

Ильин Л.А.<sup>1</sup>, Самойлов А.С.<sup>1</sup>, Цовьянов А.Г.<sup>1</sup>, Шинкарев С.М.<sup>1</sup>, Шандала Н.К.<sup>1</sup>, Ганцовский П.П.<sup>1</sup>, Карев А.Е.<sup>1</sup>, Кухта Б.А.<sup>1</sup>, Симаков А.В.<sup>1</sup>, Клочков В.Н.<sup>1</sup>, Коренков И.П.<sup>1</sup>, Лягинская А.М.<sup>1</sup>, Паринов О.В.<sup>1</sup>, Иванов В.К.<sup>2</sup>, Чекин С.Ю.<sup>2</sup>, Меняйло А.Н.<sup>2</sup>, Туманов К.А.<sup>2</sup>, Соломатин В.М.<sup>3</sup>, Измestьев К.М.<sup>4</sup>

## РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА НА АО «СХК».

### Часть 2: Дозы и риски

<sup>1</sup>Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва.

<sup>2</sup>МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск

<sup>3</sup>АО «Прорыв», Москва

<sup>4</sup>АО «СХК», Северск

Контактное лицо: Александр Георгиевич Цовьянов: fmbc-fmba@bk.ru

### РЕФЕРАТ

**Цель:** Оценка соответствия радиационной защиты персонала, работающего на комплексных экспериментальных установках АО «СХК», требованиям российских норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 по ограничению обобщенного риска потенциального облучения и рекомендациям МАГАТЭ по неперевышению контрольного уровня минимально значимого радиационного риска.

**Материалы и методы:** В качестве исходных данных для предварительной оценки доз облучения персонала используются результаты радиационно-гигиенических исследований факторов радиационного воздействия на персонал, участвующий в производстве смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива на комплексных экспериментальных установках АО «СХК». Модели расчета радиационного риска потенциального облучения разработаны в соответствии с рекомендациями МКРЗ и МАГАТЭ.

**Результаты:** Предварительные оценки доз внешнего гамма-нейтронного ( $2,5 \pm 0,5$  мЗв/год) и внутреннего облучения персонала ( $\sim 1$  мЗв/год<sup>1</sup>) дают представление о текущих уровнях облучения работников комплексных экспериментальных установок. Эти уровни – результат воздействия источников ионизирующего излучения, связанных как с отработкой новых технологий, так и с остаточным радиоактивным загрязнением, обусловленным предыдущей деятельностью, не связанной с изготовлением СНУП-топлива. Представленные оценки доз относятся к сырью, прошедшему глубокую предварительную очистку от радиогенных примесей. При использовании в качестве сырья облученных ядерных материалов, уровни гамма-нейтронного облучения персонала будут значительно выше. Максимальным приращением обобщенного риска потенциального облучения за счёт годового облучения характеризуется женский персонал в возрасте 18 лет на начало облучения, для которого приращение этого риска равно  $1,45 \times 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>, что в 1,37 раза ниже ограничения, установленного российскими нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009:  $2 \times 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>. Все прогнозные значения пожизненной атрибутивной доли радиации (*LARF*) в смертности от злокачественных новообразований существенно меньше контрольного уровня минимально значимого риска, рекомендованного МАГАТЭ (*LARF*=5%), а максимальное значение *LARF*=2,8% достигается для женского персонала в возрасте 18 лет на начало облучения.

**Заключение:** Ограничения радиационных рисков потенциального облучения, установленных НРБ-99/2009, а также рекомендуемые МАГАТЭ по неперевышению контрольного уровня минимально значимого риска (МЗР), выполняются с большим запасом. Полученные результаты и разработанные методики будут использованы для обеспечения радиационной безопасности персонала при переходе от экспериментальных установок к опытно-промышленному внедрению технологии производства СНУП топлива.

<sup>1</sup> Оценочные расчеты проведены в предположении одинакового радиационного воздействия оксидов и нитридов урана и плутония на человека

**Ключевые слова:** смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, радиационная безопасность, комплексная экспериментальная установка, дозы облучения персонала, радиационный риск, обобщенный риск потенциального облучения

**Для цитирования:** Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Б.А., Симаков А.В., Клочков В.Н., Коренков И.П., Лягинская А.М., Паринов О.В., Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Туманов К.А., Соломатин В.М., Измestьев К.М. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Часть 2: Дозы и риски // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 1. С. 39–45. DOI: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-39-45

## Radiation-Hygienic Investigations of Experimental Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel at JSC SChC. Part 2: Doses and Risks

L.A. Ilin<sup>1</sup>, A.S. Samoilov<sup>1</sup>, A.G. Tsovyanov<sup>1</sup>, S.M. Shinkarev<sup>1</sup>, N.K. Shandala<sup>1</sup>, P.P. Gantsovsky<sup>1</sup>, A.E. Karev<sup>1</sup>, B.A. Kukhta<sup>1</sup>, A.V. Simakov<sup>1</sup>, Klochkov V.N.<sup>1</sup>, Korenkov I.P.<sup>1</sup>, A.M. Lyaginskaya<sup>1</sup>, O.V. Parinov<sup>1</sup>, V.K. Ivanov<sup>2</sup>, S.Yu. Chekin<sup>2</sup>, A.N. Menyailo<sup>2</sup>, K.A. Tumanov<sup>2</sup>, V.M. Solomatina<sup>3</sup>, K.M. Izmestev<sup>4</sup>

<sup>1</sup>A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

<sup>2</sup>A.F. Tsyb Medical Radiological Research Centre, Obninsk, Russia

<sup>3</sup>JSC «Proryv», Moscow, Russia

<sup>4</sup>JSC «Siberian Chemical Combine», Seversk, Russia

Contact person: Alexander Georgievich Tsovyanov: fmbc-fmba@bk.ru

### ABSTRACT

**Purpose:** Assessment of the compliance of the radiation protection of workers at the complex experimental installations of JSC SChC with the requirements of the Russian radiation safety standards NRB-99/2009 to limit the generalized risk of potential exposure and the IAEA recommendations for not exceeding the control level of the minimum significant radiation risk.

**Materials and methods:** The results of radiation-hygienic investigations of radiation exposure factors affecting workers involved in the manufacture of mixed uranium-plutonium nitride (MUPN) fuel at the complex experimental installations of JSC SChC are used as the input data for the preliminary assessment of radiation doses to workers. The models for assessment of radiation risk of potential exposure have been developed in accordance with the recommendations of the ICRP and the IAEA.

