

С.С. Силкин¹, Л.Ю. Крестинина¹, А.В. Аклеев^{1,2}**РИСК ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ СОЛИДНЫМИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫМИ НОВООБРАЗОВАНИЯМИ У ОБЛУЧЕННОГО НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА НАСЕЛЕНИЯ ЗА 1957–2014 гг.**¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Челябинск, Россия² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Контактное лицо: Силкин Станислав Сергеевич, ssilkin@urcrrm.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у населения, облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) за период наблюдения с 1957 по 2014 гг. с использованием индивидуализированных доз, рассчитанных на основе усовершенствованной дозиметрической системы TRDS.

Материал и методы: Произошедший взрыв в хранилище жидких радиоактивных отходов на территории ПО «Маяк» 29 сентября 1957 г. привел к радиоактивному загрязнению территорий Челябинской и Свердловской областей и образованию ВУРСа, а население, проживающее на его территории, подверглось длительному хроническому внешнему и внутреннему облучению. Анализируемая когорта (КВУРС) насчитывает 21384 человека, 2055 из которых получили дополнительное облучение до аварии 1957 г., проживая в населенных пунктах на реке Тече. Средняя доза облучения желудка для членов КВУРС составила 36 мГр, максимальная — 1,13 Гр. Анализ проведен с использованием программ DATAV и AMFIT (статистический пакет EPICURE). Была использована простая параметрическая модель избыточного относительного риска (ИОР). Статистическая значимость и доверительные интервалы определялись по методу максимального правдоподобия.

Результаты: В результате анализа риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в КВУРС за 57-летний период наблюдения при использовании линейной модели и 5-летнем латентном периоде был получен статистически значимый ИОР, равный 0,05/100 мГр (95 % ДИ 0,01–0,10, $p = 0,02$) во всей КВУРС. При исключении из когорты группы лиц, дополнительно облученных на реке Тече до аварии 1957 г., риск заболеваемости становился незначимым. Не было выявлено значимой модификации дозовой зависимости нерадиационными факторами.

Заключение: Полученные результаты хорошо сопоставимы с предыдущими исследованиями облученного населения Южного Урала, проводимых в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины, а также в мире, посвященных изучению эффектов радиационного воздействия на население.

Ключевые слова: население, радиационный риск, Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), солидные злокачественные новообразования, риск заболеваемости, избыточный относительный риск

Для цитирования: 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;65(4):58–64.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64

Введение

В середине прошлого столетия на территории Челябинской области в результате деятельности предприятия по переработке и хранению радиоактивных материалов ПО «Маяк» произошло два серьезных радиационных инцидента. Первый связан с длительным бесконтрольным сбросом сточных вод, содержащих радиоактивные элементы, в реку Течу. Загрязнение реки происходило по причине отсутствия технологий хранения и переработки отходов на предприятии в первые годы работы (1949–1956 гг.). Население, проживающее в прибрежных деревнях и активно использующее воду в бытовых и питьевых целях, а также сельскохозяйственные продукты питания, подверглось длительному радиационному воздействию за счет внутреннего и внешнего γ -облучения. Долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs были основными дозообразующими радионуклидами [1–3].

Вторым радиационным инцидентом на Южном Урале стала авария, произошедшая 29 сентября 1957 г. на территории ПО «Маяк». В хранилище жидких радиоактивных отходов произошел тепловой взрыв емкости в результате сбоя в системе охлаждения. В состав радиоактивного облака входили коротко- и долгоживущие радионуклиды. Около 90 % радионуклидов (18 млн Ки) осели на территории ПО «Маяк», примерно 10 % (2 млн Ки) распространились ветром по территориям Челябинской и Свердловской областей.

Загрязненные территории были названы Восточно-Уральским радиоактивным следом (ВУРС, по-англ. — EURT). Протяженность ВУРСа на северо-восток составила примерно 350 км от эпицентра взрыва. Основными радионуклидами выброса являлись: $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr} = 66\%$; $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y} = 5,4\%$; $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb} = 24,9\%$; $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh} = 3,7\%$ [4–6].

В результате аварии население, проживающее на загрязненных территориях, было подвержено хроническому, в основном внешнему γ -облучению. Необходимо отметить, что часть жителей населенных пунктов на территории ВУРСа (2055 человек) до аварии 1957 г. уже получила облучение при проживании в селах на реке Тече, превышавшее таковое на ВУРСе. В итоге эта часть населения составила большедозовую группу.

