian).
16. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Vozilova AV, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. The use of EPR and FISH methods for dose reconstruction in persons exposed on the Techa River. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2017;57(1): 30-41. (In Russian).
17. Hiller MM, Woda C, Bougrov NG, Degteva MO, Ivanov O, Ulanovsky A, et al. External dose reconstruction for the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modeling. *Radiation Environmental Biophysics*. 2017 May;56(2): 139-159. DOI: 10.1007/s00411-017-0688-3.
18. Shishkina EA, Volchkova AYU, Degteva MO, Napier BA. Dose coefficients to convert air kerma into organ dose rate values for people of different ages externally exposed to ¹³⁷Cs in soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2018;89(1): 36-47. (In Russian).
19. Shishkina EA, Volchkova AYU, Timofeev YS, Fattibene P, Wieser A, Ivanov DV, et al. External dose reconstruction in tooth enamel of Techa riverside residents. *Radiation Environmental Biophysics*. 2016 Nov;55(4): 477-499. DOI 10.1007/s00411-016-0666-1.
20. Izrael YuA. Atlas of the East-Urals and Karachay Radioactive Traces, including the prognosis up to 2047. Moscow: IGKE of Roshydromet and RAS; 2013. 140 p. (In Russian).
21. Kozheurov VP. SICH-9.1-A unique whole-body counting system for measuring Sr-90 via bremsstrahlung: The main results from a long-term investigation of the Techa River population. *Science of the Total Environment*. 1994 Mar;142(1-2): 37–48.
22. Tolstykh EI, Bugrov NG, Krivoschapov VA, Shishkina EA, Shagina NB, Degteva MO, et al. Results of in vivo measurements of strontium-90 body-burden in Urals residents: analysis of data obtained in 2006-2012. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(1): 5-11. (In Russian).
23. 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).
24. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoschapov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Physics*. 2011 Jul;101(1): 28–47.
25. Tolstykh EI, Degteva MO, Krivoschapov VA, Napier BA. Method for assessing individual values of ⁹⁰Sr diet intake based on tooth-beta counter measurements in residents of the Techa riverside settlements. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2019;4(96): 55-63. (In Russian).
26. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017 Mar;56(1): 27-45. DOI:10.1007/s00411-016-0677-y.
27. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015 Mar;35(1): 87-127.
28. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Physics*. 2013 May;104(5): 481–98.
29. ICRP, 1993. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. *Ann. ICRP*. 1993;23(3-4).
30. Anspaugh LR, Degteva MO, Vorobiova MI, Mokrov YuG, Napier BA. Dosimetry for members of the Extended Techa River Cohort. *Health Physics*. 2006 Oct;91(4): 393-4.
31. Napier BA, Eslinger PW, Tolstykh EI, Vorobiova MI, Tokareva EE, Akhramenko BN, et al. Calculations of individual doses for Techa River Cohort members exposed to atmospheric radioiodine from Mayak releases. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017 Nov;178-179: 156-167. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.08.013.
32. Napier BA, Degteva MO, Shagina NB, Anspaugh LR. Uncertainty analysis for the Techa River Dosimetry System.

- Meditsinskaya radiologiya I radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2013;58(1): 5-28. (In Russian and in English).
33. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Bugrov NG, Krestinina LY, et al. Individual dose distribution in cohort of people exposed as a result of radioactive contamination of the Techa River. *Meditsinskaya radiologiya I radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2019;64(3): 46-53. (In Russian).
 34. Drozdovitch V, Chumak V, Kesminiene A, Ostroumova E, Bouville A. Doses for post-Chernobyl epidemiological studies: are they reliable? *Journal of Radiological Protection*. 2016 Sep;36(3): R36-R73. DOI: 10.1088/0952-4746/36/3/R36.
 35. Krestinina LY, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. *British Journal of Cancer*. 2013 Nov;109(11): 2886–93. DOI: 10.1038/bjc.2013.614.
 36. Davis FG, Krestinina LY, Preston D, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007. *Radiation Research*. 2015 Jul;184(1): 56–65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
 37. Krestinina LY, Silkin SS, Epifanova SB. Analysis of solid cancer mortality risk for the population exposed in the territory of the East-Urals Radioactive Trace over a 50-year period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 23-29. (In Russian).
 38. Krestinina LY, Silkin SS, Akleyev AV. Risk of developing hematological malignancies in the cohort of the East Urals Radioactive Trace. *Radiatsiya I Risk (Bulletin Natsionalnogo Radiatsionnogo I Epidemiologicheskogo Registra) = Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2019;28(2): 36-50. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-2-36-50. (In Russian).
 39. Silkin SS, Krestinina LY, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk among the population exposed in the East Urals Radioactive Trace over 1957–2014. *Meditsinskaya radiologiya I radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65(4): 58-64. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64. (In Russian).
 40. Krestinina LY, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Risk of death from solid cancer among residents of the Techa riverside and East Urals Radioactive Trace areas exposed to radiation: comparative analysis. *Radiatsiya I Risk (Bulletin Natsionalnogo Radiatsionnogo I Epidemiologicheskogo Registra) = Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2017;26(1): 100-114. DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-100-114. (In Russian).
 41. Kossenko MM, Akleyev AV, Startsev NV, et al. Epidemiological analysis of late carcinogenic effects of chronic exposure of the population of the Urals. *International Journal of Radiation Medicine*. 1999;2(2): 34-41. (In Russian).
 42. Schonfeld SJ, Krestinina LY, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV, Preston DL. Solid Cancer Mortality in the Techa River Cohort (1950–2007). *Radiation Research*. 2013 Feb;179(2): 183-9. DOI: 10.1667/RR2932.1.
 43. Krestinina LY, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17. (In Russian).
 44. International Commission for Radiological Protection. ICRP Publication 103. Elsevier; 2007. 331 p.
 45. Hsu W-Li, Preston DL, Soda M, Sugiyama H, Funamoto S, Kodama K, et al. The Incidence of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma among Atomic Bomb Survivors: 1950–2001. *Radiation Research*. 2013 Mar;179(3): 361-382. DOI: 10.1667/RR2892.1.
 46. Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *Radiation Research*. 2017 May;187(5): 513-537. DOI: 10.1667/RR14492.1.
 47. Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, et al. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases. *Radiation Research*. 2012 Mar;177(3): 229–243. DOI: 10.1667/RR2629.1.
 48. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LY, Stram DO. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and Atomic bomb survivor studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017 Apr;173(1-3): 26-31.
 49. Leurad K, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, Haylock R, et al. Risk of cancer associated with low-dose radiation exposure: comparison of results between the INWORKS nuclear workers study and the A-bomb survivors study. *Radiation Environmental Biophysics*. 2021 Mar;60(1): 23-39. DOI:10.1007/s00411-020-00890-7.
 50. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. Geneva: World Health Organization; 2013. 166 p.
 51. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations; 2018. 184 p.

Received: September 13, 2021

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. Radioepidemiological studies in the Urals: outcomes and future directions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 4, P. 31-44. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44.