РАЗДЕЛ 1

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-4-5-23

УДК 621.039.58

Радиологическая защита населения в условиях нормальной эксплуатации Опытного демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) и масштабирование на Промышленный энергокомплекс (ПЭК) в рамках Проектного направления «Прорыв»

Иванов В.К.^{1,2}, Спирин Е.В.², Ловачёв С.С.¹, Меньяйло А.Н.¹, Чекин С.Ю.¹, Соломатин В.М.²

¹ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск;

² АО «Прорыв», Москва

В работе рассмотрена проблема радиологической защиты населения в условиях нормальной эксплуатации ОДЭК и масштабирования (увеличения суммарной мощности реакторных установок (РУ)) на ПЭК в рамках действующих норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009), заключений НКДАР ООН и рекомендаций МКРЗ. Оценка радиологической защиты населения проведена с использованием понятий радиологического ущерба (РАУ) и уровня радиологической защиты (УРЗ). В терминах величин РАУ и УРЗ дана оценка выполнения стандартов радиологической безопасности населения для РУ БРЕСТ-ОД-300, МФР, МП, РУ БР-1200 и РУ БН-1200. Расчёты величин РАУ и УРЗ выполнены с учётом онкологической статистики РФ и локальных данных по регионам планируемого размещения указанных выше объектов (Томская, Свердловская, Челябинская области). Для населения, проживающего вблизи РУ БРЕСТ-ОД-300, МФР, МП, РУ БР-1200 и РУ БН-1200, прогнозируемые величины УРЗ и РАУ подтверждают выполнение требования НРБ-99/2009 по ограничению радиационного риска потенциального облучения за счёт облучения в течение года на уровне 10^{-5} . Для критической группы населения (для девочек младше 5 лет), проживающего вблизи ОДЭК (ОДЭК в составе РУ БРЕСТ-ОД-300, МФР и МП), пренебрежимо малый риск 10^{-6} может быть достигнут при совокупном уменьшении годовых доз по ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 на 80% и годовых доз по ^{137}Cs на 75% для МП. Для населения в среднем пренебрежимо малый риск может быть достигнут при совокупном снижении годовых доз по ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 на 10% и годовых доз по ^{137}Cs для МП на 5%. Для населения, проживающего вблизи РУ БН-1200 и РУ БР-1200, а также при увеличении числа РУ БР-1200 в составе ПЭК до двух установок, прогнозируемые значения радиационного риска значительно меньше уровня пренебрежимо малого риска 10^{-6} . Величина РАУ, полученная по стандартам МКРЗ, подтверждает необходимость дальнейшего повышения эффективности оказания онкологической помощи населению Томской области для выведения значения РАУ на общенациональный уровень. Учитывая высокий уровень радиологической защиты населения при нормальной эксплуатации МФР, представляется возможным продолжение его эксплуатации при создании ПЭК на базе РУ БР-1200.

Ключевые слова: *опытный демонстрационный энергокомплекс (ОДЭК), промышленный энергокомплекс (ПЭК), радиологический ущерб (РАУ), уровень радиологической защиты (УРЗ), нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009), рекомендации МКРЗ (103 Публикация), РУ БРЕСТ-ОД-300, модуль фабрикаци/рефабрикаци (МФР), модуль переработки (МП), РУ БР-1200, РУ БН-1200.*

Иванов В.К. – науч. руководитель НРЭР, гл. радиоэколог ПН «Прорыв», Председатель РНКРЗ, чл.-корр. РАН, д.т.н.; **Ловачёв С.С.** – мл. науч. сотр.; **Меньяйло А.Н.** – вед. науч. сотр., к.б.н.; **Чекин С.Ю.*** – зав. лаб. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. **Спирин Е.В.** – гл. науч. сотр. отдела гл. радиоэколога ПН «Прорыв», д.б.н.; **Соломатин В.М.** – нач. отдела гл. радиоэколога ПН «Прорыв», к.б.н. АО «Прорыв».

*Контакты: 249035, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 4. Тел.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

Шведская академия наук в 2020 г. присудила Золотую медаль Зиверта в области радиационной защиты населения американскому специалисту в области математической эпидемиологии доктору Д. Престону. Главные научные результаты этого учёного заключаются в оценках радиационных канцерогенных рисков населения городов Хиросима и Нагасаки, подвергшегося в 1945 г. атомной бомбардировке.