Населенные пункты (19 сел на территории Челябинской области и 3 в Свердловской области), в которых плотность загрязнения по ^{90}Sr превышала 2 Ки/км², поэтапно переселялись на чистые территории [7]. Деревни с плотностью менее 2 Ки/км² остались не переселенными, из них жители 15 непереселенных деревень были включены в когорту ВУРСа (КВУРС).

Данное исследование является продолжением многолетней работы Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) по изучению эффектов облучения на здоровье населения, проживающего на загрязненных радиаци-

ей территориях. В конце 1980-х — начале 1990-х гг. в центре был создан электронный персонализированный регистр облученного на территории ВУРСа населения. Позднее была сформирована когорта людей, облученных на ВУРСе. Первые работы, посвященные изучению отдаленных эффектов влияния радиации на здоровье населения ВУРСа, не выявили достоверной зависимости от дозы [6–9]. В 2013 г. нами был проведен анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований (ЗНО) в когорте облученных на территории ВУРСа за 50-летний период наблюдения с использованием индивидуализированных доз (расчитанных по TRDS–2009), который показал наличие статистически значимой зависимости доза–эффект (ИОР = 0,67/Гр, $p = 0,03$) [10]. Через несколько лет (в 2017 г.) был проанализирован риск заболеваемости солидными ЗНО в той же когорте за 53-летний период наблюдения с переоцененными индивидуализированными дозами на основе дозиметрической системы TRDS–2016. В результате данного исследования величина ИОР составила 0,05/100 мГр, $p = 0,08$ [11].

Целью данного исследования является оценка избыточного относительного риска (ИОР) заболеваемости ЗНО в КВУРС с увеличенным на 4 года периодом наблюдения (до 57 лет) с использованием индивидуализированных доз, рассчитанных на основе обновленной дозиметрической системы. Также в работе оценивается влияние на величину риска дополнительного облучения населения при проживании в населенных пунктах на реке Тече, составивших большедозовую группу лиц.

Материал и методы

Источники информации

Информация для регистра о лицах, облученных на ВУРСе, начала активно собираться на систематической основе с конца 1980-х гг. и ведется в УНПЦ РМ по настоящее время. Основными источниками информации являлись данные адресного бюро Челябинской области, архивов областного ЗАГСа (акты о рождении и смерти, свидетельства о смерти). Для переселенных жителей данные из похозяйственных книг сверялись со списками компенсации за ликвидацию хозяйства. Кроме основных источников информации данные о жизненном статусе членов когорты были получены со слов родственников, из медицинской документации клиники УНПЦ РМ, данных единого компьютерного регистра облученного на Южном Урале населения.

Сотрудниками УНПЦ РМ на протяжении многих лет осуществляется сбор данных о случаях заболеваемости ЗНО. Основным источником являются извещения о впервые выявленных случаях ЗНО из Челябинского областного клинического онкодиспансера (ЧОКОД), начиная с 1956 г. Кроме того, дополнительными источниками являются данные медицинской документации клинического отделения УНПЦ РМ, а также выписные эпикризы, амбулаторные карты, истории болезни, выписки радиологических, цитологических журналов ЧОКОД и др. Информация о ЗНО у облученного населения также была получена из заключений заседаний ВТЭК по установлению инвалидности, заседаний экспертного совета УНПЦ РМ. В девяностых годах прошлого века в УНПЦ РМ был сформирован

электронный регистр раковых заболеваний у облученного населения на Южном Урале, который обновляется по настоящее время. С 2007 г. идентификация случаев ЗНО у членов регистра происходит посредством пересечения электронных регистров УНПЦ РМ и ЧОКОД. Информация о случаях смерти от ЗНО из актовых записей областного ЗАГСа и свидетельства о смерти также вносится в регистр.

Характеристика КВУРС

В аналитическую КВУРС включены лица, родившиеся и/или проживающие в одном из 34 населенных пунктов (19 переселенных и 15 непереселенных) Челябинской области на ВУРСе в период с даты аварии (29.09.1957) по 31.12.1959. Жители переселенных деревень Свердловской области (Тыгиш, Четыркино и Ключино) исключены из анализа по причине недоступности данных об истории проживания и заболеваемости (около 1100 человек) на систематической основе. Также критериями исключения из анализа являлись случаи солидных ЗНО у членов когорты до даты начала наблюдения и неточная или противоречивая история проживания, не позволяющая рассчитать индивидуализированные дозы.

В табл. 1 представлены демографические характеристики всей КВУРС для анализа заболеваемости солидными ЗНО, а также когорты при исключении 2055 человек, которые получили дозы дополнительного облучения при проживании в прибрежных селах на реке Тече до аварии 1957 г.