**Results:** Preliminary estimates of the doses of external gamma-neutron ( $2.5 \pm 0.5$  mSv / year) and internal exposure of workers ( $\sim 1$  mSv/year<sup>1</sup>) are related to the current levels of exposure of workers of complex experimental installations. These levels are the result of exposure to ionizing radiation sources associated both with the development of new technologies and with residual radioactive contamination resulting from previous activities not related to the manufacture of MUPN fuel. The presented dose estimates are related to the use of raw materials that have undergone deep preliminary purification from radiogenic impurities. When irradiated nuclear materials are used as raw materials, the levels of gamma-neutron exposure to workers will be significantly higher. The maximum increase in the generalized risk of potential exposure due to annual exposure is estimated for women aged 18 years at the beginning of exposure, for which the increase in this risk is  $1.45 \times 10^{-4}$  year<sup>-1</sup>, which is 1.37 times lower than the limit established by the Russian radiation safety standards NRB-99/2009:  $2 \times 10^{-4}$  year<sup>-1</sup>. All predicted values of the lifetime attributable fraction of radiation (LARF) in mortality from malignant neoplasms are significantly less than the control level of the minimum significant risk recommended by the IAEA (LARF = 5 %), and the maximum value of LARF = 2.8 % is achieved for women aged 18 years at the beginning of exposure.

**Conclusion:** Restrictions on the radiation risks of potential exposure, established by NRB-99/2009, as well as those recommended by the IAEA for not exceeding the reference level of the minimum significant risk, are met with a large reserve. The results obtained and the developed methods will be used to ensure the radiation safety of workers during the transition from experimental installations to pilot industrial implementation of the technology for the production of MUPN fuel.

<sup>1</sup> Preliminary estimates have been done under the assumption of a similar inhalation dose coefficients for intake of oxides of uranium and plutonium and of nitrides of uranium and plutonium for a man

**Keywords:** *mixed nitride uranium-plutonium fuel, radiation safety, complex experimental installation, radiation dose to workers, radiation risk, generalized risk of potential exposure*

**For citation:** Ilin LA, Samoilov AS, Tsovyanov AG, Shinkarev SM, Shandala NK, Gantsovsky PP, Karev AE, Kukhta BA, Simakov AV, Klochkov VN, Korenkov IP, Lyaginskaya AM, Parinov OV, Ivanov VK, Chekin SYu, Menyailo AN, Tumanov KA, Solomatin VM, Izmestevyev KM. Radiation-Hygienic Investigations of Experimental Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel at JSC SChC. Part 2: Doses and Risks. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;67(1):39-45. DOI: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-39-45

## Введение

Проектное направление «Прорыв», несомненно, является одним из главных мировых проектов в ядерной энергетике. Предусматриваемое в рамках реализации этого проектного направления создание ядерных энергетических технологий нового поколения на базе замкнутого ядерного топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах, работающих на новых видах топлива, будет характеризоваться «естественной безопасностью». Причем, это понятие распространяется как на сами реакторные установки, так и на весь топливный цикл, и оно включает в себя [1, 2]:

- исключение аварий на АЭС и на предприятиях ядерного топливного цикла, требующих эвакуации, и, тем более, отселения населения (техническая безопасность);
- радиационно-миграционную эквивалентность захораниваемых долгоживущих радиоактивных отходов и добываемого топливного сырья (экологическая безопасность).

Следует констатировать, что проблема обеспечения радиационной безопасности персонала, населения и охрана окружающей среды в атомной энергетике по-прежнему являются приоритетными. Согласно Указу Президента РФ «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», подписанному 13 октября 2018 года, основная задача в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности – «защита в соответствии с принципом приемлемого риска». Оценка радиационных рисков имеет сегодня ключевое значение в комплексе проблем радиационной защиты персонала и населения. Этот подход полностью согласуется с современными требованиями «Международных основных норм безопасности МАГАТЭ» [3], где подчеркивается необходимость постоянного мониторинга персонала и населения как по дозам облучения, так и рискам возможной индукции радиационно-обусловленной онкологической заболеваемости. Вопросы

обеспечения радиационной безопасности населения при реализации всего замкнутого ядерного топливного цикла, в котором опасность для здоровья человека полученных радиоактивных отходов (РАО) не должна превышать опасности потребляемого ядерной энергетикой природного урана, подробно рассмотрены в работах российских специалистов [4–7].

В настоящей статье на основе результатов выполненных в 2018–2019 гг. радиационно-гигиенических исследований экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива на АО «СХК», опубликованных в [8], приведены предварительные оценки доз облучения персонала. Целью статьи является оценка соответствия радиационной защиты персонала, работающего на комплексных экспериментальных установках (КЭУ) АО «СХК», требованиям российских норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 [9] по ограничению обобщенного риска потенциального облучения и рекомендациям МАГАТЭ по непревышению контрольного уровня минимально значимого радиационного риска (МЗР) [10].

Необходимо подчеркнуть, что многолетний предшествующий опыт, накопленный многими коллективами исследователей, убедительно свидетельствует о неправомерности механического переноса результатов оценки факторов радиационного воздействия на персонал, полученных, например, на экспериментальных установках по изготовлению СНУП-топлива, на их промышленное производство. Это же касается и оценок доз внешнего и внутреннего облучения задействованного персонала. В то же время, апробированные в данных радиационно-гигиенических исследованиях на экспериментальных комплексных установках инструментально-методические подходы по оценке факторов радиационного воздействия на персонал, в дальнейшем будут использованы для проведения аналогичных исследований при опытно-промышленной эксплуатации новых модулей фабрикация-рефабрикация СНУП-топлива и реалистичной оценки доз внешнего и внутреннего облучения персонала в новых условиях производства.

