

Восточно-Уральский радиоактивный след: смертность от злокачественных опухолей за 57-летний период (1957–2014 гг.)

С.С. Силкин, Л.Ю. Крестинина, А.В. Аклеев

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

Целью данного исследования была оценка радиогенного риска смерти от злокачественных опухолей в когорте населения, облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа за 57-летний период наблюдения (с 1957 по 2014 г.) с использованием индивидуализированных доз. Материалы и методы: в конце сентября 1957 г. на территории производственного объединения «Маяк» в результате аварии в системе охлаждения емкостей с жидкими радиоактивными отходами произошел взрыв, приведший к образованию Восточно-Уральского радиоактивного следа. Население, проживавшее в загрязненных населенных пунктах Челябинской и Свердловской областей, подверглось длительному внешнему и внутреннему облучению. Когорта облученных лиц насчитывает 21 384 человека, 2055 из которых до аварии 1957 г. проживали в населенных пунктах на реке Тече и получили дополнительное облучение. Средняя доза на желудок для членов когорты Восточно-Уральского радиоактивного следа составила 36 мГр, максимальная – 1130 мГр. Для оценки индивидуализированных доз использована обновленная дозиметрическая система TRDS-2016. За 57-летний период наблюдения за когортой (1957–2014 гг.) на территории наблюдения зарегистрировано 1294 случая смерти от злокачественных опухолей. Число человеко-лет под риском составило 511 278. Анализ риска смертности от злокачественных опухолей проведен с использованием программ статистического пакета EPICURE методом Пуассоновской регрессии. Доверительные интервалы рассчитаны с использованием метода максимального правдоподобия. Результаты: при анализе смертности от злокачественных опухолей в когорте Восточно-Уральского радиоактивного следа за 57-летний период получен статистически значимый избыточный относительный риск смерти на 100 мГр, равный 0,05 (95% ДИ: 0,002; 0,11, $p=0,04$) во всей когорте. При исключении из анализа лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече, величина риска теряет статистическую значимость.

Ключевые слова: Восточно-Уральский радиоактивный след, ВУРС, когорта Восточно-Уральского радиоактивного следа, злокачественные новообразования, злокачественные опухоли, избыточный относительный риск смерти, радиогенный риск смерти.

Введение

В 1950-е гг. на Южном Урале произошли две значимых радиационных ситуации. Обе связаны с деятельностью запущенного в эксплуатацию в 1948 г. предприятия по производству оружейного плутония ПО «Маяк». В первые годы работы предприятия (1949–1956 гг.) по причине отсутствия отлаженных технологий переработки и хранения радиоактивных отходов осуществлялся бесконтрольный сброс жидких радиоактивных отходов в реку Течу. Максимум сбросов пришелся на 1951 г. В результате этого население, проживающее в населенных пунктах на реке Тече, которое активно использовало воду для бытовых и хозяйственных нужд, подверглось длительному радиационному воздействию за счет внутреннего и внешнего γ -облучения. Основными дозобразующими радионуклидами были долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs [1–3].

29 сентября 1957 г. вследствие аварийного выхода из строя системы охлаждения в хранилище жидких радиоактивных отходов на территории ПО «Маяк» произошел термический взрыв емкости с отходами. В результате образовалось радиоактивное облако, содержащее коротко- и долгоживущие радионуклиды ($^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}=66\%$; $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}=5,4\%$; $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb} = 24,9\%$; $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}=3,7\%$). Большая часть радионуклидов (18 млн Ки из 20) осела на территории ПО «Маяк», остальные разнесло ветром на территории Челябинской и Свердловской областей. Территории, подвергшиеся радиоактивному загрязнению, получили название Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС). Протяженность ВУРСа на северо-восток от эпицентра взрыва составила 350 км. Жители, проживающие на этих территориях, подверглись длительному радиоактивному внешнему и внутреннему γ -облучению. Населенные пункты с плотностью загрязне-

Силкин Станислав Сергеевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

ния по ^{90}Sr выше 2 Ки/км² были переселены в несколько этапов на чистые территории, остальные (с плотностью загрязнения ниже 2 Ки/км²) остались не переселенными. Всего было переселено 22 пункта (19 из Челябинской области и 3 из Свердловской областей) [4–6]. Часть жителей (2055 человек) до аварии 1957 г. проживали в населенных пунктах на реке Тече. Эта группа лиц получила наивысшие в когорте ВУРСа (КВУРС) дозы.