Численность КВУРС по данным на 2019 г. составляет 21384 человек, а при исключении группы лиц, получивших дополнительное облучение в прибрежных пунктах на реке Тече (2055 человека), численность сокращается до 19329 человек. В когорте преобладают женщины — 56 %, лица русской национальности составляют 60 %. По возрасту на 31 декабря 1959 г. преобладают лица молодого возраста (до 20 лет) — 42 %, лица старшей возрастной группы (60 лет и старше) составляют 9 %.

Таблица 1

Характеристика КВУРС Characteristic EURT cohort

Характеристика	КВУРС		Без облученных на р. Тече	
	Абс.	%	Абс.	%
Пол				
Мужчины	9489	44	8582	44
Женщины	11895	56	10747	56
Этнические группы				
Татары и башкиры	8474	40	7837	41
Славяне	12910	60	11492	59
Факт переселения				
Переселенные	8494	40	8433	44
Непереселенные	12890	60	10896	56
Возраст на 31 декабря 1959 г.				
0–19	8930	42	8159	42
20–39	7103	33	6344	33
40–59	3363	16	3017	16
60 и старше	1988	9	1809	9
Вся когорта	21384	100	19329	100

Территория наблюдения и жизненный статус членов когорты

В регистре УНПЦ РМ постоянно обновляется история проживания каждого члена когорты. В нем есть данные о том, когда человек мигрировал с территории наблюдения и когда на нее вернулся. Наличие такой истории за весь период наблюдения позволяет рассчитать человеко-годы для каждого человека, и включать в анализ только те случаи и годы, в течение которых он проживал на территории наблюдения. В связи с ограниченными возможностями сбора информации о случаях заболеваемости ЗНО до появления электронного регистра территория наблюдения за заболеваемостью (ТНЗ) за период 1957–2014 гг. включала 5 районов Челябинской области, г. Челябинск и г. Озёрск.

К концу периода наблюдения за онкологической заболеваемостью (на 31.12.2014) известно, что 3443 (16 %) членов КВУРС живы, 8810 (41 %) умерли и 6045 (28 %) являются мигрантами с ТНЗ. Для 3086 (14 %) членов КВУРС информация об их проживании известна не на весь период наблюдения, поэтому они считаются потерянными из наблюдения к концу 2014 г. (данная группа участвует в анализе с начала периода наблюдения до последней известной даты их статуса на ТНЗ). На большую часть умерших (92 %) имеется информация о причине смерти (акты и свидетельства о смерти).

Информация о случаях заболеваний солидными ЗНО

На территории наблюдения с 1957 по 2014 гг. всего было зарегистрировано 1609 случаев заболеваний солидными ЗНО, исключая немеланомные раки кожи (C44). Обычно ЗНО этой локализации не берутся в анализ в большинстве международных исследований по причине того, что больные с базальноклеточными ЗНО после пятилетней ремиссии снимаются с учета.

Как представлено на рис. 1, в структуре заболеваемости солидными ЗНО у мужчин преобладают раки трахеи, бронхов и легкого (C33–C34) — 32 %, вторыми по частоте встречаемости являются ЗНО желудка (C16) — 18 %, ЗНО кишечника, печени и других отделов брюшной полости (C17–C26) — 14 %. У женщин в КВУРС на первом месте по частоте находятся ЗНО

матки (C53–C54) — 20 %, из которых 12,5 % приходится на ЗНО шейки матки (C53) и 7,5 % на ЗНО тела и неуточненных отделов матки (C54), на втором месте — ЗНО кишечника, печени и других отделов брюшной полости (C17–C26) — 17 %, и ЗНО желудка (C16) — 16 %, ЗНО молочной железы (C50) — 14 % занимают 4 место по частоте.

Распределение случаев заболевания солидными ЗНО по этнической принадлежности показывает более высокий процент ЗНО пищевода (10,8 %) у тюрков, чем у славян (2,7 %), что предположительно можно объяснить особенностями питания. Отмечается также существенное превышение частоты ЗНО шейки матки у русских (7,5 % у славян и 4,3 % у тюрков).

Наблюдается одинаковое распределение случаев ЗНО по полу как во всей КВУРС, так и с исключением членов когорты, получивших дополнительное облучение на реке Тече — по 50 % у мужчин и у женщин. При сопоставлении по этнической принадлежности — у русских случаев ЗНО больше, чем у татар и башкир (61 % против 39 %). По факту переселения: у переселенных зарегистрировано в 2 раза больше случаев, чем у переселенных (66 % и 34 % соответственно). По возрасту (на 31.12.1959 г.) 79 % случаев ЗНО приходятся на возраст после 20 лет.