### Оценка доз внешнего облучения

В работе [8] подробно дано описание методов и предварительных результатов проведения радиационно-гигиенического исследования по оценке параметров внешнего гамма-нейтронного излучения, которому подвергается персонал, участвующий в производстве нового вида топлива – СНУП-топлива на комплексных экспериментальных установках КЭУ-1 и КЭУ-2 АО «СХК». В этой работе показано, что основными источниками измеренных значений мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД) гамма-нейтронного излучения в помещениях КЭУ-1 являются боксы, где происходит прессование таблеток, дробление шашек и бракованных таблеток, а также временное хранение продукции. При этом отмечено, что наибольшие значения МАЭД зарегистрированы в тех боксах, в которых излучение сформировано загрязнением, обусловленным прошлой эксплуатацией, и не связано с фабрикой СНУП-топлива. Констатируется, что выявлен существенный вклад нейтронного излучения в формирование индивидуальных доз персонала, который на отдельных рабочих местах КЭУ-1 превышал вклад гамма-излучения. Анализ измеренных значений МАЭД на КЭУ-2 показал, что мощным источником внешнего излучения являлась нефункционирующая труба вытяжной вентиляции, проходящая над КЭУ-2. Оценка вклада гамма-излучения со стороны вытяжной трубы во внешнее облучение персонала, выполненная с помощью коллиматора, составила до 85 % на отдельных рабочих местах.

Материалы, приведенные в работе [8], явились исходными данными для проведения предварительной оценки доз внешнего облучения персонала при производстве СНУП-топлива на экспериментальных установках КЭУ-1 и КЭУ-2.

Оценки эффективной дозы внешнего облучения персонала определялись на основании результатов дозиметрического контроля рабочих мест и индивидуального дозиметрического контроля. Согласно [11] при наличии результатов измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД) на рабочем месте эффективную дозу внешнего облучения  $E^{ВНЕШ}$ , мЗв, следует рассчитывать по формуле

$$E^{ВНЕШ} = 0,001 \times \sum_k \dot{H}^*(10)_k \times \Delta t_k, \quad (1)$$

где  $\Delta t_k$  – длительность выполнения  $k$ -ой операции работником в течение контролируемого периода в часах при средней МАЭД  $\dot{H}^*(10)_k$ , мкЗв/ч.

Поскольку производство экспериментальное, значения  $\Delta t_k$  – жестко не установлены и варьируют в широких пределах. Кроме того, как показали исследования динамики накопления индивидуального эквивалента дозы индивидуальными дозиметрами, регистрирующими результаты измерений на внутреннюю память, характер работы на ряде операций в соответствии с особенностями применяемой опытной технологии является периодическим: например, на операции прессования 10–20 мин облучения

сменяются перерывами на 10–20 мин. Таким образом, достоверно определить действительные или хотя бы оценочные значения  $\Delta t_k$  не представляется возможным. Значения  $\dot{H}^*(10)_k$  существенно варьируют в зависимости от выполняемой операции (до двух порядков), что не позволяет принять  $\Delta t_k$  равными или определить оценку «сверху» для значения  $E^{ВНЕШ}$  (такая оценка будет несостоятельна).

Данных недостатков лишен метод индивидуального дозиметрического контроля, поэтому в период с 9 октября по 13 ноября 2019 года всем работникам экспериментальной установки выдавались дозиметры различных типов: термолюминесцентный гамма-нейтронный дозиметр ДВГН-01, термолюминесцентный кожный дозиметр МКД тип Б, электронный прямопоказывающий дозиметр EPD-N2 и электронный накопительный дозиметр гамма и рентгеновского излучения DIS-1. Прогноз значений эффективных и эквивалентных доз в случае круглогодичной занятости персонала проводился по формуле:

$$H = \frac{1700}{k \times \Delta T} \times \sum_k [H_p(d)_k - H_p(d)_{\text{ФОНОВЫЙ}}], \quad (2)$$

где  $\Delta T$  – длительность рабочего времени, в течение которого работник носил дозиметр, часы;  $k$  – количество работников участвующих в исследованиях,  $H_p(d)_k$  – значение индивидуального эквивалента дозы, накопленного дозиметром  $k$ -го работника, мЗв,  $H_p(d)_{\text{ФОНОВЫЙ}}$  – показания фонового дозиметра, экспонировавшегося в месте хранения дозиметров, мЗв.

По итогам анализа и обобщения полученных данных о закономерностях формирования полей фотонного и нейтронного излучения на рабочих местах персонала КЭУ-1 и КЭУ-2, подробно изложенных в [8], выполнены предварительные оценки дозы внешнего облучения, представленные в табл. 1.

Необходимо подчеркнуть, что оценки дозы внешнего облучения, приведенные в табл. 1, относятся к сырью, прошедшему глубокую предварительную очистку от радиогенных примесей. При использовании в качестве сырья для изготовления СНУП-топлива облученных ядерных материалов, уровни гамма-нейтронного облучения персонала ожидаются значительно выше и будут отличаться от представленной в статье картины.

### Оценка доз внутреннего облучения

В работе [8] также дано подробное описание методов и предварительных результатов проведения радиационно-гигиенического исследования по определению физико-химических свойств радиоактивных аэрозолей, ответственных за внутренне облучение персонала, участвующего в производстве СНУП-топлива на экспериментальных установках АО «СХК». В рамках исследования физико-химических свойств проводилось изучение радионуклидного, дисперсного состава аэрозолей, оценивался тип соединения при ингаляции, определялись морфологические и структурные характеристики аэрозольных частиц, реакционные свойства аэрозолей в процессе выхода в воздуш-

Таблица 1.

Оценки дозы внешнего облучения персонала КЭУ-1 и КЭУ-2 на рабочих местах  
Estimates of the external exposure dose to the personnel of KEU-1 and KEU-2 at workplaces

Облучаемый орган	Среднее значение индивидуальной эффективной/эквивалентной дозы	
	за смену, мкЗв/(6 час)	за год, мЗв/год
Все тело, гамма-излучение	7,4 <sup>@</sup> ± 1,5 <sup>S</sup>	2,1 <sup>@</sup> ± 0,4
Все тело, нейтронное излучение	1,5 <sup>@</sup> ± 0,3	0,4 <sup>@</sup> ± 0,1
Хрусталик глаза	8,0 <sup>#</sup> ± 1,8	2,3 <sup>#</sup> ± 0,5
Кожа лица	10 <sup>#</sup> ± 2	2,7 <sup>#</sup> ± 0,6
Гонады	12 <sup>#</sup> ± 5	3,4 <sup>#</sup> ± 1,3
Кожа кистей рук	680 <sup>#</sup> ± 180	190 <sup>#</sup> ± 50

Примечание: @ – эффективная доза; # – эквивалентная доза; S – оценка стандартного отклонения



ную среду рабочей зоны и дальнейшего старения, а также конечные химически стабильные продукты окисления.