Зависимость частоты онкозаболеваний от полученной дозы облучения была хорошо изучена раньше. Д. Престон впервые показал, что вероятность потенциального радиационно-обусловленного канцерогенеза также находится в строгой зависимости от пола и возраста лиц, подвергшихся радиационному воздействию. В общем виде эти результаты выглядят следующим образом: 1) при одинаковых значениях доз облучения риск онкопатологии у женщин на 40% выше, чем у мужчин; 2) при одинаковых значениях доз облучения риск онкопатологии у детей (возраст при облучении 0-4 года) примерно в 10 раз выше аналогичного показателя у взрослых (возраст 70 лет и старше).

Эти фундаментальные данные по японской когорте лиц, переживших атомные бомбардировки, были использованы МКРЗ для разработки новых рекомендаций по радиологической защите (Публикация 103) [1]. Основным показателем для оценки уровня радиологической защиты была рекомендована величина LAR (lifetime attributable risk – пожизненный атрибутивный риск).

Уровень радиологической защиты населения в ПН «Прорыв» ориентирован на величину пренебрежимо малого риска, которая в действующих НРБ-99/2009 имеет значение 10^{-6} [2]. Основной вопрос состоит в удержании этого рисковог о ограничения при функционировании ОДЭК в нормальных условиях эксплуатации.

Материалы и методы

В данном исследовании выделены два уровня пожизненного атрибутивного риска (LAR) онкозаболеваемости населения при радиационном воздействии: 10^{-6} – уровень «пренебрежимо малого» риска и 10^{-5} – уровень ограничения радиационного риска населения для условий потенциального облучения. Эти граничные уровни риска определены на основе действующих в России норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [2]. Далее введём величину уровня радиологической защиты (УРЗ), и два уровня УРЗ определим следующими выражениями:

$$\text{УРЗ1} = \left(1 - \frac{\text{LAR}}{10^{-6}}\right) \cdot 100\%, \text{ УРЗ1}=0 \text{ при } \text{LAR}>10^{-6}, \quad (1)$$

$$\text{УРЗ2} = \left(1 - \frac{\text{LAR}}{10^{-5}}\right) \cdot 100\%, \text{ УРЗ2}=0 \text{ при } \text{LAR}>10^{-5}. \quad (2)$$

Например, при $\text{LAR}=5 \cdot 10^{-7}$ УРЗ1=50%, УРЗ2=95%; при $\text{LAR}=5 \cdot 10^{-6}$ УРЗ1=0, УРЗ2=50%, при $\text{LAR} \leq 10^{-6}$ УРЗ1 $\geq$ 0%, УРЗ2 $\geq$ 90%.

На основе величины LAR МКРЗ [1] определяет ещё одну меру радиационного риска – радиологический ущерб (РАУ), который для определённой локализации онкозаболевания определяется следующим образом:

$$\text{РАУ} = \text{LAR} \cdot [k + q(1 - k)]I, \quad (3)$$

где **LAR** – пожизненный атрибутивный риск онкозаболеваемости; **k** – доля летальности для данного онкозаболевания; **q** – весовой коэффициент (от 0 до 1), отражающий качество жизни онкобольных; **I** – средняя потеря годов жизни от онкопатологии.

Одним из основных параметров формулы (3) является величина LAR, характеризующая радиационный риск возникновения онкозаболевания, который, помимо дозы облучения, пола и

возраста облучённых лиц, зависит от спонтанной (при отсутствии облучения, кроме фонового) онкозаболеваемости, онкосмертности и смертности от всех причин. В работах [3, 4] показана технология использования понятия радиологического ущерба (РАУ), предложенная МКРЗ в Публикации 103 [1] для оценки уровня радиологической защиты населения при реализации проекта «Прорыв» Госкорпорации «Росатом».

Учитывая большую площадь РФ, оценка величины LAR может быть получена на основе общенациональных, средних по РФ, спонтанных показателей заболеваемости и смертности, либо с использованием локальных показателей на уровне субъекта РФ (например, по Томской области). В данном исследовании для расчётов используются показатели заболеваемости (по РФ в целом и по субъектам РФ) за 2019 г. [5]. Обозначим в первом случае оценку ущерба РАУ(Н), во втором – РАУ(Л). Рассмотрим следующее выражение:

$$\Delta \text{РАУ} = \left(\frac{\text{РАУ(Л)}}{\text{РАУ(Н)}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (4)$$

Например, при $\text{РАУ(Л)}/\text{РАУ(Н)}=1,17$ $\Delta \text{РАУ}=17\%$. Если величина $\Delta \text{РАУ}>0$, то, без изменения доз облучения, остаётся практическая возможность уменьшения радиологического ущерба за счёт повышения уровня оказания онкологической помощи населению на локальном (областном) уровне. Если при одинаковых дозах облучения $\Delta \text{РАУ}<0$, это означает, что ситуация с онкологической заболеваемостью и состояние онкологической помощи населению на областном уровне лучше, чем в среднем по России, и дальнейшее уменьшение радиологического ущерба может быть достигнуто, преимущественно, только за счёт уменьшения доз облучения населения.