На рис. 2 представлена доля подтверждения диагнозов ЗНО разными методами за весь период наблюдения и за последние 25 лет наблюдения.

Качество данных улучшается со временем, что выражается в увеличении доли подтвержденности случаев ЗНО морфологическими и инструментальными методами. В 1990–2014 гг. доля морфологически подтвержденных случаев ЗНО составила 60 % и 78 % без и вместе с инструментальными методами соответственно, а за весь период наблюдения суммарная доля морфологически и инструментально подтвержденных случаев (УЗИ, КТ, МРТ, эндоскопические методы, рентгенография и др.) составила 56 % (рис. 2).

Дозы облучения

В данном анализе риска заболеваемости солидными ЗНО используются индивидуализированные дозы, рассчитанные на основе обновленной дозиметрической системы TRDS, которую разработали сотрудники биофизической лаборатории УНПЦ



Рис. 1. Структура солидных ЗНО по полу в КВУРС
Fig. 1. Structure of solid malignant neoplasm in EURT cohort

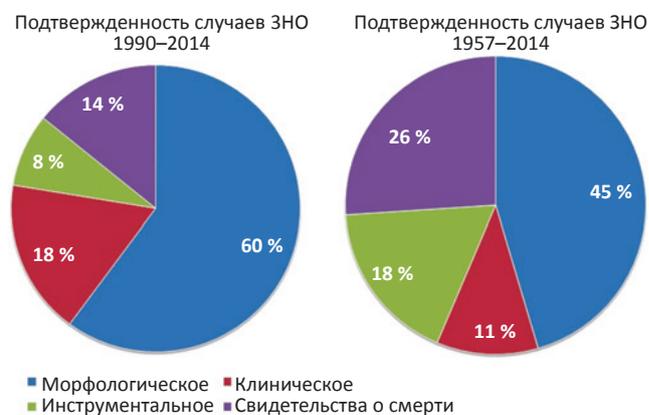


Рис. 2. Верификация случаев ЗНО в КВУРС
Fig. 2. Verification of cases of malignant neoplasm in EURT cohort

РМ в сотрудничестве с иностранными коллегами. Оценка доз напрямую связана с историей проживания облученного населения в селах на территории ВУРСа, а также в прибрежных деревнях на реке Тече. Также дозы существенно зависят от пола и возраста. Структура и параметры дозиметрической системы, а также принципы расчета доз и их неопределенностей были подробно описаны в работах коллег [12].

Учитывая то, что самыми частыми локализациями ЗНО в КВУРС были желудок, кишечник, а также легкие, аналогом дозы на мягкие ткани была выбрана доза на желудок. Средняя доза на желудок для членов КВУРС составила 36 мГр, максимальная — 1,13 Гр. При исключении лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече, средняя доза на желудок уменьшилась до 11 мГр, а максимальная составила 121 мГр. Что еще раз подчеркивает факт того, что лица, получившие дополнительную дозу на реке Тече, относятся к наивысшей дозовой группе в КВУРС. На рис. 3 показано распределение членов КВУРС по дозовым группам во всей когорте и при исключении облученных на реке Тече.

Можно увидеть, что большая часть когорты (91 %) получила облучение в дозе до 100 мГр. При исключении лиц, дополнительно облучившихся на реке Тече, доля облученных свыше 100 мГр составила всего 2,7 %.

Методы анализа

Анализ риска заболеваемости солидными ЗНО проводился с использованием программы AMFIT статистического пакета EPICURE [13]. С его помощью был проведен многофакторный анализ зависимости показателей заболеваемости от радиационных и нерадиационных факторов. С использованием различных моделей (линейной, квадратичной, линейно-квадратичной) была определена форма зависимости доза-эффект. Была использована простая параметрическая модель избыточного относительного риска (ИОР) на основе Пуассоновской регрессии, которую можно представить в виде:

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

где: a — достигнутый возраст, d — доза (Гр), z_0 — другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни (λ_0), z_1 — факторы, которые могут модифицировать



Рис. 3. Распределение членов когорты по дозовым группам (TRDS-16)

Fig. 3. Distribution of cohort members by dose groups (TRDS-16)

ИОР. Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа $r(d)$ на функцию модификации эффекта ($\epsilon(z_1)$).

Программа DATAV статистического пакета EPICURE позволила стратифицировать все случаи солидных ЗНО и человеко-годы в таблицы по полу, этническим группам (славяне, турки), факту эвакуации, возрасту на начало облучения (по 10 лет от 0 до 60 и старше), достигнутому возрасту (по 5 лет от 0 до 80 и старше), времени после облучения (по 5 лет от 0 до 50 лет и больше), календарным периодам (по 5 лет с 1957 по 2014 гг.), проживанию на территории наблюдения, по году рождения когорты (2 периода: до 1932 г. и после 1932 г.), по дозовым категориям (9 дозовых категорий от 0 до 500 мГр и выше). Стратификация проведена для нескольких латентных периодов: 0, 2, 5, 10 и 15 лет.