Согласно предварительным результатам исследований проб аэрозолей [8] суммарная активность альфа-излучающих нуклидов в пробах определяется преимущественно изотопами  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  – свыше 80 %. Во всех пробах выявлено преобладание медленно-растворимых соединений, их вклад находится в диапазоне (76–86) %. Наличие быстрорастворимых соединений (9–12) % может быть обусловлено особенностями морфологии и дисперсного состава частиц. Исследования дисперсного распределения аэрозолей выполнены для различных условий работы (наработка ШУП-топлива, период профилактических и ремонтных работ) и разных рабочих мест. Установлено, что типовым является бимодальное распределение аэрозольных частиц. Так, например, в операторской зоне КЭУ-1 приработке ШУП-топлива значение активности среднего медианного аэродинамического диаметра (АМАД) субмикронной фракции составило 400 нм с вкладом в объемную активность (ОА) 37 %, а значение АМАД грубодисперсной фракции, вероятно, обусловленное операциями прессования и дробления, составило более 9 мкм. Исследования морфологических и структурных характеристик показали, что большая часть исследованных частиц являются агрегатами на основе оксида урана и конгломератами на основе оксидов кремния, кальция, железа, алюминия, магния и др., которые содержат субмикронные включения индивидуальных уран-содержащих частиц или их агрегатов, средний размер которых составляет порядка 100 нм. Средний размер агрегатов и конгломератов, содержащих уран, варьирует от 0,46 до 9,9 мкм. При ингаляционном поступлении и последующем взаимодействии с жидкостями тела данные конгломераты наноструктурированных частиц могут распадаться на индивидуальные частицы. В этом случае, несмотря на присутствие в воздухе рабочей зоны грубодисперсных аэрозолей, внутреннее облучение будет определяться частицами субмикронного и, возможно, нанометрового диапазона. В работе [8] отмечено, что выявлена высокая реакционная способность ШУП-соединений, обуславливающая практически мгновенное окисление торакальной фракции аэрозолей ШУП-топлива при контакте с воздушной средой. По итогам совокупных исследований аэрозольных частиц сделан вывод, что сложный морфологический и дисперсный состав в совокупности со сложным химическим составом, обусловленным процессами старения аэрозолей, может привести к кардинальному отличию процессов биокинетики ШУП-аэрозолей в организме человека, процесса дозообразования и, следовательно, большей степени радиационной опасности по сравнению с принятыми в моделях МКРЗ для U и Pu.

Текущие результаты исследований свидетельствуют о существенной зависимости реакционных свойств аэрозолей от многих факторов. Среди этих факторов: размеры частиц, среда, в которой находятся частицы, влажность атмосферы, химический состав продуктов и др.

Поскольку значения дозовых коэффициентов для ингаляционного поступления аэрозолей ШУП-топлива отсутствуют, оценочные расчеты в предположении одинакового радиационного воздействия оксидов и нитридов урана и плутония на человека дают относительно низкие значения текущих годовых ожидаемых эффективных доз облучения персонала КЭУ – в районе одного мЗв.

В связи с отмеченными неопределенностями в оценке дозы внутреннего облучения персонала по результатам контроля радиоактивных аэрозолей в воздухе большое значение приобретают методы оценки дозы внутреннего облучения по измерениям биопроб персонала. В рамках данного исследования была адаптирована к условиям ре-

шаемой задачи и аттестована методика одновременного определения содержания урана, плутония и америция в пробах мочи, что позволило повысить чувствительность используемого альфа-спектрометрического метода.

Полученные результаты говорят в пользу предположения о незначительных уровнях поступления трансурановых элементов в организм обследованного персонала. Вместе с тем, необходимо учитывать, что зачастую в практике дозиметрического контроля внутреннего облучения имеет место несовпадение оценок, получаемых с использованием биофизических методов, с оценками, получаемыми в результате дозиметрического контроля рабочих мест (ДКРМ, группового контроля). Исходя из того, что данное исследование носило пилотный характер, в дальнейшем необходимо проведение специальной работы по согласованию между собой методических аспектов этих взаимодополняющих друг друга подходов с целью получения при их использовании непротиворечивых результатов.

### Прогноз радиационных рисков

При дозах облучения менее 1 Зв радиационный риск, т.е. вероятность радиационно-индуцированного случая заболевания или смерти [12], хорошо оценивается величиной пожизненного атрибутивного риска (*LAR*, от англ. Lifetime Attributable Risk) [13, 14].

В работе [15] показано, что если человек облучался неоднократно, в разных возрастах, то величину *LAR* следует рассчитывать по формуле:

$$LAR(s, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} \left[ \frac{S(s, a)}{S(s, e)} \cdot EAR(s, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) \right], \quad (3)$$

где *EAR* – избыточная абсолютная частота радиационного риска (от англ.: Excess Absolute Rate); *S* – функция дожития; *s* – пол; *e* – достигнутый возраст (здесь и далее – в годах); *a* – возраст дожития;  $g_1, \dots, g_n$  – возраст на момент облучения и  $d_1, \dots, d_n$  – соответствующие годовые эквивалентные дозы облучения в органах и тканях, Зв; *n* – число годовых облучений; *DDREF* – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы;  $a_{max} = 100$  лет – максимальный возраст дожития; формулы для вычисления *EAR* используются в соответствии с рекомендациями МКРЗ [14]; Применялся *DDREF*=2 для солидных злокачественных новообразований (ЗНО) и *DDREF*=1 для лейкозов также в соответствии с рекомендациями МКРЗ [14].

Другой часто используемой метрикой пожизненного радиационного риска является пожизненная атрибутивная доля радиации в этиологии рассматриваемого случая заболевания или смерти (*LARF*, от англ. Lifetime Attributable Risk Fraction) [10, 13].

$$LARF = \frac{LAR}{LAR + LBR} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где *LAR* определяется выражением (3), а *LBR* (от англ. Lifetime Baseline Risk) – величина пожизненного фонового (не связанного с облучением) риска, вычисляется по следующей формуле:

$$LBR(s, e) = \sum_{a=e}^{a_{max}} \lambda_0(s, a) \cdot \frac{S(s, a)}{S(s, e)}, \quad (5)$$

в которой  $\lambda_0$  – фоновый (не связанный с облучением) показатель риска; остальные обозначения – такие же, как в формуле (3).

