



<sup>2</sup> Siberian State Medical University, 2 Moskovsky Tract, Tomsk, 634050, Russian Federation<sup>3</sup> Siberian Federal Scientific Clinical Center, 4 Mira Street, Seversk, Tomsk Region, 636035, Russian Federation**Summary**

**Introduction:** Uranium, the basic raw material of the nuclear industry, poses health risks to people occupationally exposed to its compounds. Studies of adverse effects of radiation exposure in workers of nuclear facilities necessitate a cohort of employees handling uranium compounds.

**Objective:** To form a historic cohort and create a database of the personnel of the Siberian Chemical Plant exposed to uranium compounds at workplaces in 1953–2000.

**Materials and methods:** The source of information was the Regional Health and Dosimetry Register of the Seversk Biophysical Research Center, containing data on all current and former employees of the Siberian Chemical Plant (ca. 65,000 people) from the date of establishment of the company to the present.

**Results:** We have created and described a cohort of 1,484 workers (898 men and 586 women) exposed to uranium compounds at the Siberian Chemical Plant in 1953–2000. Health and dosimetry information of the cohort members was entered in a specially developed database of the personnel of the Siberian Chemical Plant engaged in works with uranium compounds during that time period.

**Conclusion:** Both the retrospective cohort and the detailed database allow epidemiological studies of cancer incidence and mortality in the industry workers and evidence-based conclusions about the contribution of occupational exposure to uranium compounds. The cohort of employees of the Siberian Chemical Plant meets all the requirements of up-to-date epidemiological studies in terms of its size and completeness of health and exposure data.

**Keywords:** uranium compounds, personnel, radiation exposure.

**For citation:** Kalinkin DE, Takhauov AR, Takhauova LR, Samoiloa YuA, Milto IV, Takhauov RM. Database of the cohort of workers of the Siberian Chemical Plant exposed to uranium compounds. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2022;30(12):66–72. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-12-66-72>

**Author information:**

✉ Dmitry E. Kalinkin, Dr. Sci. (Med.), Assoc. Prof., Leading Researcher, Seversk Biophysical Research Center; Professor, Department of General and Pediatric Urology and Andrology, Siberian State Medical University; e-mail: [kalinkin750@gmail.com](mailto:kalinkin750@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6948-6075>.

Anas R. Takhauov, Junior Researcher, Seversk Biophysical Research Center; e-mail: [Anas.t@inbox.ru](mailto:Anas.t@inbox.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-5815>.

Lilia R. Takhauova, Junior Researcher, Seversk Biophysical Research Center; Postgraduate student, Department of Ophthalmology, Siberian State Medical University; e-mail: [tahauovaa@gmail.com](mailto:tahauovaa@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6261-9795>.

Yulia A. Samoiloa, Head of the Department of Medical Statistics, Siberian Federal Scientific Clinical Center; e-mail: [kb81@med.tomsk.ru](mailto:kb81@med.tomsk.ru).  
Ivan V. Milto, Dr. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Deputy Director for Research, Seversk Biophysical Research Center; Professor, Department of Morphology and General Pathology, Siberian State Medical University; e-mail: [milto\\_bio@mail.ru](mailto:milto_bio@mail.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9764-4392>.

Ravil M. Takhauov, Dr. Sci. (Med.), Prof., Honored Doctor of the Russian Federation, Director, Seversk Biophysical Research Center; Professor, Department of Health Care Management and Public Health, Siberian State Medical University; e-mail: [niirm2007@yandex.ru](mailto:niirm2007@yandex.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1994-957X>.

**Author contributions:** study conception and design: Kalinkin D.E., Milto I.V., Takhauov R.M.; data collection: Samoiloa Yu.A., Takhauov A.R., Takhauova L.R.; analysis and interpretation of results: Kalinkin D.E., Takhauov A.R.; literature review: Kalinkin D.E., Takhauova L.R.; draft manuscript preparation: Kalinkin D.E., Takhauov A.R., Milto I.V. All authors reviewed the results and approved the final version of manuscript.

**Compliance with ethical standards:** Access to personal data, including medical records of employees of third parties, contained in the Regional Medical and Dosimetric Register, was carried out in accordance with the Regulations on the Regional Medical and Dosimetric Register of the population of Seversk, a closed city in the Tomsk Region, and personnel of the Siberian Chemical Plant introduced by Order No. 64 of May 26, 2021; annual instructions on handling confidential information, including personal data of individuals contained in the database of the Regional Medical and Dosimetric Register of the population of Seversk and personnel of the Siberian Chemical Plant, introduced by Order No. 19 of January 11, 2022, and Order No. 20 of January 11, 2022 on access permission.