Наблюдение за облученным населением Южного Урала, а также изучение эффектов радиационного излучения на здоровье ведется в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) на протяжении нескольких десятилетий. В конце 1980-х гг. был создан электронный персонализированный регистр облученного на территории ВУРСа населения, позднее была сформирована КВУРС. Первые работы, посвященные эффектам действия радиационного излучения на здоровье населения ВУРСа, проводимые в УНПЦ РМ в 1990-е и 2000-е гг., не выявили значимых зависимостей онкологической заболеваемости и смертности от дозы [7, 8]. В 2010-е гг. в эпидемиологической лаборатории УНПЦ РМ нами были проведены исследования, посвященные анализу смертности [9] и заболеваемости [10] злокачественными опухолями (ЗО) в КВУРС с использованием индивидуализированных доз, которые выявили наличие линейной статистически значимой зависимости «доза – эффект» (ИОР смерти был равен 0,67/Гр, $p=0,03$, ИОР заболеваемости составил 0,5/Гр, $p=0,08$). В 2020 г. была проанализирована заболеваемость ЗО в КВУРС [11] с расширенным периодом наблюдения до 57 лет. Кроме того, в этом исследовании была проанализирована заболеваемость ЗО в КВУРС с исключением высокодозовой группы лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече. Во всей КВУРС был выявлен статистически значимый риск заболеваемости, равный 0,5/Гр (аналогичный, как и в предыдущем исследовании [10]). Статистическая значимость повысилась за счет увеличения длительности периода наблюдения и количества случаев заболеваний ЗО. Также необходимо отметить, что при исключении группы лиц, получивших дополнительное облучение на реке, риск стал статистически не значимым.

Данное исследование является продолжением исследовательской работы, посвященной эффектам на здоровье населения в КВУРС. Ее целью является оценка ИОР смерти от ЗО в КВУРС с увеличенным на 7 лет периодом наблюдения за когортой, а также с использованием индивидуализированных доз, рассчитанных по обновленной дозиметрической системе TRDS [12].

Материалы и методы

Источники информации о жизненном статусе, об истории проживания членов КВУРС и о случаях ЗНО

Информация об истории проживания облученных лиц на ВУРСе, а также о заболеваемости и смерти собирается в УНПЦ РМ систематически, начиная с конца 1980-х гг и по настоящее время. Основным источником данных об истории проживания являются данные Челябинского адресного бюро и похозяйственных книг. Дополнительными источниками информации о жизненном статусе членов когорты являлись: опрос родственников, анкетирование, медицинская документация кли-

нического отделения УНПЦ РМ, а также данные единого компьютерного регистра облученного на Южном Урале населения, станции которого находятся на базе многих лечебно-профилактических учреждений Челябинской области.

Основными источниками данных об онкологической заболеваемости и смертности являются извещения о впервые выявленных случаях ЗНО из Челябинского и Курганского онкодиспансеров, которые собираются, начиная с 1956 г. Помимо этого, информация о случаях ЗНО получена из медицинской документации клинического отделения УНПЦ РМ, выписок радиологических, цитологических, гистологических журналов Челябинского областного онкологического диспансера, из заключений ВТЭК и экспертного совета УНПЦ РМ. Идентификация случаев ЗО у членов КВУРС происходит путем пересечения регистра облученного населения, созданного в УНПЦ РМ, и данных Челябинского областного онкологического диспансера.

Демографические характеристики КВУРС

В КВУРС включены лица, родившиеся и/или проживавшие в одном из 34 населенных пунктов на территории ВУРСа в период с 29.09.1957 г. (с даты аварии) по 31.12.1959 г. (к этому времени закончены основные мероприятия по переселению жителей наиболее загрязненных населенных пунктов). В аналитическую когорту численностью 21 384 человек не включены жители населенных пунктов на территории Свердловской области (численностью около 1100 человек) по причине отсутствия постоянного доступа к информации об онкологических заболеваниях в Свердловской области. Численность когорты незначительно отличается по сравнению с предыдущими публикациями. Причиной тому является удаление из регистра УНПЦ РМ дублирующих записей, уточнение информации о местах и датах проживания членов когорты. Демографические характеристики всей КВУРС, а также когорты с исключением облученных на реке Тече (19 329 человек) представлены в таблице 1.

КВУРС на 56% представлена женщинами, преобладают лица русской национальности – 60%. Непереселенное население составляет 60%. На период начала наблюдения (на 31 декабря 1959 г.) в когорте было 75% лиц молодого возраста (до 40 лет), лиц пожилого возраста (60 лет и старше) – 9%. В когорте с исключением лиц, получивших дополнительное облучение на реке, пропорции по демографическим характеристикам практически полностью повторяют всю КВУРС.