Значения УРЗ и $\Delta \text{РАУ}$ играют определяющую роль в оценке уровня радиологической защиты населения. В ПН «Прорыв» основным целевым показателем радиологической защиты является величина $\text{LAR}=10^{-6}$, характеризующая «пренебрежимо малый» риск [2]. Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать 3 основных этапа по корректировке лучевых нагрузок населения (рис. 1).

Рис. 1. Этапы корректировки доз облучения населения.

Первый этап – оценка величин УРЗ и $\Delta \text{РАУ}$. Второй этап – проверка выполнения условия риска в рамках величины 10^{-6} («пренебрежимо малый» риск), и на последнем этапе – выработка рекомендаций по корректировке доз облучения населения и/или повышения уровня оказания онкологической помощи населению.

Опытный демонстрационный энергокомплекс (ОДЭК) включает РУ БРЕСТ, модуль фабрики/рефабрикации топлива (МФР) и модуль переработки (МП). Рассмотрим последовательно оценки УРЗ и $\Delta \text{РАУ}$ для населения, проживающего вблизи ОДЭК, а также для населения, подверженного потенциальному облучению при дальнейшем увеличении суммарной мощности РУ (при масштабировании) в рамках промышленного энергокомплекса (ПЭК). В табл. 1-10 представлены базовые значения LAR и РАУ для этих объектов по стандартам МКРЗ [1].

Таблица 1

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ в целом

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	5,30E-07	7,27E-11	0	5,00E-11	0	1,91E-11	0	3,20E-11	0
³ H	1,32E-02	1,53E-06	1,06E-06	9,26E-07	6,63E-07	4,31E-07	3,41E-07	6,56E-07	4,85E-07
¹⁴ C	1,44E-08	1,64E-12	0	1,01E-12	0	4,82E-13	0	7,18E-13	0
¹³¹ I	4,86E-07	1,99E-10	0	5,47E-11	0	2,79E-12	0	4,06E-11	0
¹³³ I	1,85E-10	2,22E-14	0	1,28E-14	0	9,53E-15	0	1,11E-14	0
¹³⁵ I	6,95E-10	1,04E-13	0	6,62E-14	0	3,55E-14	0	4,88E-14	0
¹³⁴ Cs	5,48E-09	6,01E-13	0	3,64E-13	0	1,67E-13	0	2,58E-13	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	1,46E-08	1,63E-12	0	9,81E-13	0	4,53E-13	0	6,97E-13	0
²¹⁰ Po	8,73E-07	1,06E-10	0	7,66E-11	0	3,92E-11	0	5,39E-11	0
ΣLAR		1,53E-06	1,06E-06	9,26E-07	6,63E-07	4,31E-07	3,41E-07	6,56E-07	4,85E-07

Таблица 2

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	5,30E-07	7,90E-11	0	5,45E-11	0	2,10E-11	0	3,47E-11	0
³ H	1,32E-02	1,66E-06	1,15E-06	1,02E-06	7,26E-07	4,84E-07	3,81E-07	7,18E-07	5,29E-07
¹⁴ C	1,44E-08	1,78E-12	0	1,11E-12	0	5,42E-13	0	7,87E-13	0
¹³¹ I	4,86E-07	2,07E-10	0	5,69E-11	0	3,00E-12	0	4,17E-11	0
¹³³ I	1,85E-10	2,44E-14	0	1,45E-14	0	1,10E-14	0	1,25E-14	0
¹³⁵ I	6,95E-10	1,13E-13	0	7,32E-14	0	4,04E-14	0	5,39E-14	0
¹³⁴ Cs	5,48E-09	6,53E-13	0	4,00E-13	0	1,88E-13	0	2,82E-13	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	1,46E-08	1,77E-12	0	1,08E-12	0	5,09E-13	0	7,63E-13	0
²¹⁰ Po	8,73E-07	1,17E-10	0	8,54E-11	0	4,44E-11	0	5,98E-11	0
ΣLAR		1,66E-06	1,15E-06	1,02E-06	7,26E-07	4,85E-07	3,81E-07	7,18E-07	5,29E-07