В контексте данной работы величины *LAR* (3) и *LARF* (4), (5) вычислялись для радиационно-обусловленных случаев смерти от ЗНО.

Используя определения пожизненных рисков (3–5) и оценки доз внешнего облучения всего тела, приведенные в табл. 1, можно рассчитать величины *LAR* и *LARF* для персонала КЭУ-1 и КЭУ-2. На рис. 1, 2 приведены прогнозные значения *LAR* смертности от ЗНО, в зависимости

от пола и возраста персонала на начало облучения, для сценариев годового облучения и при ежегодном облучении, соответственно.

Значения  $LAR$  на рис. 1 (для сценария однократного годового облучения) соответствуют понятию НРБ-99/2009 обобщенного риска для ситуаций потенциального облучения («произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением» [9]). Согласно НРБ-99/2009 [9], ограничение обобщенного риска потенциального облучения (ОРПО) составляет  $2 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$ . Максимальным приращением  $LAR$  за счёт годового облучения характеризуется женский персонал в возрасте 18 лет на начало облучения, для которого приращение  $LAR = 1,45 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$ , что существенно ниже ограничения ОРПО =  $2 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$  (в 1,37 раза).

Значения  $LAR$  на рис. 2 (для сценария ежегодного облучения) следует сопоставлять с граничной суммарной величиной ОРПО (за счёт ежегодного максимального прироста  $2 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$ ), накопленной за прогнозируемый период облучения. Последний можно оценить, как прогнозируемое число лет облучения персонала от определённого возраста на начало облучения до возраста 65 лет включительно. Ограничение суммарного ОРПО, равное  $2 \times 10^{-4}$  год $^{-1} \times [66 \text{ лет} - \text{возраст на окончание облучения}]$ , представлено на рис. 2 прямой линией «Ограничение суммарного ОРПО». Все прогнозные значения  $LAR$  для персонала КЭУ-1 и КЭУ-2 существенно меньше этого ограничения суммарного ОРПО, минимум в 2,5 раза: максимальная величина граничного суммарного ОРПО =  $9,6 \times 10^{-3}$ , в то время как для женского персонала возраста 18 лет на начало облучения, имеющего максимальные радиационные риски, суммарный  $LAR = 3,8 \times 10^{-3}$ . Для остальных возрастов отношение радиационного риска персонала к граничному значению ещё меньше.

На рис. 3 приведены прогнозные значения  $LARF$  смертности от ЗНО, в зависимости от пола и возраста персонала на начало облучения, при ежегодном облучении. МАГАТЭ [10] характеризует контрольный уровень МЗР величиной  $LARF = 5\%$ , при условии накопленных индивидуальных доз облучения в среднем 100 мЗв и объёме наблюдений за когортой порядка 4 млн. чел.-лет. Последнее число соответствует продолжительности наблюдения 50 лет за когортой 80 тыс. человек. Показано, что с уменьшением числа чел.-лет наблюдения в когорте, МЗР увеличивается [16]. Все прогнозные значения  $LARF$  на рис. 3 существенно меньше МЗР  $LARF = 5\%$ , а максимальное значение  $LARF = 2,8\%$  достигается для женского персонала в возрасте 18 лет на начало облучения. Это означает, что для персонала КЭУ-1 и КЭУ-2 риски ЗНО, обусловленные существующими полями излучений на рабочих местах, невозможно выявить даже при его пожизненном медицинском наблюдении.

В данном исследовании пожизненный радиационный риск ( $LAR$ ) персонала за счёт внешнего гамма- и нейтронного облучения всего тела на рабочих местах КЭУ-1 и КЭУ-2 (суммарно в дозе 2,5 мЗв за год), как минимум, в 1,37 раза меньше, чем ограничение ОРПО =  $2 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$ , установленное НРБ-99/2009 [9]. Это справедливо для женского персонала в возрасте 18 лет ( $LAR = 1,45 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$ ), и оставшаяся дозовая квота до достижения ограничения ОРПО =  $2 \times 10^{-4}$  (например, ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения) для этой группы персонала не должна превышать 0,96 мЗв/год. Для мужского персонала в возрасте 18 лет  $LAR = 1,14 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$ , и оставшаяся дозовая квота до достижения ограничения ОРПО =  $2 \times 10^{-4}$  составляет уже 1,9 мЗв/год. С увеличением возраста оставшаяся дозовая квота по потенциальному облучению увеличивается, вплоть до 15 мЗв/год и 20 мЗв/год для женщин и мужчин, соответственно.

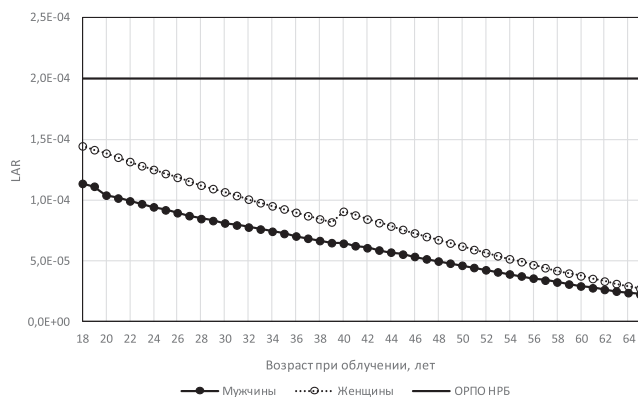


Рис. 1. Прогнозные значения пожизненного атрибутивного риска ( $LAR$ ) смертности от ЗНО, в зависимости от пола и возраста персонала на начало облучения, после годового внешнего гамма-облучения в дозе 2,1 мЗв год $^{-1}$  и годового внешнего нейтронного облучения в дозе 0,4 мЗв год $^{-1}$ ; ограничение ОРПО =  $2 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$ , в соответствии с НРБ-99/2009 [9]

Fig. 1. Predicted values of the lifetime attributable risk ( $LAR$ ) of mortality from cancer, depending on the sex and age of the personnel at the beginning of exposure, after an annual external gamma irradiation at a dose of 2.1 mSv year $^{-1}$  and an annual external neutron irradiation at a dose of 0.4 mSv year $^{-1}$ ; limitation of ORPO =  $2 \times 10^{-4}$  year $^{-1}$ , in accordance with NRB-99/2009 [9]