Территория наблюдения и жизненный статус

Регистр УНПЦ РМ содержит информацию об истории проживания и жизненном статусе каждого члена когорты. Кроме того, на каждого человека имеются данные о заболеваемости и причинах смерти. Сбор информации производится непрерывно, а также происходит систематическое обновление данных регистра. Благодаря этому имеется возможность включать в анализ только те человеко-годы и те случаи смерти, когда член когорты проживал на территории наблюдения. Территория наблюдения за смертностью (ТНС) ограничена Челябинской и Курганской областями, где имелась возможность полу-

Таблица 1
Распределение членов КВУРС по полу, национальности, факту переселения и возрасту на начало периода наблюдения
 [Table 1
Distribution of the East Urals Radioactive Trace cohort members by sex, ethnicity, fact of resettlement and age at the beginning of the follow-up period]

Характеристики [Characteristics]	КВУРС [EURT cohort]		КВУРС без облученных на реке Тече [EURT cohort excluding exposed on the Techa river]	
	n	%	n	%
Пол [Sex]				
Мужчины [Male]	9489	44	8582	44
Женщины [Female]	11 895	56	10 747	56
Национальность [Ethnicity]				
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	8474	40	7837	41
Русские [Russians]	12 910	60	11 492	59
Факт переселения [Fact of resettlement]				
Переселенные [Resettled]	8494	40	8433	44
Не переселенные [Not resettled]	12890	60	10 896	56
Возраст на 31 декабря 1959 г. [Age on 31 of December 1959]				
0–1	355	2	355	2
1–19	8575	40	7804	40
20–39	7103	33	6344	33
40–59	3363	16	3017	16
60>	1988	9	1809	9
Вся когорта [Total]	21 384	100	19 329	100%

часть информацию об истории проживания и причинах смерти членов когорты с 1957 по 2014 г.

На конец периода наблюдения (31 декабря 2014 г.) о жизненном статусе членов когорты известно, что из 21 384 человек живыми остаются 4328 человек (20%), умерли 9612 человек (45%), потерянными из наблюдения являются 3270 человек (15%), мигранты – 4174 человека (20%). На 90% умерших имеются данные врачебных свидетельств о смерти с указанием причины смерти.

Структура причин смерти в КВУРС

Источником информации о причинах смерти являлись свидетельства о смерти, собираемые на ТНС. Дополнительно информация об онкологических причинах смерти могла быть получена из извещений о впервые выявленных случаях ЗНО. Всего на ТНС было зарегистрировано 1294 случая ЗО (за период наблюдения с 1957 по 2014 г.). Структура смертности от ЗО по полу представлена в таблице 2.

Таблица 2
Структура смерти от ЗО в КВУРС по полу

Таблица 2

[Table 2

Cancer mortality structure in EURT cohort by gender]

Рубрика МКБ-10 [ICD-10 sites]	Мужчины [Male]	%	Женщины [Female]	%	Всего [Total]	%
C00-C14 ЗО губы, ротовой полости и глотки [Lips, mouth and pharynx]	22	3,1	1	0,2	23	1,8
C15 ЗО пищевода [Esophagus]	43	6,1	41	7,0	84	6,5
C16 ЗО желудка [Stomach]	137	19,4	125	21,3	262	20,2
C17–C26 ЗО тонкого и толстого кишечника, прямой кишки, печени и других отделов брюшной полости [Intestine, rectum, liver and other parts of the abdominal cavity]	95	13,4	127	21,7	222	17,2
C30–C32 ЗО носа, гортани [Nose, larynx]	18	2,5	4	0,7	22	1,7
C33–C34 ЗО трахеи, бронхов и легкого [Trachea, bronchi, lung]	257	36,3	32	5,5	289	22,3
C37–C39 ЗО других отделов дыхательной системы [Other parts of the respiratory system]	2	0,3	2	0,3	4	0,3
C40–C49 ЗО костей и соединительной ткани [Bones and connective tissue]	7	1,0	5	0,9	12	0,9