Статистическая значимость и доверительные интервалы определялись по методу максимального правдоподобия. Результат считался достоверно значимым при вероятности различия менее 5 %.

Результаты

Оценка зависимости заболеваемости от нерадиационных факторов

Для оценки зависимости базовых уровней заболеваемости солидными ЗНО от нерадиационных факторов программой AMFIT было протестировано влияние на величину риска ряда переменных: пол, национальность, календарный период наблюдения 1, состоящий из двух периодов (до 1986 г. и после), календарный период 2 (три периода наблюдения по 20 лет — 1957–1976, 1977–1996, после 1997), год рождения членов когорты (до 1932 г. и после), факт эвакуации, полоспецифичная степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма. Эти переменные проверялись как для всей КВУРС, так и для когорты с исключением лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече.

При работе со всей КВУРС при включении в модель календарного периода 1 ($p = 0,06$), года рождения когорты ($p = 0,02$), пола ($p < 0,001$), национальности ($p < 0,001$), достигнутого возраста, связанного с полом, в виде логарифма и квадрата логарифма ($p < 0,001$) все переменные оставались значимыми.

В когорте с исключением лиц, дополнительно облученных на реке Тече, в итоговую модель для анализа были включены следующие статистически значимые переменные: пол ($p < 0,001$), национальность ($p < 0,001$), логарифм и квадрат логарифма достигнутого возраста, связанные с полом ($p < 0,001$).

Оценка зависимости заболеваемости от дозы

Для реализации связанных с радиационным облучением случаев ЗНО необходимо время. По причине того, что острое и хроническое облучение в низких дозах могут различаться по эффекту воздействия на организм, было принято решение проанализировать латентные периоды в 0, 2, 5, 10 и 15 лет после радиационного воздействия.

При тестировании разных латентных периодов в КВУРС с использованием линейной зависимости эффекта от дозы (табл. 2), были получены почти идентичные по значению величины ИОР (0,05 на 100 мГр),

Таблица 2
Зависимость ИОР заболеваемости солидными ЗНО от латентного периода
 Dependence of the ERR of the incidence of solid malignant neoplasm on the latent period

Параметры	Латентный период, лет			
	2	5	10	15
КВУРС				
ИОР/100 мГр	0,05	0,05	0,05	0,05
95 % ДИ	0,01–0,10	0,01–0,10	0,01–0,10	0,01–0,11
<i>p</i>	0,02	0,02	0,02	0,02
Избыточные случаи	38	37	35	34
Атрибутивный риск, %	2,3	2,3	2,2	2,1
КВУРС с исключением облученных на реке Тече				
ИОР/100 мГр	0,17	0,16	0,10	0,08
95 % ДИ	-0,05–0,43	-0,06–0,42	-0,11–0,35	-0,13–0,34
<i>p</i>	0,13	0,15	0,36	0,47
Избыточные случаи	25	23	14	11
Атрибутивный риск, %	1,9	1,7	1,0	0,8

отличающиеся только четвертым знаком после запятой с одинаковой статистической значимостью ($p = 0,02$). В случае анализа с исключением из КВУРС лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече, ИОР оставался положительным, но статистически незначимым ($p > 0,05$). Большая вероятность причины этого заключается в том, что лица, получившие дополнительное облучение на реке Тече (2055 человек), составляют группу получивших максимальные дозы в КВУРС, и их исключение снижает статистическую значимость эффекта. Для оценки вида зависимости доза-эффект тестировалось две модели при 5-летнем латентном периоде: линейная и квадратичная.

На рис. 4 представлена дозовая зависимость уровня заболеваемости солидными ЗНО в зависимости от модели. Линейная и квадратичная модели располагаются очень близко на графике в диапазоне доз от 0 до 600 мГр. Статистическая значимость для линейной модели ($p < 0,02$) выше, чем для квадратичной ($p = 0,04$).

Исходя из линейной модели, увеличивается доля связанных с радиацией случаев заболеваемости солидными ЗНО с увеличением дозы. В дозовых группах от 250 до 500 мГр и выше атрибутивный риск (доля избыточных случаев от суммы избыточных и базовых случаев, рассчитанных по модели) составляет 23 % и более. Согласно линейной модели за весь период наблюдения, могло наблюдаться 37 избыточных случаев, вызванных радиацией, или 2,3 % от всех солидных ЗНО в КВУРС на территории наблюдения.