**Funding:** The study was carried out within State Assignment No. 388-00162-22-00 dated March 1, 2022.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

Received: October 19, 2022 / Accepted: December 5, 2022 / Published: December 20, 2022

**Введение.** Уран – ключевой химический элемент, являющийся сырьевой основой ядерной энергетики. Однако в силу широкого его использования и одного из главных свойств – радиоактивности, уран служит предметом постоянного научного интереса в отношении его способности вызывать развитие злокачественных новообразований (ЗНО) у работников, прямо или опосредованно с ним контактирующих [1–5].

Так, Surduk S. et al. обнаружили 2 601 запись, посвященную означенной проблеме [6]. В 30 исследованиях сообщается о положительной корреляции между воздействием соединений урана и неблагоприятными последствиями для здоровья. Однако авторы указали, что рассмотренная совокупность доказательств подвержена высокому риску систематической ошибки [7–10].

В публикации Международной комиссии по радиационной защите № 150 представлены результаты недавних эпидемиологических исследований риска развития рака в результате воздействия соединений урана [11]. Эпидемиологические исследования риска развития рака, связанного с воздействием соединений урана, были проведены

среди групп европейских и североамериканских рабочих, занятых в ядерном топливном цикле. Текущие результаты не позволили получить надежные модели «доза – риск» для урана, и для будущих исследований рекомендовано продолжать работу в направлении оценки доз, связанных с хроническим профессиональным облучением персонала соединениями урана [12–16].

Tomasek L. обобщил результаты исследований в когортах работников, занимающихся добычей урана, в частности онкологические риски при низком уровне воздействия, и модели риска с модифицирующим эффектом степени воздействия, возраста и времени после воздействия, которые используются для расчета пожизненных рисков. Автор показал, что избыточные относительные риски на единицу экспозиции, возникающие из-за низких экспозиций, до 10 раз превышают грубые коэффициенты риска [17].

Радон, образующийся в результате естественного распада урана, является второй по значимости причиной рака легкого в развитых странах [18, 19].

В большинстве исследований, посвященных изучению повреждения ДНК у работников

уранодобывающих шахт, наблюдалось значительно более высокое ее повреждение по сравнению с группами, не подвергавшимися воздействию [20].

Жунтовой Г.В. и соавт. изучен вклад пролонгированного профессионального техногенного облучения в заболеваемость и смертность от ЗНО толстого кишечника работников ПО «Маяк», подвергавшихся при осуществлении своей профессиональной деятельности внешнему или внутреннему облучению ионизирующим излучением [21].

Golden A.P. et al. опубликовали результаты исследования когорты более чем из 12 400 рабочих (из которых примерно 1 300 женщин), занятых в работе с соединениями урана. В когорте было выявлено 560 смертей от рака легкого, 503 случая неопухолевых респираторных заболеваний, 67 случаев заболеваний почек, 1 596 случаев ишемической болезни сердца и 101 случай деменции и болезни Альцгеймера. Средняя кумулятивная доза составила 45 мЗв для облучения всего тела внешним ионизирующим излучением и 172 мГр для легких от продуктов распада радона. Однако только в отношении деменции и болезни Альцгеймера у мужчин были выявлены статистически значимые риски (1,29; 95 % доверительный интервал: 1,04; 1,54) [22].

Согласно результатам исследования, опубликованным Semenova Y. et al., наиболее значимая положительная зависимость «доза – реакция» обнаружена между профессиональным воздействием соединений урана и раком легкого. Кроме того, был обнаружен повышенный, но не статистически значимый риск смерти у шахтеров уранодобывающих предприятий из-за рака печени, желудка и почек [23].

Статистически значимое повышение риска возникновения рака легкого у работников урановых производств в своих публикациях отмечают Richardson et al. [24], Rage E. et al. [25] и Zablotska L.B. et al. [26, 27].

Таким образом, несмотря на большое количество публикаций, требуется продолжение исследований, направленных на изучение роли соединений урана в развитии ЗНО у работников объектов использования атомной энергии, с ним контактирующих. Для выполнения исследований необходимо сформировать когорту лиц, занятых в работах с соединениями урана.