Рубрика МКБ-10 [ICD-10 sites]	Мужчины [Male]	%	Женщины [Female]	%	Всего [Total]	%
C43 Меланома [Melanoma]	4	0,6	4	0,7	8	0,6
C44 ЗО кожи, не меланома [Skin, not melanoma]	3	0,4	7	1,2	10	0,8
C50 ЗО молочной железы [Breast]	0	0,0	53	9,0	53	4,1
C53–C54 ЗО матки [Uterus]	0	0,0	49	8,4	49	3,8
C51, C52, C55–C58 ЗО других женских половых органов [Other female genital organs]	0	0,0	75	12,8	75	5,8
C60–C62 ЗО мужских половых органов [Male genital organs]	23	3,2	0	0,0	23	1,8
C64–C68 ЗО мочевого пузыря и других органов мочевой системы [Bladder and other organs of the urinary system]	45	6,4	8	1,4	53	4,1
C73 ЗО щитовидной железы [Thyroid]	1	0,1	4	0,7	5	0,4
C69–C80 (кроме C73), D43* ЗО других и неуточненных локализаций [Other unspecified sites]	44	6,2	43	7,3	87	6,7
Всего ЗО (включая D43) [Total]	708	100,0	586	100,0	1294	100,0

В структуре смерти от ЗО у мужчин в КВУРС преобладают рак трахеи, бронхов и легкого – 257 случаев (36,3%), на втором месте по частоте ЗО желудка – 137 случаев (19,4%), на третьем – ЗО тонкого и толстого кишечника, прямой кишки, печени и других отделов брюшной полости – 95 случаев (13,4%). У женщин лидирующими локализациями являются ЗО тонкого и толстого кишечника, прямой кишки, печени и других отделов брюшной полости – 127 случаев (21,7%). Второе место по частоте у женщин занимают ЗО желудка – 125 случаев (21,3%), третье – ЗО матки и других женских половых органов – 124 случая (21,2%). Если рассматривать общую структуру смертности, суммируя оба пола, то самой частой локализацией являются ЗО трахеи, бронхов и легкого – 289 случаев (22,3%).

Если рассмотреть структуру смерти от ЗО по национальному признаку, то можно отметить, что у русского населения наиболее часто встречающимися локализациями являются: ЗО трахеи, бронхов и легкого – 24,3%, желудка – 20,5%, кишечника, печени и других отделов брюшной полости – 16,6%. У татар и башкир первую строчку занимает смертность от ЗО желудка – 19,3%, далее располагаются ЗО трахеи, бронхов и легкого – 18,4% и ЗО кишечника и печени и других отделов брюшной полости – 17,6%.

Дозы

При анализе риска смерти от ЗО используются индивидуализированные дозы, рассчитанные на основе обновленной дозиметрической системы TRDS, разработанной в биофизической лаборатории УНПЦ РМ. Оценка доз, накопленных в органах и тканях, связана с историей проживания членов когорты в населенных пунктах ВУРСа и на реке Тече. Принципы расчета доз подробно описаны в работе сотрудников биофизической лаборатории и их иностранных коллег [12].

Исходя из структуры смертности в КВУРС, самыми частыми локализациями ЗО являлись желудок, кишечник,

легкие. Было принято решение выбрать дозу на желудок в качестве реперной. Во всей КВУРС средняя доза на желудок составила 36 мГр, максимальная 1130 мГр. При исключении из анализа группы лиц, получившей дополнительное облучение при проживании в пунктах на реке Тече, средняя доза составила 11 мГр, максимальная – 121 мГр. Это говорит о том, что максимальные дозы получили члены когорты, получившие дополнительное облучение на реке Тече. На рисунке показано распределение членов всей КВУРС и с исключением облученных на реке по дозовым группам. Доля лиц, получивших облучение в дозе выше 100 мГр во всей КВУРС, составляет всего 9,3%, при исключении облученных на реке – 2,7%.



Рис. Распределение членов КВУРС по дозовым группам [Fig. Distribution of EURT cohort members by dose groups]

Методы анализа

Для анализа риска смерти от ЗО в КВУРС использовался статистический пакет EPICURE (программы DATAB и AMFIT) [13].

В DATAB была проведена стратификация всех случаев смерти от ЗО по полу, национальности, факту переселе-

ния населенного пункта, возрасту на начало облучения (17 страт по 5 лет от 0 до 80 и старше), времени после облучения (по 5 лет, 0–50 лет и старше), календарным периодам (по 5 лет с 1957 по 2014 г.), по дозовым группам (9 групп от 0 до 500 мГр и выше), году рождения когорты (до 1932 г. и после). Стратификация была проведена для латентных периодов в 0, 2, 5, 10, 15 лет.