Модификация дозового ответа

Была проведена оценка модификации дозового ответа для линейной модели с 5-летним латентным периодом нерадиационными факторами такими как пол, национальность, возраст к началу облучения, достигнутый возраст и календарный период. Модификация оценена как в КВУРС, так и в когорте с исключением лиц, получивших дополнительное облучение при проживании в селах на реке Тече (табл. 3).

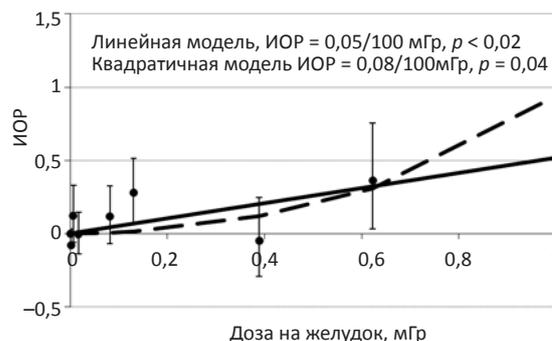


Рис. 4. Модели дозовой зависимости ИОР заболеваемости солидными ЗНО в КВУРС. Сплошная линия — линейная модель, пунктирная линия — квадратичная модель, точки — непараметрическая модель (значения ИОР в дозовых группах с указанием доверительных интервалов)
Fig. 4. Models of the dose dependence of the ERR of the incidence of solid malignant neoplasm in EURT cohort. Solid line — linear model, dotted line — quadratic model, dots — nonparametric model (ERR values in dose groups with confidence intervals)

Таблица 3
Оценка модификации дозовой зависимости заболеваемости ЗНО нерадиационными факторами в КВУРС и при исключении получивших дополнительное облучение на р. Тече
 Assessment of the modification of the dose dependence of the incidence of malignant neoplasm by non-radiation factors in the EURT cohort and with the exception of those who received additional radiation on the Techa river

Параметры	ИОР /100 мГр	
	КВУРС	Исключая облученных на реке Тече
Пол		
Мужчины	0,02 (-0,03–0,09)	0,15 (-0,15–0,51)
Женщины	0,08 (0,02; 0,16)	0,16 (-0,14–0,52)
Национальность		
Русские	0,03 (-0,01–0,08)	0,29 (-1,94–0,88)
Татары/башкиры	0,2 (0,06–0,36)	0,12 (-0,12–0,4)
Возраст к началу облучения		
10 лет	0,05 (0,003–0,13)	0,12 (-0,14–0,44)
40 лет	0,05 (nf–0,11)	0,18 (-0,07–0,48)
Достигнутый возраст		
50 лет	0,04 (0,001–0,10)	0,11 (nf*–0,35)
70 лет	0,06 (0,01–0,12)	0,25 (nf–0,55)
Календарный период		
до 1986	0,03 (-0,03–0,10)	-0,13 (-0,44–0,26)
после 1986	0,07 (0,01–0,15)	0,3 (0,02–0,63)

Примечание: *nf (not found) — граница ДИ не может быть вычислена

При оценке модификации как в КВУРС, так и в когорте с исключением облученных на реке Тече не было выявлено статистически значимой модификации эффекта нерадиационными факторами. Однако в КВУРС были отмечены тенденции к более высоким значениям ИОР на единицу дозы у женщин относительно мужчин, у тюрков относительно русских. Но все эти различия статистически незначимы. Исключение из анализа большедозовой группы облученных на реке Тече существенно снижает дозовую зависимость и

статистическую значимость, что приводит к отрицательным значениям нижней границы доверительного интервала ИОР.

Обсуждение и выводы

Данное исследование является продолжением активной работы УНПЦ РМ по оценке эффектов радиационного воздействия на здоровье населения, проживающего на радиоактивно-загрязненных территориях Южного Урала. Работы, проводимые в центре в 1990-е гг. и в начале 2000-х гг. [1, 3, 7, 8, 9], выявляли тенденции к повышенным коэффициентам смертности в КВУРС у облученного населения по сравнению с группой внешнего контроля, однако, не было обнаружено значимых доказательств связи эффекта с дозой. Эти работы охватывали меньший период наблюдения (30 лет), анализ проводился на меньшей выборке (14,5 тыс. человек), для оценки эффекта использовалась доза внешнего гамма-излучения и доза на красный костный мозг.