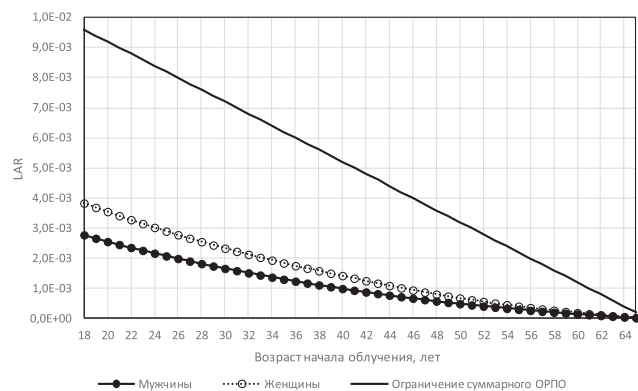


Рис. 2. Прогнозные значения пожизненного атрибутивного риска ( $LAR$ ) смертности от ЗНО, в зависимости от пола и возраста персонала на начало облучения, при ежегодном внешнем гамма-облучении в дозе 2,1 мЗв год $^{-1}$  и внешнем нейтронном облучении в дозе 0,4 мЗв год $^{-1}$ ; ограничение суммарного ОРПО =  $2 \times 10^{-4}$  год $^{-1} \times$  [прогнозируемое число лет облучения]

Fig. 2. Predicted values of lifetime attributable risk ( $LAR$ ) of mortality from cancer, depending on gender and age of personnel at the beginning of exposure, with annual external gamma irradiation at a dose of 2.1 mSv year $^{-1}$  and external neutron irradiation at a dose of 0.4 mSv year $^{-1}$ ; total ORPO limit =  $2 \times 10^{-4}$  year $^{-1} \times$  [predicted number of years of exposure]

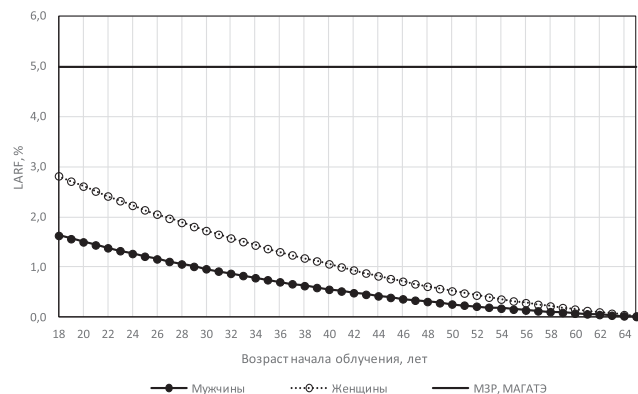


Рис. 3. Прогнозные значения пожизненной атрибутивной доли радиации ( $LARF$ , %) в смертности от ЗНО, в зависимости от пола и возраста персонала на начало облучения, при ежегодном внешнем гамма-облучении в дозе 2,1 мЗв год $^{-1}$  и внешнем нейтронном облучении в дозе 0,4 мЗв год $^{-1}$ . Минимально значимый риск (МЗР, МАГАТЭ):  $LARF = 5\%$

Fig. 3. Predicted values of the lifetime attributable fraction of radiation ( $LARF$ , %) in mortality from cancer, depending on the sex and age of the personnel at the beginning of exposure, with an annual external gamma irradiation at a dose of 2.1 mSv year $^{-1}$  and external neutron irradiation at a dose of 0.4 mSv year $^{-1}$ . Minimum significant risk (MHR, IAEA):  $LARF = 5\%$

Ограничение по суммарному ОРПО за всё время работы персонала, с максимальным значением  $9,6 \times 10^{-3}$  (рис. 2) является производным от ограничения на прирост ОРПО  $= 2 \times 10^{-4}$  год<sup>-1</sup> за счёт годового облучения, установленного НРБ-99/2009 [9]. Для исследованной ситуации ежегодного облучения, с увеличением возраста персонала оставшаяся дозовая квота (до достижения контрольного уровня риска, отображённого на рис. 2 прямой линией) уменьшается, но не становится меньше 15 мЗв для женщин и 20 мЗв для мужчин.

После воздействия ионизирующей радиации в облучённой когорте можно наблюдать увеличение частоты случаев возникновения ЗНО, которое проявляется спустя длительное время (годы) после облучения [12]. Такой эффект является стохастическим (имеет вероятностную природу) и при малых дозах облучения (менее 0,2 Гр) является основным долговременным медицинским последствием действия ионизирующей радиации. Для целей прогноза принимается, что риск возникновения радиационно-обусловленных ЗНО прямо пропорционален дозе облучения, в том числе, и при сколь угодно малых дозах облучения [12, 14].

Однако из-за стохастической природы радиационного риска и из-за того, что радиационно-обусловленные случаи ЗНО не являются непосредственно наблюдаемыми, для каждой облучённой когорты существует минимальный обнаружимый радиационный риск (ниже которого нельзя доказать связь между облучением и частотой ЗНО). Наиболее универсальной метрикой для выражения минимально обнаружимого радиационного риска является *LARF*. Величина *LAR* существенно зависит от эпидемиологических характеристик популяции, представителями которой являются члены изучаемой когорты, в то время как величина *LARF* является более устойчивой при переносе прогноза риска между разными популяциями [13]. Поэтому контрольный уровень МЗР, выраженный через *LARF* и полученный на одной когорте, можно использовать как контрольную характеристику радиационных рисков и в других когортах, похожих по уровню накопленных индивидуальных доз облучения и по прогнозируемому числу чел.-лет наблюдения. В проведенном исследовании прогноз накопленных за время работы индивидуальных доз внешнего облучения персонала может достигать 120 мЗв, т.е. соответствует уровню доз, для которого определялся МЗР МАГАТЭ в виде *LARF* = 5 % [10]. Размер же когорты персонала КЭУ крайне мал. Учитывая, что для исследованной ситуации облучения максимальная величина *LARF* = 2,8 % (для женщин 18 лет), значимые риски ЗНО, обусловленные облучением, нельзя будет установить, даже если весь персонал Госкорпорации «Росатом» будет облучаться в таких условиях и будет находиться под медицинским наблюдением пожизненно.