Таблица 3

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов МФР при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ в целом

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	6,69E-09	9,30E-13	0	6,41E-13	0	2,45E-13	0	4,08E-13	0
²³⁸ Pu	3,99E-05	1,63E-09	1,15E-09	8,65E-10	6,83E-10	3,32E-10	2,91E-10	6,26E-10	4,79E-10
²³⁹ Pu	8,28E-05	3,17E-09	2,24E-09	1,73E-09	1,29E-09	6,31E-10	5,18E-10	1,22E-09	9,12E-10
²⁴⁰ Pu	1,10E-04	4,22E-09	2,99E-09	2,30E-09	1,73E-09	8,42E-10	6,92E-10	1,63E-09	1,22E-09
²⁴¹ Pu	1,07E-04	2,95E-09	2,12E-09	1,77E-09	1,23E-09	4,25E-10	3,11E-10	1,10E-09	7,80E-10
²⁴² Pu	3,33E-07	1,29E-11	0	6,94E-12	0	2,52E-12	0	4,91E-12	0
ΣLAR		1,20E-08	8,49E-09	6,66E-09	4,94E-09	2,24E-09	1,81E-09	4,58E-09	3,39E-09

Таблица 4

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов МФР при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	6,69E-09	9,96E-13	0	6,88E-13	0	2,65E-13	0	4,38E-13	0
²³⁸ Pu	3,99E-05	1,90E-09	1,35E-09	1,02E-09	8,10E-10	3,81E-10	3,33E-10	7,28E-10	5,59E-10
²³⁹ Pu	8,28E-05	3,70E-09	2,63E-09	2,04E-09	1,54E-09	7,26E-10	5,94E-10	1,42E-09	1,06E-09
²⁴⁰ Pu	1,10E-04	4,94E-09	3,51E-09	2,73E-09	2,05E-09	9,68E-10	7,93E-10	1,90E-09	1,42E-09
²⁴¹ Pu	1,07E-04	3,53E-09	2,55E-09	2,12E-09	1,48E-09	4,99E-10	3,64E-10	1,31E-09	9,29E-10
²⁴² Pu	3,33E-07	1,51E-11	0	8,22E-12	0	2,90E-12	0	5,72E-12	0
ΣLAR		1,41E-08	1,00E-08	7,92E-09	5,87E-09	2,58E-09	2,08E-09	5,36E-09	3,98E-09

Таблица 5

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов МП при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ в целом

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	2,62E-03	3,65E-07	2,51E-07	2,51E-07	1,75E-07	9,60E-08	7,44E-08	1,60E-07	1,15E-07
³ H	6,15E-04	7,22E-08	5,00E-08	4,38E-08	3,14E-08	2,04E-08	1,61E-08	3,08E-08	2,27E-08
¹⁴ C	7,84E-04	9,11E-08	6,33E-08	5,59E-08	4,00E-08	2,68E-08	2,12E-08	3,95E-08	2,93E-08
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	1,48E-08	8,95E-13	0	6,78E-13	0	5,43E-13	0	5,77E-13	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	1,46E-03	1,65E-07	1,15E-07	9,98E-08	7,15E-08	4,62E-08	3,64E-08	7,04E-08	5,20E-08
²³⁹ Pu	1,02E-11	3,91E-16	0	2,13E-16	0	7,80E-17	0	1,51E-16	0
¹²⁵ Sb	1,91E-06	1,56E-10	0	1,26E-10	0	8,91E-11	0	9,75E-11	0
¹²⁹ I	1,79E-05	7,56E-09	0	2,02E-09	0	8,00E-11	0	1,50E-09	0
²³⁸ U	3,92E-10	2,84E-14	0	2,93E-14	0	2,46E-14	0	2,33E-14	0
²⁴¹ Am	3,24E-08	1,15E-12	0	5,49E-13	0	2,38E-13	0	4,26E-13	0
²⁴⁴ Cm	2,70E-06	1,13E-10	0	5,62E-11	0	2,84E-11	0	4,52E-11	0
ΣLAR		7,01E-07	4,85E-07	4,53E-07	3,19E-07	1,90E-07	1,48E-07	3,02E-07	2,20E-07