В программе AMFIT пакета EPICURE был проведен многофакторный анализ зависимости смертности от радиационных и не связанных с облучением факторов. Тестированием различных моделей в программе была определена форма зависимости риска смерти от дозы. Для оценки риска смерти от ЗО в КВУРС использовалась простая параметрическая модель избыточного относительного риска (ИОР) на базе Пуассоновского распределения в виде:

$$\lambda(a, d, z) = \lambda_0(a, z_0) (1 + \rho(d)\varepsilon(z_1)) \quad (1)$$

где a – достигнутый возраст, d – доза (Гр), z_0 – факторы, которые могут влиять на базовые уровни (λ_0), z_1 – факторы, которые могут модифицировать ИОР.

Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа $\rho(d)$ на функцию модификации эффекта ($\varepsilon(z_1)$).

Статистическая значимость и доверительные интервалы определялись методом максимального правдоподобия, результат считался значимым при вероятности ошибки менее 5%.

Результаты и обсуждение

Зависимость смертности от характеристик, не связанных с облучением

Для оценки зависимости базовых уровней смерти от ЗО в КВУРС от характеристик, не связанных с радиационным воздействием, в программе AMFIT были протестированы несколько переменных: пол, национальность, календарный период (до 1986 г. и после), год рождения членов когорты (до 1932 года и после), факт переселения, поло-специфичная степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма. Тестирование проводилось как для всей КВУРС, так и для когорты с исключением облученных на реке Тече.

В итоговую модель для всей КВУРС были включены статистически значимые переменные: пол ($p < 0,001$), национальность ($p < 0,001$), факт переселения ($p = 0,03$), календарный период ($p = 0,01$), поло-специфичная степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма ($p < 0,001$). Для когорты с исключением получивших дополнительное облучение на реке в итоговую модель были включены: пол ($p < 0,001$), национальность ($p < 0,001$), календарный период ($p = 0,007$), поло-специфичная степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма ($p < 0,001$).

Зависимость смертности от дозы

При анализе было протестировано несколько латентных периодов после радиационного воздействия (0, 2, 5, 10, 15 лет). Необходимость этого связана с отсроченностью реализации случаев ЗО после радиационного облучения. В ходе тестирования различных латентных периодов с использованием линейной зависимости эффекта от дозы получены почти идентичные значения ИОР (0,05–0,06 на 100 мГр) с почти равной статистической значимостью ($p = 0,03–0,04$) в разных латентных периодах. При исключении из КВУРС облученных на реке Тече величина ИОР была положительной, но статистически не значимой во всех латентных периодах, что связано с исключением лиц, получивших наиболее значительные дозы в когорте. Это приводило к снижению значимости эффекта. В таблице 3 представлены величины ИОР смерти от ЗО во всей КВУРС и в когорте с исключением облученных на реке.

При использовании линейной модели и 5-летнего латентного периода число избыточных случаев за весь период наблюдения, связанных с радиационным воздействием, составило 30, что составляет 2,4% от всех случаев ЗО в КВУРС на территории наблюдения.

Модификация дозового ответа

Для линейной модели с 5-летним латентным периодом была оценена модификация дозового ответа факторами, не связанными с облучением (пол, национальность, возраст на начало облучения, достигнутый возраст, календарный период). Модификация данными факторами

Таблица 3

Величины ИОР смерти от ЗО в КВУРС и когорте с исключением облученных на реке Тече

[Table 3]

ERR values of cancer mortality in the EURT cohort and in the cohort with the exclusion of exposed members on the Techa river

Параметры [Parameters]	КВУРС [EURT cohort]	Когорта без лиц, облученных на реке Тече [cohort with the exclusion of exposed members on the Techa river]
ИОР/100 мГр [ERR/100 mGy]	0,05	0,18
95% ДИ [95% CI]	0,002; 0,10	-0,01; 0,54
P	0,04	0,23
Избыточные случаи [Excess cases]	30	22
Атрибутивный риск, % [Attributive risk]	2,4%	2,04%
Средняя доза, мГр [Mean dose, mGy]	36	11
Максимальная доза, мГр [Maximum dose, mGy]	1130	121

оценена как для всей КВУРС, так и для когорты с исключением облученных на реке Тече (табл. 4).