### Выводы

1. Многолетний предшествующий опыт, накопленный многими коллективами исследователей, убедительно свидетельствует о неправомерности механического переноса результатов оценки факторов радиационного воздействия на персонал, полученных, например, на экспериментальных установках по изготовлению СНУП-топлива, на их промышленное производство. Это же касается и оценок доз внешнего и внутреннего облучения задействованного персонала. В то же время, апробированные в данных радиационно-гигиенических исследованиях на экспериментальных комплексных установках инструментально-методические подходы по оценке факторов радиационного воздействия на персонал, в дальнейшем будут использованы для проведения аналогичных исследований при опытно-промышленной эксплуатации новых модулей фабрикация-рефабрикация СНУП-топлива и реалистичной оценки доз внешнего и внутреннего облучения персонала в новых условиях производства.

2. При запуске в опытно-промышленную эксплуатацию на АО «СХК» модуля фабрикация-рефабрикация СНУП-топлива факторы радиационного воздействия на персонал претерпят существенные изменения, т.к. большая загрузка производственных мощностей и конкретная реализация технологической цепочки (ее автоматизация) могут кардинально изменить картину радиоактивного загрязнения воздушной среды рабочей зоны, а также пространственное распределение гамма и нейтронных полей и уровни облучения персонала.
3. Представленные предварительные оценки доз внешнего гамма-нейтронного ( $2,5 \pm 0,5$  мЗв/год) и внутреннего облучения персонала ( $\sim 1$  мЗв/год) дают представление о текущих уровнях облучения работников комплексных экспериментальных установок КЭУ-1 и КЭУ-2. Эти уровни являются результатом как воздействия источников ионизирующего излучения, связанного с отработкой новых технологий, так и с остаточным радиоактивным загрязнением, обусловленным предыдущей деятельностью, не связанной с изготовлением СНУП-топлива. Необходимо подчеркнуть, что представленные предварительные оценки доз относятся к сырью, прошедшему глубокую предварительную очистку от радиогенных примесей. При использовании в качестве сырья для изготовления СНУП-топлива облученных ядерных материалов, уровни гамма-нейтронного облучения персонала будут значительно выше, изменится также и радионуклидный состав аэрозолей.
4. Согласно расчетным оценкам показателей радиационных рисков, в критическую группу персонала по показателям радиационных рисков как при годовом облучении, так и при облучении в течении длительного времени, подпадают женщины в возрасте 18 лет на начало облучения. Стоит подчеркнуть, что в настоящее время женский персонал присутствует среди дозиметристов и дезактиваторщиков, то есть профессий, которые имеют ограниченный по времени характер пребывания на КЭУ-1 и КЭУ-2. Постоянная работа женщин на данных установках нецелесообразна с учетом большой вариативности объемной активности аэрозолей и полей внешнего облучения в зависимости от проводимых технологических операций, что создает возможность невыполнения требований п. 3.1.8 НРБ-99/2009 [9].
5. Для персонала, работающего на КЭУ-1 и КЭУ-2 АО «СХК», ограничения радиационных рисков потенциального облучения, требуемые НРБ-99/2009, выполняются с большим запасом.
6. Минимально значимый радиационный риск, определённый с использованием методологии, одобренной МАГАТЭ [10], не может быть достигнут даже при значительном увеличении численности персонала, работающего на КЭУ.
7. Внутреннее облучение персонала, работающего на КЭУ, с предварительно оценёнными дозами порядка единиц мЗв в год, не может привести к превышению установленных ограничений радиационных рисков персонала. Расчеты выполнены в предположении одинакового радиационного воздействия оксидов и нитридов урана и плутония на человека. При этом сложный морфологический и дисперсный состав в совокупности со сложным химическим составом, обусловленным процессами старения аэрозолей, может привести к кардинальному отличию процессов биокинетики СНУП-аэрозолей, процесса дозообразования и, следовательно, степени радиационной опасности от принятых в моделях МКРЗ для урана и плутония. Поэтому продолжение исследований физико-химических, радиационных свойств СНУП-аэрозолей их биокинетике в организме представляется крайне актуальной задачей в цепи мероприятий по обеспечению радиационной безопасности будущего производственного цикла.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В., Молоканов Н.А., Муравьев Е.В., Орлов В.В., Калыкин С.Г., Рачков В.И., Троянов В.М., Авронин Е.Н., Иванов В.Б., Алексахин Р.М. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // *Атомная энергия*. 2012. Т.112, № 6. С. 319-330.
2. Атомная энергетика нового поколения: радиологическая состоятельность и экологические преимущества / Под ред. Иванова В.К., Адамова Е.О. М.: Изд-во «Перо», 2019. 379 с.
3. European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014.
4. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Максютлов М.А., Туманов К.А., Кашеева П.В., Ловачёв С.С., Адамов Е.О., Лопаткин А.В. Уровни радиологической защиты населения при реализации принципа радиационной эквивалентности: риск-ориентированный подход // *Радиация и риск*. 2018. Т.27, № 3. С. 9-23.
5. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Максютлов М.А., Туманов К.А., Кашеева П.В., Ловачёв С.С., Адамов Е.О., Лопаткин А.В. Радиационная и радиологическая эквивалентность РАО при двухкомпонентной ядерной энергетике // *Радиация и риск*. 2019. Т.28, № 1. С. 5-25.
6. Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Ловачёв С.С., Селёва Н.Г., Корело А.М., Туманов К.А., Иванов В.К. Оценка потенциальных радиологических рисков населения при реализации проекта «Прорыв» Госкорпорации «Росатом». Ч. 1. Рекомендации МКРП // *Радиация и риск*. 2020. Т.29, № 4. С. 33-47.
7. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Ловачёв С.С., Селёва Н.Г., Бакин Р.И., Ильичев Е.А., Киселёв А.А., Соломатин В.М., Адамов Е.О., Лемехов В.В., Проухин А.В. Оценка потенциальных радиологических рисков населения при реализации проекта «Прорыв» Госкорпорации «Росатом». Ч. 2. Определение радиологического ущерба // *Радиация и риск*. 2020. Т.29, № 4. С. 48-68.
8. Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Б.А., Симаков А.В., Клочков В.Н., Коренков И.П., Лягинская А.М., Паринов О.В., Соломатин В.М., Измествьев К.М. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Ч. 1: Методы и результаты // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2021. № 5. С. 23-32.
9. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
10. The Fukushima Daiichi Accident. Technical Volume 4/5: Radiological Consequences. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. 250 p.
11. МУ 2.6.5.028-2016. 2.6.5. Атомная энергетика и промышленность. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования // *Методическое обеспечение радиационного контроля в атомной отрасли: Методические указания*. М.: НПП «Доза», 2016. Т. 1. С. 41-117.
12. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Effects of Ionizing Radiation. V. 1. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. New York: United Nations, 2008. 383 p.
13. Kellerer A.M., Nekolla E.A., Walsh L. On the Conversion of Solid Cancer Excess Relative Risk into Lifetime Attributable Risk // *Radiat Environ Biophys*. 2001. V.40, No. 4. P. 249-257.
14. The 2007 International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // *Ann. ICRP*. 2007. V.37, No. 2-4. P. 1-332.
15. Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максютлов М.А., Корело А.М., Туманов К.А., Прыахин Е.А., Ловачев С.С., Карпенко С.В., Кашеева П.В., Иванов В.К. Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки // *Радиация и риск*. 2018. Т.27, № 1. С. 8-21.
16. Иванов В.К., Карпенко С.В., Кашеев В.В., Ловачёв С.С., Кашеева П.В., Шукина Н.В., Туманов К.А., Кочергина Е.В., Максютлов М.А. Зависимость минимально обнаружимого дозового уровня радиационных рисков рака от периода наблюдения в когорте российских ликвидаторов чернобыльской аварии // *Радиация и риск*. 2018. Т.27, № 3. С. 32-41.