Означенная когорта должна быть сформирована из работников крупного предприятия атомной отрасли, на котором осуществляются работы с соединениями урана. На предприятии должны отсутствовать аварийные ситуации, приводящие к сверхнормативному облучению персонала. Данному требованию соответствует Сибирский химический комбинат (СХК) – один из крупнейших в мире комплексов предприятий атомной отрасли.

Персонал СХК трудится на предприятиях основного производства – реакторном (РП), радиохимическом (РХП), разделительном (РдП), сублиматном (СП), плутониевом (ПП) – и вспомогательного производства СХК – ремонтно-механическом заводе и теплоэлектроцентрали. Работники основных производств составляют 52,6 % всего персонала СХК. Соотношение мужчин и женщин на основном и вспомогательном производствах составляет 3,9 : 1 и 2,2 : 1 соответственно.

На различных производствах СХК удельный вес работников, контролируемых по внешнему  $\gamma$ -излучению, различается с учетом специфики производственного процесса, а также используемых технологий и оборудования. На РП и РХП более 70 % работников имеют данные индивидуальной дозиметрии, в то время как на ПП и РдП доля работников, состоящих на индивидуальном дозиметрическом контроле, составляет около 41 %.

Подавляющее большинство работников, подвергавшихся воздействию внешнего  $\gamma$ -излучения, имеют среднюю дозу внешнего облучения (СДВО) в пределах от 0 до 200 мЗв.

**Цель исследования:** сформировать когорту и создать базу данных когорты персонала СХК, задействованного в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., для проведения ретроспективных эпидемиологических исследований по выявлению неблагоприятного воздействия этого радионуклида на здоровье персонала предприятия атомной отрасли.

**Материал и методы.** Источником информации для формирования когорты персонала СХК, задействованного в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., служил региональный медико-дозиметрический регистр Северского биофизического научного центра.

Региональный медико-дозиметрический регистр представляет собой постоянно действующую и пополняемую систему сбора, систематизации персонифицированной информации и научного анализа данных, вследствие чего является эффективным инструментом для реализации эпидемиологических подходов к оценке эффектов воздействия ионизирующего излучения.

В базе данных регионального медико-дозиметрического регистра содержится информация относительно всех действующих и бывших работников СХК (около 65 000 человек) с момента основания предприятия по настоящее время: паспортные данные, сведения о характере профессиональной деятельности, виде профессионального облучения, методах измерения и динамике накопления индивидуальных доз внешнего облучения, содержании радионуклидов в организме, причинах смерти, наиболее значимых заболеваниях, вредных привычках и др.

Основным источником информации о работниках служили индивидуальные карточки (ф. Т-2) сектора учета отдела кадров СХК, содержащие сведения о дате рождения и трудоустройства, месте работы, профессии, переводе с одного предприятия на другое. Данные об индивидуальных дозах внешнего  $\gamma$ -излучения, измеренных с помощью фотоплёночных и термолюминесцентных дозиметров, были получены в отделе охраны труда, ядерной и радиационной безопасности СХК.

**Результаты.** В работе с соединениями урана задействованы следующие подразделения СХК: РдП, СП и РХП. Количество работников РдП, СП и РХП в период 1953–2000 гг. представлено в табл. 1.

Средняя СДВО, накопленная работниками РдП в течение изучаемого периода, составила  $37,81 \pm 61,49$  мЗв (среди мужчин –  $41,20 \pm 64,29$  мЗв, среди женщин –  $10,55 \pm 10,55$  мЗв).

Данные о количественном распределении работников РдП в зависимости от СДВО представлены в табл. 2, из которой следует, что основная



**Таблица 1. Количество работников РдП, СП и РХП (1953–2000 гг.)**

**Table 1. The number of employees of separation production, sublimation production, and radiochemical production, 1953–2000**

	РдП / Separation production	СП / Sublimation production	РХП / Radiochemical production
Мужчины / Men	988	933	1 167
Женщины / Women	289	292	243
Всего / Total	1 277	1 225	1 410

доля работников РдП имеет СДВО в диапазоне 0–100 мЗв (87,66 % от всех лиц когорты РдП с зарегистрированными дозами внешнего облучения).

Средняя СДВО, накопленная работниками СП в течение изучаемого периода, составила  $11,93 \pm 18,36$  мЗв (среди мужчин –  $12,89 \pm 19,88$  мЗв, среди женщин –  $9,02 \pm 12,38$  мЗв).