В 2013 г. был впервые проведен анализ смертности от солидных ЗНО в КВУРС с использованием индивидуализированных органоспецифических доз [10], рассчитанных по дозиметрической системе TRDS-2009. В расчете доз дополнительно были учтены дозы, полученные некоторыми членами КВУРС при проживании в прибрежных селах на реке Тече. Анализ проводился в КВУРС численностью 21,5 тыс., период наблюдения был увеличен на 20 лет (до 50 лет). В этом исследовании был получен статистически значимый ИОР = 0,07/100 мГр (95 % ДИ: 0,006–0,14, $p = 0,03$) смерти от всех солидных ЗНО.

В 2017 г. впервые проведен анализ риска заболеваемости в КВУРС солидными ЗНО [11], в котором был увеличен период наблюдения за облученными до 53 лет и была использована для анализа усовершенствованная дозовая система (TRDS-16). Анализ риска включал 1426 случаев заболеваний солидными ЗНО при 437719 человеко-лет наблюдения и показал наличие значимого ИОР = 0,05 (90 % ДИ: 0,003–0,1, $p = 0,08$).

В данном исследовании с увеличенным до 57 лет периодом наблюдения (1957–2014 гг.), включающем 1609 случаев заболеваний солидными ЗНО, полу-

чено то же значение избыточного относительного риска, равное 0,05/100 мГр (95 % ДИ 0,01–0,10), но достоверность результатов увеличилась ($p = 0,02$ в сравнении с $p = 0,08$) во всей КВУРС, численностью 21384. Результаты хорошо сопоставимы с предыдущими исследованиями, упомянутыми выше [10, 11]. Помимо этого, полученный риск в КВУРС не противоречит результатам исследований в когорте облученных в прибрежных селах на реке Тече: заболеваемость солидными ЗНО с ИОР = 0,08/100 мГр (95 % ДИ: 0,01–0,15) [14] и смертность от солидных ЗНО с ИОР = 0,06/100 мГр (95 % ДИ: 0,004–0,13) [15]. В дальнейшем для увеличения статистической силы исследования планируется проведение анализа риска в объединенной когорте облученных на Южном Урале, которая была создана на базе КВУРС и КРТ [16].

Кроме того, полученные величины ИОР не противоречат результатам исследований в японской когорте населения, облученного в результате атомных бомбардировок 1945 г., где ИОР заболеваемости равен 0,06/100 мГр при 95 % ДИ: 0,05–0,06 [17], а также в Объединенной когорте рабочих атомных предприятий из 15 стран (INWORKS), где ИОР заболеваемости равен 0,05/100 мГр при 90 % ДИ: 0,02–0,08 [18].

Еще один важный вывод, который был сделан исходя из результатов данного исследования, — риск заболеваемости солидными ЗНО в КВУРС связан с дополнительной дозой, полученной группой членов когорты (2055 человек) до аварии 1957 г. при проживании в прибрежных селах реки Течи. Именно эти люди получили максимальные дозы в когорте. При проведении анализа с исключением этой группы из когорты риск становился незначимым – ИОР равен 0,16/100 мГр (95 % ДИ: –0,06–0,42, $p = 0,15$).

Благодарности

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

Solid Cancer Incidence Risk among the Population Exposed in the East Urals Radioactive Trace over 1957–2014

S.S. Silkin¹, L.Y. Krestinina¹, A.V. Akleyev^{1,2}

¹ Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: ssilkin@urcrm.ru

ABSTRACT

Purpose: Assessment of solid cancer incidence risk in the cohort of exposed population on the territory of the East Urals radioactive trace over the period of follow-up from 1957 to 2014 with the use of the individual-doses provided by the latest TRDS dosimetry system.

Material and methods: The explosion of the liquid radioactive waste storage tank at the «Mayak» Production Association on 29 September 1957 led to the pollution of the territories of the Chelyabinsk and Sverdlovsk Regions and the formation of the EURT, and the population residing on its territory was subjected to protracted chronic external and internal exposure. The analyzed cohort includes 21,384 people, 2,055 of whom received additional radiation before the 1957 accident due to residing in one of the Techa River settlements. The mean dose to the stomach for the members of the EURT cohort was 36 mGy, the maximum — 1.13 Gy. The analysis was performed using the DATAB and AMFIT programs (statistical software package EPICURE). A simple parametric

model of excess relative risk (ERR) was used. Statistical significance and confidence intervals were obtained using the maximum likelihood method.

Results: As a result of the analysis of the solid cancer incidence risk in the EURT cohort during the 57-year follow-up period using the linear model and the 5-year latent period, a statistically significant ERR was obtained which equals to 0.052 / 100 mGy (95 % CI 0.01–0.10, $p = 0.02$) in the entire EURT cohort. When the group of people additionally exposed on the Techa River before the 1957 accident was excluded from the cohort, the risk became insignificant. No significant modification of the dose dependence by non-radiation factors was revealed. The obtained results are compared well with the previous studies of the exposed population in the Southern Urals which were conducted in the Urals Research Center for Radiation Medicine, as well as in the world, devoted to the study of the effects of radiation exposure on population.