Для обеих когорт не выявлено значимой модификации дозовой зависимости риска смерти от факторов, не связанных с радиационным воздействием. В КВУРС были обнаружены тенденции к более высоким значениям ИОР на единицу дозы у татар и башкир по сравнению с русскими и у лиц, достигших 70-летнего возраста, относительно 50-летних. Кроме того, отмечаются тенденции к более высокому риску смерти от ЗО после 1990 г., чем в период с 1957 по 1990 г. Однако все эти различия статистически не значимы. Исключение из анализа лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече, приводит к существенному снижению статистической значимости и отрицательным (или неопределенным) значениям нижней границы доверительного интервала. Отсутствие четкой зависимости риска смерти от ЗО от факторов, не связанных с облучением, по-видимому, связано с небольшим количеством случаев ЗО при распределении их по группам.

Заключение

Данная работа, посвященная исследованию риска смерти от ЗО среди населения, облученного на ВУРСе, является продолжением многолетних исследований УНПЦ РМ в сфере изучения радиационных эффектов на здоровье населения загрязненных районов Челябинской области. Первые аналитические исследования, посвященные риску смерти [9] и заболеваемости [10] ЗО у населения ВУРСа с использованием индивидуализированных органоспецифических доз, были проведены в эпидемиологической лаборатории УНПЦ РМ в 2014 и 2017 гг.

соответственно. Период наблюдения в анализе смерти был ограничен 50-летним промежутком (1957–2006 гг.), заболеваемости – 53-летним (1957–2009 гг.). В обоих исследованиях были получены статистически значимые риски (ИОР смерти был равен 0,07/100мГр, 95% ДИ: 0,006–0,14, $p=0,03$; ИОР заболеваемости – 0,05/100 мГр, 90% ДИ: 0,003–0,1, $p=0,08$). В анализ смерти были включены 1039 случаев смерти от ЗО на территории наблюдения, в анализ заболеваемости – 1426 случаев.

В 2020 г. проведен анализ заболеваемости в КВУРС с увеличенным до 57 лет периодом наблюдения (1957–2014 гг.) [11], включающий 1609 случаев заболеваний ЗО на территории наблюдения. Благодаря увеличению периода наблюдения (на 4 года по сравнению с предыдущим анализом заболеваемости ЗО) и увеличению количества случаев ЗО удалось достичь улучшения достоверности результатов ($p=0,02$ по сравнению с $p=0,08$ в исследовании 2017 г.). ИОР заболеваемости был равен 0,05/100 мГр (95% ДИ 0,01–0,10, $p=0,02$). Помимо этого, в последнем исследовании была установлена связь риска заболеваемости ЗО в КВУРС с дополнительной дозой, полученной группой лиц в КВУРС, которые до аварии 1957 г. проживали в населенных пунктах на реке Тече. При исключении этих людей из анализа риск становится статистически не значимым.

В данной работе исследовался риск смерти от ЗО у населения ВУРС в когорте той же численностью (21 384 человека), период наблюдения составил также 57 лет (1957–2014 гг.). Всего было проанализировано 1294 случая смерти от ЗО в когорте. Полученный достоверный риск смерти от ЗО во всей КВУРС, равный 0,05/100 мГр (95% ДИ 0,002–0,10; $p=0,04$), который сопоставим не

Оценка модификации дозовой зависимости смертности от ЗО факторов, не связанных с облучением

Таблица 4

[Table 4

Параметры [Parameters]	ИОР /100 мГр [ERR/100 mGy]	
	КВУРС [EURT cohort]	Исключая облученных на реке Тече [cohort with the exclusion of exposed members on the Techa river]
	Пол [Sex]	
Мужчины [Male]	0,05 (-0,02; 0,12)	0,1 (-0,23; 0,53)
Женщины [Female]	0,05(-0,01; 0,14)	0,3 (-0,10; 0,80)
	Национальность [Ethnicity]	
Русские [Russians]	0,04 (-0,01; 0,1)	0,31 (-0,23; 1,03)
Татары/башкиры [Tatars/Bashkirs]	0,1 (-0,01; 0,31)	0,15 (-0,13; 0,50)
	Возраст к началу облучения [Age at exposure]	
10 лет [10 year]	0,04 (0,0006; 0,12)	0,17 (nf*; 0,57)
40 лет [40 years]	0,05 (0,0003; 0,11)	0,21 (nf; 0,61)
	Достигнутый возраст [Attained age]	
50 лет [50 years]	0,02 (0,0003; 0,09)	0,14 (nf; 0,48)
70 лет [70 years]	0,06 (0,01; 0,20)	0,26 (nf; 0,66)
	Календарный период [Calendar period]	
До 1990 г. [Before 1990]	0,02 (-0,04; 0,09)	-0,11 (-0,44; 0,34)
После 1990 г. [After 1990]	0,1 (0,01; 0,2)	0,30 (-0,04; 0,74)

*nf (not found) – граница доверительного интервала не может быть точно вычислена программой

только с риском заболеваемости в этой же когорте, но и с рисками смерти и заболеваемости, полученными в исследованиях в когорте реки Течи (КРТ). В КРТ риск смерти от ЗО статистически значим с ИОР, равным 0,06/100 мГр (95% ДИ: 0,004–0,13) [14], риск заболеваемости ЗО также значимый с ИОР, равным 0,08/100 мГр (95% ДИ: 0,01–0,15) [15].