Данные о количественном распределении работников СП в зависимости от СДВО представлены в табл. 3, из которой следует, что основная доля работников СП имеет СДВО в диапазоне 0–100 мЗв (96,65 % от всех лиц когорты СП с зарегистрированными дозами внешнего облучения).

Средняя СДВО, накопленная работниками РХП в течение изучаемого периода, составила  $12,93 \pm 25,66$  мЗв (среди мужчин –  $13,67 \pm 27,7$  мЗв, среди женщин –  $9,38 \pm 10,99$  мЗв). Данные о количественном распределении работников РХП в зависимости от СДВО представлены в табл. 4, из которой следует, что основная доля работников РХП имеет СДВО в диапазоне 0–100 мЗв

(93,46 % работников РХП с зарегистрированными дозовыми нагрузками).

В табл. 5 представлено количество работников РдП, СП и РХП, задействованных в работе с соединениями урана в 1953–2000 гг.

Как указано в табл. 5, в период 1953–2000 гг. в работе с соединениями урана на СХК были задействованы 227 работников РдП (170 мужчин, 57 женщин), 1 052 работника СП (577 мужчин, 475 женщин) и 205 работников РХП (151 мужчина, 54 женщины).

Далее представлены сведения относительно результатов контроля внешнего и внутреннего облучения у работников РдП, СП и РХП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг.

Контроль внешнего облучения выполнялся у 73 работников РдП: 65 мужчин и 8 женщин (табл. 6). Как указано в табл. 6, 95,6 % работников РдП из рассматриваемой когорты имеют СДВО в диапазоне 0–20 мЗв.

Контроль внутреннего облучения выполнен у 199 работников РдП: 151 мужчины и 48 женщин

**Таблица 2. Распределение работников РдП в зависимости от СДВО**

**Table 2. Distribution of separation production employees by the total external dose**

	СДВО, мЗв / Total external dose, mSv				
	0	(0–100]	(100–200]	(200–500]	(500–1 000]
Мужчины / Men	11	975	2	–	–
Женщины / Women	1	288	0	–	–
Всего / Total	12	1 263	2	–	–

**Таблица 3. Распределение работников СП в зависимости от СДВО**

**Table 3. Distribution of sublimation production employees by the total external dose**

	СДВО, мЗв / Total external dose, mSv				
	0	(0–100]	(100–200]	(200–500]	(500–1 000]
Мужчины / Men	14	897	20	2	–
Женщины / Women	5	287	0	0	–
Всего / Total	19	1 184	20	2	–

**Таблица 4. Распределение работников РХП в зависимости от СДВО**

**Table 4. Distribution of radiochemical production employees by the total external dose**

	СДВО, мЗв / Total external dose, mSv				
	0	(0–100]	(100–200]	(200–500]	(500–1 000]
Мужчины / Men	61	1 086	15	5	–
Женщины / Women	11	232	–	–	–
Всего / Total	72	1 318	15	5	–

**Таблица 5. Количество работников РдП, СП и РХП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг.**

**Table 5. The number of employees of separation production, sublimation production, and radiochemical production engaged in works with uranium compounds in 1953–2000**

	РдП / Separation production	СП / Sublimation production	РХП / Radiochemical production
Мужчины / Men	170	577	151
Женщины / Women	57	475	54
Всего / Total	227	1 052	205

(табл. 7). Как указано в табл. 7, работники РдП из рассматриваемой когорты имели активность соединений урана в моче, не превышающую 3,7 Бк.

Контроль внешнего облучения выполнялся у 465 работников СП: 391 мужчины и 74 женщины (табл. 8). Как указано в табл. 8, 51,2 % работников СП из рассматриваемой когорты имели СДВО в диапазоне 0–100 мЗв.

Контроль внутреннего облучения выполнялся у 530 работников СП: 433 мужчин и 97 женщин (табл. 9). Как указано в табл. 9, 94,3 % работников СП из рассматриваемой когорты имеют активность соединений урана в моче, не превышающую 0,74 Бк.

Среди работников РХП контроль внешне-го облучения выполнялся у 196 работников:

148 мужчин и 48 женщин (табл. 10). Как указано в табл. 10, 45,9 % работников РХП имеют СДВО в диапазоне 0–100 мЗв.

Контроль внутреннего облучения выполнялся у 197 работников РХП: 144 мужчин и 53 женщины (табл. 11). Как указано в табл. 11, 94,1 % работников РХП из рассматриваемой когорты имеют активность соединений урана в моче, не превышающую 0,74 Бк.