## REFERENCES

1. Adamov Ye.O., Dzhalyavan A.V., Lopatkin A.V., Molokanov N.A., Muravyev Ye.V., Orlov V.V., Kalyakin S.G., Rachkov V.I., Troyanov V.M., Avronin Ye.N., Ivanov V.B., Aleksakhin R.M. Conceptual Provisions of the Strategy for the Development of Nuclear Power in Russia in the Long Term Up to 2100. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 2012;112;6:319-330 (In Russ.).
2. Ed. Ivanov V.K., Adamov E.O. New Generation Nuclear Power: Radiological Consistency and Environmental Benefits. Moscow, Pero Publ., 2019. 379 p. (In Russ.).
3. European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014.
4. Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Maksyutov M.A., Tumanov K.A., Kashcheyeva P.V., Lovachev S.S., Adamov Ye.O., Lopatkin A.V. Levels of Radiological Protection of the Public Under Implementation of the Principle of Radiation Equivalence: a Risk-Based Approach. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2018;27;3:9-23 (In Russ.).
5. Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Maksyutov M.A., Tumanov K.A., Kashcheyeva P.V., Lovachev S.S., Adamov Ye.O., Lopatkin A.V. Radiation and Radiological Equivalence of Radioactive Waste in Two-Component Nuclear Power. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2019;28;1:5-25 (In Russ.).
6. Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Lovachev S.S., Seleva N.G., Korelo A.M., Tumanov K.A., Ivanov V.K. Assessment of Potential Radiological Risks of the Public under Implementation of the "Proryv" Project of the State Atomic Energy Corporation "Rosatom". Part 1. ICRP Recommendations. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2020;29;4:33-47 (In Russ.).
7. Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Lovachev S.S., Seleva N.G., Bakin R.I., Ilyichev Ye.A., Kiselev A.A., Solomatin V.M., Adamov Ye.O., Lemekhov V.V., Proukhin A.V. Assessment of Potential Radiological Risks of the Public under Implementation of the "Proryv" Project of the State Atomic Energy Corporation "Rosatom". Part 2. Determination of Radiological Detriment. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2020;29;4:48-68 (In Russ.).
8. Ilyin L.A., Samoylov A.S., Tsovyanov A.G., Shinkarev S.M., Shandala N.K., Gantsovskiy P.P., Karev A.YE., Kukhta B.A., Simakov A.V., Klochkov V.N., Korenkov I.P., Lyaginskaya A.M., Parinov O.V., Solomatin V.M., Izmestyev K.M. Radiation-Hygienic Investigations of Experimental Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel at JSC SChC. Part 1. Methods and Results. *Meditinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;5:23-32 (In Russ.).
9. Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Sanitary Rules and Standards SanPiN 2.6.1.2523 - 09. Moscow, Publ., 2009. 100 p. (In Russ.).
10. The Fukushima Daiichi Accident. Technical Volume 4/5: Radiological Consequences. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015. 250 p.
11. MU 2.6.5.028-2016. 2.6.5. Nuclear Energy and Industry. Determination of Individual Effective and Equivalent Doses and Organization of Control of Occupational Exposure Under Conditions of Planned Exposure. General Requirements. Methodical Instructions. Methodological Support of Radiation Monitoring in the Nuclear Industry. Moscow, NPP "Doza" Publ., 2016. V.1. P.41-117 (In Russ.).
12. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Effects of Ionizing Radiation. V. 1. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. New York, United Nations, 2008. 383 p.
13. Kellerer A.M., Nekolla E.A., Walsh L. On the Conversion of Solid Cancer Excess Relative Risk into Lifetime Attributable Risk. *Radiat Environ Biophys*. 2001;40;4:249-257.
14. The 2007 International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*. 2007;37;2-4:1-332.
15. Menyaylo A.N., Chekin S.Yu., Kashcheyev V.V., Maksyutov M.A., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin Ye.A., Lovachev S.S., Karpenko S.V., Kashcheyeva P.V., Ivanov V.K. Lifetime Radiation Risk from External and Internal Exposure: an Assessment Method. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2018;27;1: 8-21 (In Russ.).
16. Ivanov V.K., Karpenko S.V., Kashcheyev V.V., Lovachev S.S., Kashcheyeva P.V., Shchukina N.V., Tumanov K.A., Kochergina YE.V., Maksyutov M.A. Dependence of the Minimum Detectable Dose Level of Radiation Risks of Cancer Versus the Observation Period in a Cohort of Russian Liquidators of the Chernobyl Accident. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2018;27;3:32-41 (In Russ.).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.

**Поступила:** 23.12.2020. Принята к публикации: 20.01.2021.

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

**Financing.** The study had no sponsorship.

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

**Article received:** 23.12.2020. Accepted for publication: 20.01.2021.