Как и в анализе заболеваемости ЗО в КВУРС [11], при исключении из анализа смертности лиц, получивших дополнительное облучение до аварии 1957 г. в прибрежных селах на реке Тече (2055 человек, получивших максимальные дозы в КВУРС), риск смерти остается положительным, но становится незначимым (ИОР равен 0,18/100 мГр, 95% ДИ -0,01–0,54; $p=0,23$).

Для увеличения статистической силы в дальнейшем планируется проведение анализа рисков смерти и заболеваемости ЗО, а также нераковых эффектов в объединенной когорте, облученных на Южном Урале [16], включающее в себя население из КРТ и КВУРС. Когорта численностью около 63 000 человек позволит увеличить статистическую значимость исследований, посвященных ситуациям, в которых население облучилось в диапазоне малых и средних доз. Это позволит оценить органоспецифические риски возникновения ЗНО, эффекты облучения в различных возрастных группах и в различные периоды времени. Кроме того, наличие такой когорты даст возможность оценить влияние постнатальной, внутриутробной и гонадной доз.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу биофизической лаборатории УНПЦ РМ под руководством М.О. Дегтевой за расчет индивидуализированных доз для членов КВУРС, а также сотрудникам отдела «База данных «Человек»» под руководством Н.В. Старцева за активное участие в сборе информации о жизненном статусе членов КВУРС.

Литература

1. Аклеев А.В., Киселев М.Ф. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча. М.: Вторая типография ФУ «Медбиоэкстрем», 2001. 531 с.
2. Аклеев А.В., Аклеев А.А., Андреев С.С. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
3. Аклеев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., и др. Здоровье населения, проживающего на радиоактивных территориях Уральского региона. М.: РАДЭКОН, 2001. 195 с.
4. Аклеев А.В., Киселев М.Ф. Восточно-Уральский радиоактивный след (сборник статей, посвященных последствиям аварии 1957 г. на ПО «Маяк»). Челябинск, 2012. 352 с.
5. Булдаков Л.А. Медицинские последствия радиационной аварии на Южном Урале в 1957 г. // Медицинская радиология. 1990. Т. 35, № 12. С. 11-16.
6. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 г. на ПО «Маяк» / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ, 2001. 294 с.
7. Kostyuchenko V.A., Krestinina L.Yu. Long-term irradiation effects in the population evacuated from the East Urals radioactive trace area // Science Total Environment. 1994. Vol. 142. P. 119-125.
8. Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Онкологическая смертность при хроническом воздействии малых и средних доз облучения в когорте лиц, облученных на ВУРС // Бюллетень сибирской медицины. 2005. Т. 4, № 2. С. 36-44.
9. 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. Т. 7, № 1. С. 23-29.
10. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Толстых Е.И., Епифанова С.Б. Анализ риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у населения, облучившегося на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа за период с 1957 по 2009 г. // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 36-46.
11. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклеев 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
12. 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.
13. Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A., McConney M.E. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.
14. 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, No. 2. P. 183-189. DOI: 10.1667/RR2932.1.
15. 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. P. 56-65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
16. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев В.Н., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 3. С. 393-402.

Поступила: 16.11.2021 г.

Силкин Станислав Сергеевич – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ssilkin@urcrm.ru

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

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук., профессор, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Восточно-Уральский радиоактивный след: смертность от злокачественных опухолей за 57-летний период (1957–2014 гг.) // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 27-35. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-27-35

East Ural Radioactive Trace: cancer mortality over a 57-year period (1957–2014)