Таблица 6

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов МП при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	2,62E-03	3,90E-07	2,68E-07	2,69E-07	1,87E-07	1,04E-07	8,01E-08	1,72E-07	1,23E-07
³ H	6,15E-04	7,70E-08	5,33E-08	4,73E-08	3,38E-08	2,25E-08	1,76E-08	3,34E-08	2,46E-08
¹⁴ C	7,84E-04	9,72E-08	6,74E-08	6,04E-08	4,32E-08	2,96E-08	2,33E-08	4,29E-08	3,17E-08
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	1,48E-08	9,20E-13	0	6,92E-13	0	5,69E-13	0	5,96E-13	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	1,46E-03	1,77E-07	1,23E-07	1,08E-07	7,71E-08	5,09E-08	4,00E-08	7,63E-08	5,63E-08
²³⁹ Pu	1,02E-11	4,58E-16	0	2,53E-16	0	8,98E-17	0	1,76E-16	0
¹²⁵ Sb	1,91E-06	1,71E-10	0	1,39E-10	0	1,00E-10	0	1,08E-10	0
¹²⁹ I	1,79E-05	7,73E-09	0	2,07E-09	0	8,28E-11	0	1,53E-09	0
²³⁸ U	3,92E-10	3,16E-14	0	3,28E-14	0	2,80E-14	0	2,63E-14	0
²⁴¹ Am	3,24E-08	1,27E-12	0	6,20E-13	0	2,67E-13	0	4,74E-13	0
²⁴⁴ Cm	2,70E-06	1,24E-10	0	6,36E-11	0	3,19E-11	0	5,03E-11	0
ΣLAR		7,49E-07	5,11E-07	4,87E-07	3,41E-07	2,07E-07	1,61E-07	3,26E-07	2,36E-07

Таблица 7

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов РУ БР-1200 при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ в целом

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	5,05E-06	6,93E-10	4,78E-10	4,77E-10	3,32E-10	1,82E-10	8,00E-11	3,06E-10	2,00E-10
³ H	1,05E-03	1,22E-07	8,46E-08	7,38E-08	5,29E-08	3,43E-08	2,72E-08	5,23E-08	3,86E-08
¹⁴ C	7,19E-08	8,21E-12	0	5,04E-12	0	2,41E-12	0	3,59E-12	0
¹³¹ I	1,64E-05	6,72E-09	4,07E-09	1,85E-09	9,88E-10	9,43E-11	9,90E-12	1,37E-09	7,89E-10
¹³⁴ Cs	1,79E-07	1,97E-11	0	1,19E-11	0	5,47E-12	0	8,44E-12	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	4,87E-07	5,41E-11	0	3,27E-11	0	1,51E-11	0	2,32E-11	0
ΣLAR		1,29E-07	8,92E-08	7,62E-08	5,42E-08	3,46E-08	2,73E-08	5,40E-08	3,96E-08

Таблица 8

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов РУ БР-1200 при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Челябинской области

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	5,05E-06	7,26E-10	5,17E-10	5,01E-10	3,60E-10	1,90E-10	8,88E-11	3,17E-10	2,18E-10
³ H	1,05E-03	1,19E-07	8,65E-08	7,43E-08	5,51E-08	3,51E-08	2,86E-08	5,21E-08	3,98E-08
¹⁴ C	7,19E-08	8,07E-12	0	5,08E-12	0	2,46E-12	0	3,58E-12	0
¹³¹ I	1,64E-05	5,17E-09	3,32E-09	1,43E-09	9,30E-10	7,86E-11	1,12E-11	1,06E-09	6,54E-10
¹³⁴ Cs	1,79E-07	1,92E-11	0	1,20E-11	0	5,58E-12	0	8,39E-12	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	4,87E-07	5,31E-11	0	3,29E-11	0	1,54E-11	0	2,31E-11	0
ΣLAR		1,25E-07	9,03E-08	7,63E-08	5,64E-08	3,54E-08	2,87E-08	5,35E-08	4,07E-08

Таблица 9

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов РУ БН-1200 при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ в целом