Key words: population, radiation risk, East Urals radioactive trace (EURT), solid cancer, incidence risk, excessive relative risk

For citation: Silkin SS, Krestinina LY, Akleyev AV. Solid Cancer Incidence Risk among the Population Exposed in the East Urals Radioactive Trace over 1957–2014. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(4):58–64 (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча. Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселёва. ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ. М. 2001. [Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Eds.: Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow. 2001. 530 p. (In Russ.).]
2. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Под ред. А.В. Аклеева. Челябинск: Книга. 2016. [Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Akleyev AV (ed). Chelyabinsk. 2016. 400 p. (In Russ.).]
3. Аклев АВ, Косенко ММ, Крестинина ЛЮ, Шалагинов СА, Дегтева МО, Старцев НВ. Здоровье населения, проживающего на радиоактивных территориях Уральского региона. М.: РАДЭКОН. 2001. [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. 2001. (In Russ.).]
4. Восточно-Уральский радиоактивный след (сборник статей, посвященных последствиям аварии 1957 г. на ПО «Маяк»). Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. Челябинск. 2012. [East-Urals radioactive trace. Eds.: Akleyev AV, Kiselev MF. Chelyabinsk. 2012. (In Russ.).]
5. Булдаков ЛА. Медицинские последствия радиационной аварии на Южном Урале в 1957 г. Медицинская радиология. 1990;35(12):11–6. [Buldaikov LA. Medical consequences of the radiation accident in the Southern Urals in 1957. Med Radiology. 1990;35(12):11–6. (In Russ.).]
6. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 г. на ПО «Маяк». Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М. 2001. [Ecological and medical consequences of the radiation accident in 1957 at the Mayak PA. Eds.: Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow. 2001:186–212. (In Russ.).]
7. Бурназян АИ. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с. [Burnazyan AI. The results of the study and experience of consequences liquidation of emergency contamination of the territory by the fission products of uranium. Moscow. 1990, 144 p. (In Russ.).]
8. Kostyuchenko VA, Krestinina LY. Long-term irradiation effects in the population evacuated from the East Urals radioactive trace area. Science Total Environment. 1994;142:119–25.
9. Крестинина ЛЮ, Аклев АВ. Онкологическая смертность при хроническом воздействии малых и средних доз облучения в когорте лиц, облученных на ВУРС. Бюллетень сибирской медицины. 2005;4(2):36–44. [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 Russ.).]
10. Крестинина ЛЮ, Силкин СС, Епифанова СБ. Анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа за 50-летний период. Радиационная гигиена. 2014;7(1):23–9. [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. Radiation Hygiene. 2014;7(1):23–9. (In Russ.).]
11. Силкин СС, Крестинина ЛЮ, Толстых ЕИ, Епифанова СБ. 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;10(1):36–46. [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. Radiation Hygiene. 2017;10(1):36–46. (In Russ.). DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-36-46.]
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 Phys. 2019;117(4):378–87.
13. Preston DL, Lubin JH, Pierce DA, McConney ME. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.
14. Davis FG, Krestinina LYu, Preston D, et al. Solid cancer incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007. Radiat Res. 2015;184:56–65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
15. Schonfeld SJ, Krestinina LYu, Epifanova SB, et al. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950–2007). Radiat Res. 2013;179(2):183–9. DOI: 10.1667/RR2932.1.
16. Силкин СС, Крестинина ЛЮ, Старцев ВН, Аклев АВ. Уральская когорта аварийно-облученного населения. Медицина экстремальных ситуаций. 2019;21(3):393–402. [Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev VN, Akleev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. Medicine of Extreme Situations. 2019;21(3):393–402. (In Russ.).]
17. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LYu, Stram DO. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and atomic bomb survivor studies. Radiat Prot Dosim. 2017;173(1):26–31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316.
18. Richardson DB, et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). BMJ. 2015;351:5359. DOI: 10.1136/bmj.h5359.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 14.08.2020. **Принята к публикации:** 21.08.2020.

Article received: 14.08.2020. **Accepted for publication:** 21.08.2020.

Information about the authors:

Silkin S.S. <https://orcid.org/0000-0002-4412-4481>

Krestinina L.Y. <https://orcid.org/0000-0003-0497-5879>

Akleyev A.V. <https://orcid.org/0000-0003-2583-5808>