**Обсуждение.** В результате исследования сформирована когорта работников СХК, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг. Численность когорты составляет 1 484 человека, из них 898 мужчин и 586 женщин. Из общего количества работников когорты персонал РдП составляет 15,3 %, персонал

**Таблица 6.** Распределение работников РдП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., в зависимости от СДВО

**Table 6.** Distribution of separation production employees engaged in works with uranium compounds in 1953–2000 by the total external dose

	СДВО, мЗв / Total external dose, mSv				
	0	(0–10]	(10–20]	(20–50]	(50–100]
Мужчины / Men	14	38	10	3	–
Женщины / Women	3	5	–	–	–
Всего / Total	17	43	10	3	–

**Таблица 7.** Распределение работников РдП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., в зависимости от активности соединений урана в моче

**Table 7.** Distribution of separation production employees engaged in works with uranium compounds in 1953–2000 by activity of uranium compounds in urine

	Активность соединений урана в моче, Бк / Activity of uranium compounds in urine, Bq				
	≤ 0,046	(0,046–0,74]	(0,74–1,48]	(1,48–3,70]	> 3,70
Мужчины / Men	58	83	7	3	–
Женщины / Women	19	28	1	–	–
Всего / Total	77	111	8	3	–

**Таблица 8.** Распределение работников СП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., в зависимости от СДВО

**Table 8.** Distribution of sublimation production employees engaged in works with uranium compounds in 1953–2000 by the total external dose

	0	(0–10]	(10–20]	(20–50]	(50–100]	> 100
Мужчины / Men	2	39	29	59	62	200
Женщины / Women	1	9	11	16	13	24
Всего / Total	3	48	40	75	75	224

**Таблица 9.** Распределение работников СП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., в зависимости от активности соединений урана в моче

**Table 9.** Distribution of sublimation production employees engaged in works with uranium compounds in 1953–2000 by activity of uranium compounds in urine

	Активность соединений урана в моче, Бк / Activity of uranium compounds in urine, Bq				
	≤ 0,046	(0,046–0,74]	(0,74–1,48]	(1,48–3,70]	> 3,70
Мужчины / Men	124	284	9	7	9
Женщины / Women	40	52	3	–	2
Всего / Total	164	336	12	7	11

**Таблица 10.** Распределение работников РХП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., в зависимости от СДВО

**Table 10.** Distribution of radiochemical production employees engaged in works with uranium compounds in 1953–2000 by the total external dose

	0	(0–10]	(10–20]	(20–50]	(50–100]	> 100
Мужчины / Men	1	7	4	22	34	80
Женщины / Women	–	1	5	5	11	26
Всего / Total	1	8	9	27	45	106

**Таблица 11. Распределение работников РХП, задействованных в работе с соединениями урана в период 1953–2000 гг., в зависимости от активности соединений урана в моче****Table 11. Distribution of radiochemical production employees engaged in works with uranium compounds in 1953–2000 by activity of uranium compounds in urine**

	Активность соединений урана в моче, Бк / Activity of uranium compounds in urine, Bq				
	≤ 0,046	(0,046–0,74]	(0,74–1,48]	(1,48–3,70]	> 3,70
Мужчины / Men	42	93	5	3	1
Женщины / Women	17	35	1	–	–
Всего / Total	59	128	6	3	1

СП – 70,9 %, персонал РХП – 13,8 %. В работе с соединениями урана были задействованы 23 % работников РдП, 85,9 % работников СП и 14,5 % работников РХП.

Целью формирования представленной когорты являлось создание информационной базы данных для изучения неблагоприятного влияния урана и продуктов его распада на здоровье персонала, задействованного в работе с этим радионуклидом.

Когорта сформирована на основании сведений регионального медико-дозиметрического регистра населения ЗАТО Северск и персонала СХК, содержащего информацию относительно всех действующих и бывших работников СХК (около 65 000 человек) с момента основания предприятия по настоящее время.

Представленная когорта является относительно небольшой по численности (1 484 человека) в сравнении с когортами, сформированными в рамках исследований других авторов, посвященных влиянию урана и его соединений на здоровье работников, с ним контактирующих. Так, Golden A.P. et al. описали когорту из 12 400 работников [22], а Rage E. et al. – когорту из 124 507 работников [25].