Stanislav S. Silkin, Lyudmila Yu. Krestinina, Alexander V. Akleyev

Ural Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

The objective of the current study was to assess the cancer mortality risk in the cohort of the exposed population on the territory of the East Urals Radioactive Trace over a 57-year follow-up period from 1957 to 2014 using individual doses. Materials and methods: At the end of September 1957 as a result of an accident in the cooling system of storage tanks with liquid radioactive waste, an explosion occurred on the territory of the Mayak PA which led to the formation of the East Urals Radioactive Trace. The population living in the contaminated settlements of the Chelyabinsk and Sverdlovsk regions has been affected by prolonged external and internal exposure. The cohort of individuals exposed in the territory of the East Urals Radioactive Trace numbers 21,384 people, of whom 2,055 persons had lived in Techa riverside settlements before the 1957 accident and received additional radiation exposure. The mean stomach dose for members of the East Urals Radioactive Trace cohort was 36 mGy, the maximum dose was 1130 mGy. The updated TRDS-2016 dosimetry system was used to assess individualized doses. Over the 57-year follow-up period of the cohort (1957-2014), 1294 deaths from cancer were registered in the catchment area. The number of person-years at risk was 511278. The analysis of the cancer mortality risk was carried out with the EPICURE statistical package using the Poisson regression method. Confidence intervals were calculated using the maximum likelihood method. Results: In the course of the cancer mortality analysis in the East Urals Radioactive Trace cohort over a 57-year period, a statistically significant excess relative risk of mortality per 100 mGy equal to 0.05 (95% CI: 0.002; 0.11, $p = 0.04$) was obtained in the entire East Urals Radioactive Trace cohort. If individuals who received additional exposure on the Techa River were excluded from the analysis, the value of the risk loses its statistical significance.

Key words: East Urals Radioactive Trace, East Urals Radioactive Trace cohort, cancer, excess relative risk of mortality, radiogenic mortality risk.

References

- Akleyev AV, Kiselev MF. Medical-biological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001. 531 p. (In Russian).
- Akleyev AV, Akleev AA, Andreev SS. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health. Chelyabinsk: Kniga; 2016. 390 p. (In Russian).
- Akleyev AV, Kosenko MM, Krestinina LYu, Shalaginov SA, Degteva MO, Startsev NV. Health status of population exposed to environmental Contamination in the Southern Urals. Moscow: Radekon Publ.; 2001. 195 p. (In Russian).
- East-Urals radioactive trace. Eds.: A.V. Akleyev, M.F. Kiselev. Chelyabinsk: «Fregat»; 2012. 352 p. (In Russian).
- Buldaikov LA, Demin SN, Kosenko MM, Kostyuchenko VA, Koshurnikova NA, Krestinina LY, et al. Medical consequences of the radiation accident in the Southern Urals in 1957. *Meditsinskaya radiologiya = Medical Radiology*. 1990; 35(12): 11–16. (In Russian).
- 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).
- Kostyuchenko VA, Krestinina LYu. Long-term irradiation effects in the population evacuated from the East Urals radioactive trace area. *The Science of the Total Environment*. 1994;142: 119-125.
- Krestinina LYu, Akleev AV. Cancer mortality under chronic exposure of low and moderate radiation doses in the cohort of persons who were exposed due to the EURT. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2005;4(2): 36-44. (In Russian).
- Krestinina LYu, Silkin SS, Epifanova SB. Analysis of solid cancer mortality risk for the population exposed in the territory of East-Urals radioactive trace over a 50-year period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014; 7(1): 23-29. (In Russian).
- Silkin SS, Krestinina LYu, Tolstykh EI, Epifanova SB. Analysis of solid cancer incidence risk among the population exposed in the East Urals Radioactive Trace over 1957– 2009. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 36-46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-36-46
- Silkin SS, Krestinina LYu, Akleev AV. Solid Cancer Incidence Risk among the Population Exposed in the East Urals

Stanislav S. Silkin

Ural Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: 68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ssilkin@urcrm.ru

- Radioactive Trace over 1957–2014. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and radiation safety*. 2020;4: 58-64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64>.
12. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, 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;117(4): 378-387.
 13. Preston DL, Lubin JH, Pierce DA, McConney ME. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.
 14. Schonfeld SJ, Krestinina LYu, Epifanova SB, et al. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950-2007). *Radiation Research*. 2013;179(2): 183-189. DOI: 10.1667/RR2932.1.
 15. Davis FG, Yu KL, Preston D, et al. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007. *Radiation Research*. 2015;184: 56–65.
 16. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev VN, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).

Received: November 16, 2021

For correspondence: Stanislav S. Silkin – Researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ssilkin@urcrm.ru)

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

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

For citation: Silkin S.S., Krestinina L.Yu., Akleyev A.V. East Ural Radioactive Trace: cancer mortality over a 57-year period (1957-2014). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 27-35. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-27-35