Тем не менее сформированная когорта является репрезентативной и ассоциирована с базой данных, содержащей тщательно верифицированные детализированные сведения (персональные данные, дозиметрические данные, медико-биологические сведения), необходимые для проведения оценки влияния урана и продуктов его распада на здоровье персонала, задействованного в работах с ним.

В частности, наиболее важными сведениями, необходимыми для выполнения научных исследований в означенном направлении, являются сведения относительно внешнего и внутреннего облучения работников, включенных в когорту.

Как было представлено выше, контроль внешнего облучения выполнялся у 32,2 % работников РдП, СДВО у 95,9 % не превышала 20 мЗв. Контроль внутреннего облучения выполнялся у 87,7 % работников, активность соединений урана в моче не превышала 3,7 Бк.

Контроль внешнего облучения выполнялся у 44,2 % работников СП, СДВО у 51,8 % не превышала 100 мЗв. Контроль внутреннего облучения выполнялся у 50,4 % работников, у 94,3 % активность соединений урана в моче не превышала 0,74 Бк.

Контроль внешнего облучения выполнялся у 95,6 % работников РХП, СДВО у 45,9 % не превышала 100 мЗв. Контроль внутреннего облучения выполнялся у 96,1 % работников, у 94,1 % из них активность соединений урана в моче не превышала 0,74 Бк.

**Заключение.** Сформированная когорта работников СХК, задействованных в работе с соедине-

ниями урана в период 1953–2000 гг., несмотря на относительно небольшой размер, является важным информационно-исследовательским ресурсом для изучения неблагоприятного влияния урана и продуктов его распада на здоровье персонала, с ними контактирующего, и получения научных сведений, обладающих должной степенью доказательности. На основании представленных полных и верифицированных данных о сформированной когорте возможно проведение масштабных международных ретроспективных эпидемиологических исследований влияния урана и его соединений, которые полностью соответствуют основным принципам доказательной медицины.

#### Список литературы / References

- Lane RSD, Frost SE, Howe GR, Zablotska LB. Mortality (1950–1999) and cancer incidence (1969–1999) in the cohort of Eldorado uranium workers. *Radiat Res.* 2010;174(6):773–785. doi: 10.1667/RR2237.1
- Haylock RGE, Gillies M, Hunter N, Zhang W, Phillipson M. Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK national registry for radiation workers. *Brit J Cancer.* 2018;119(5):631–637. doi: 10.1038/s41416-018-0184-9
- Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, et al. Site-specific solid cancer mortality after exposure to ionizing radiation: A cohort study of workers (INWORKS). *Epidemiology.* 2018;29(1):31–40. doi: 10.1097/EDE.0000000000000761
- Gillies M, Haylock R. The cancer mortality and incidence experience of workers at British Nuclear Fuels plc, 1946–2005. *J Radiol Prot.* 2014;34(3):595–623. doi: 10.1088/0952-4746/34/3/595
- Koshurnikova NA, Shilnikova NS, Okatenko PV, et al. Characteristics of the cohort of workers at the Mayak nuclear complex. *Radiat Res.* 1999;152(4):352–363.
- Surdyk S, Itani M, Al-Lobaidy M, et al. Weaponised uranium and adverse health outcomes in Iraq: a systematic review. *BMJ Glob Health.* 2021;6(2):e004166. doi: 10.1136/bmjgh-2020-004166
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. I. Annex B: Exposures of the Public and Workers from Various Sources of Radiation. New York: UNSCEAR; 2010. Accessed December 13, 2022. [https://www.unscear.org/docs/publications/2010/UNSCEAR\\_2010\\_Report.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2010/UNSCEAR_2010_Report.pdf)
- Bouville A, Kryuchkov V. Increased occupational radiation doses: nuclear fuel cycle. *Health Phys.* 2014;106(2):259–271. doi: 10.1097/HP.0000000000000066
- Silver SR, Bertke SJ, Hein MJ, et al. Mortality and ionising radiation exposures among workers employed at the Fernald Feed Materials Production Center (1951–1985). *Occup Environ Med.* 2013;70(7):453–463. doi: 10.1136/oemed-2012-100768
- Yiin JH, Anderson JL, Bertke SJ, Tollerud DJ. Dose-response relationships between internally-deposited uranium and select health outcomes in gaseous diffusion plant workers, 1948–2011. *Am J Ind Med.* 2018;61(7):605–614. doi: 10.1002/ajim.22858

11. Zhivin S, Guseva Canu I, Davesne E, *et al.* Circulatory disease in French nuclear fuel cycle workers chronically exposed to uranium: a nested case-control study. *Occup Environ Med.* 2018;75(4): 270–276. doi: 10.1136/oemed-2017-104575
12. Golden AP, Ellis ED, Cohen SS, *et al.* Updated mortality analysis of the Mallinckrodt uranium processing workers, 1942–2012. *Int J Radiat Biol.* 2022;98(4):701–721. doi: 10.1080/09553002.2019.1569773
13. Kreuzer M, Dufey F, Laurier D, *et al.* Mortality from internal and external radiation exposure in a cohort of male German uranium millers, 1946–2008. *Int Arch Occup Environ Health.* 2015;88(4):431–441. doi: 10.1007/s00420-014-0973-2
14. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation.* UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly. Annex D: Biological Effects of Selected Internal Emitters – Uranium. New York: United Nations; 2017. doi: 10.18356/2055d684-e
15. Tirmarche M, Apostoaei I, Blanchardon E, *et al.* ICRP Publication 150: Cancer Risks from Plutonium and Uranium Exposure. *Ann ICRP.* 2021;50(4):1–143. doi: 10.1177/01466453211028020
16. Сакович В.А. К вопросу о методологии количественной оценки радиационного риска // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13. № 1. С. 94–101. doi: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-94-101
16. Sakovich VA. On the issue of the methodology of quantitative assessment of radiation risk. *Radiatsionnaya Gigiena.* 2020;13(1):94–101. (In Russ.) doi: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-94-101
17. Tomasek L. Lung cancer lifetime risks in cohort studies of uranium miners. *Radiat Prot Dosimetry.* 2020;191(2):171–175. doi: 10.1093/rpd/ncaa143
18. Thandra KC, Barsouk A, Saginala K, Aluru JS, Barsouk A. Epidemiology of lung cancer. *Contemp Oncol (Pozn).* 2021;25(1):45–52. doi: 10.5114/wo.2021.103829
19. Kelly-Reif K, Sandler DP, Shore D, *et al.* Radon and cancer mortality among underground uranium miners in the Příbram region of the Czech Republic. *Am J Ind Med.* 2020;63(10):859–867. doi: 10.1002/ajim.23167
20. da Silva FMR Jr, Tavella RA, Fernandes CLF, Dos Santos M. Genetic damage in coal and uranium miners. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2021;866:503348. doi: 10.1016/j.mrgentox.2021.503348
21. Жунтова Г.В., Азизова Т.В., Банникова М.В., Заварухина Т.П. Динамика показателей заболеваемости раком толстого кишечника в когорте работников, подвергшихся профессиональному облучению // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13. № 3. С. 18–24. doi: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-18-24
21. Zhuntova GV, Azizova TV, Bannikova MV, Zavarukhina TP. Incidence trend for colorectal cancer in the cohort of workers exposed to ionizing radiation. *Radiatsionnaya Gigiena.* 2020;13(3):18–24. (In Russ.) doi: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-18-24
22. Golden AP, Milder CM, Ellis ED, *et al.* Cohort profile: four early uranium processing facilities in the US and Canada. *Int J Radiat Biol.* 2021;97(6):833–847. doi: 10.1080/09553002.2021.1917786
23. Semenova Y, Pivina L, Zhunussov Y, *et al.* Radiation-related health hazards to uranium miners. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2020;27(28):34808–34822. doi: 10.1007/s11356-020-09590-7
24. Richardson DB, Rage E, Demers PA, *et al.* Lung cancer and radon: Pooled analysis of uranium miners hired in 1960 or later. *Environ Health Perspect.* 2022;130(5):57010. doi: 10.1289/EHP10669
25. Rage E, Richardson DB, Demers PA, *et al.* PUMA – pooled uranium miners analysis: cohort profile. *Occup Environ Med.* 2020;77(3):194–200. doi: 10.1136/oemed-2019-105981
26. Zablotska LB, Ashmore JP, Howe GR. Analysis of mortality among Canadian nuclear power industry workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. *Radiat Res.* 2004;161(6):633–641. doi: 10.1667/rr3170
27. Zablotska LB, Lane RSD, Frost SE. Mortality (1950–1999) and cancer incidence (1969–1999) of workers in the Port Hope cohort study exposed to a unique combination of radium, uranium and  $\gamma$ -ray doses. *BMJ Open.* 2013;3(2):e002159. doi: 10.1136/bmjopen-2012-002159