Радио- нуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	2,12E-05	2,91E-09	2,01E-09	2,00E-09	1,39E-09	7,63E-10	5,93E-10	1,28E-09	9,23E-10
³ H	3,81E-03	4,40E-07	3,06E-07	2,67E-07	1,91E-07	1,24E-07	9,82E-08	1,89E-07	1,40E-07
¹⁴ C	2,61E-04	2,98E-08	2,08E-08	1,83E-08	1,31E-08	8,74E-09	6,97E-09	1,30E-08	9,66E-09
⁸⁹ Sr	1,17E-09	9,19E-14	0	7,06E-14	0	4,46E-14	0	5,32E-14	0
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	6,00E-07	3,61E-11	0	2,73E-11	0	2,17E-11	0	2,33E-11	0
¹³¹ I	3,59E-07	1,47E-10	0	4,05E-11	0	2,07E-12	0	3,00E-11	0
¹³⁴ Cs	4,49E-07	4,93E-11	0	2,98E-11	0	1,37E-11	0	2,11E-11	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	2,43E-06	2,71E-10	0	1,63E-10	0	7,54E-11	0	1,16E-10	0
²³⁸ Pu	1,81E-06	7,27E-11	0	3,87E-11	0	1,48E-11	0	2,82E-11	0
²³⁹ Pu	1,96E-06	7,42E-11	0	4,04E-11	0	1,47E-11	0	2,88E-11	0
⁵⁴ Mn	3,27E-09	5,62E-13	0	1,97E-13	0	1,02E-13	0	1,44E-13	0
⁶⁰ Co	5,73E-09	5,65E-13	0	3,84E-13	0	2,28E-13	0	2,89E-13	0
ΣLAR		4,73E-07	3,29E-07	2,88E-07	2,06E-07	1,34E-07	1,06E-07	2,04E-07	1,50E-07

Таблица 10

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости среди населения обоих полов после однократного внешнего облучения и однократного поступления (ингаляционный и пероральный пути) в организм человека радионуклидов от выбросов РУ БН-1200 при нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Свердловской области

Радионуклид	ОЭД, мЗв/год	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
		5		20		50		усреднённый возраст	
		LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY	LAR	PAY
Внешнее облучение	2,12E-05	2,92E-09	2,12E-09	2,01E-09	1,47E-09	7,64E-10	6,25E-10	1,27E-09	9,65E-10
³ H	3,81E-03	4,42E-07	3,23E-07	2,67E-07	2,01E-07	1,24E-07	1,02E-07	1,87E-07	1,45E-07
¹⁴ C	2,61E-04	2,99E-08	2,20E-08	1,83E-08	1,38E-08	8,69E-09	7,25E-09	1,29E-08	1,00E-08
⁸⁹ Sr	1,17E-09	9,18E-14	0	7,06E-14	0	4,46E-14	0	5,26E-14	0
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	6,00E-07	3,62E-11	0	2,73E-11	0	2,14E-11	0	2,30E-11	0
¹³¹ I	3,59E-07	1,51E-10	0	4,16E-11	0	2,11E-12	0	3,06E-11	0
¹³⁴ Cs	4,49E-07	4,94E-11	0	2,98E-11	0	1,36E-11	0	2,09E-11	0
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	2,43E-06	2,72E-10	0	1,63E-10	0	7,49E-11	0	1,15E-10	0
²³⁸ Pu	1,81E-06	7,28E-11	0	3,87E-11	0	1,45E-11	0	2,78E-11	0
²³⁹ Pu	1,96E-06	7,43E-11	0	4,04E-11	0	1,45E-11	0	2,84E-11	0
⁵⁴ Mn	3,27E-09	3,01E-13	0	1,96E-13	0	1,01E-13	0	1,42E-13	0
⁶⁰ Co	5,73E-09	5,67E-13	0	3,83E-13	0	2,27E-13	0	2,86E-13	0
ΣLAR		4,75E-07	3,47E-07	2,88E-07	2,16E-07	1,33E-07	1,10E-07	2,02E-07	1,56E-07

Результаты и обсуждение

В табл. 11 приведены данные по уровням радиологической защиты УР31 и УР32 для различных половозрастных групп в условиях нормальной эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300. Эти данные получены с использованием медико-демографической статистики по РФ в целом. Важно подчеркнуть, что УР31 по критерию 10^{-6} исчерпан для женского населения младше 20 лет (и в среднем для населения обоих полов младше 5 лет). Для всего мужского населения и для женщин старше 20 лет радиационный риск является пренебрежимо малым ($<10^{-6}$).

Таблица 11

Уровни радиологической защиты (УР3, %) при выбросах радионуклидов РУ БРЕСТ-ОД-300 в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32
Мужчины	7,93	90,79	35,59	93,56	64,14	96,41	49,30	94,93
Женщины	0	78,68	0	87,91	49,66	94,97	19,47	91,95
Оба пола	0	84,89	7,94	90,79	56,35	95,64	33,30	93,33

В табл. 12 приведены значения УР31 и УР32 с учётом медико-демографической статистики по Томской области (область размещения ОДЭК).

Таблица 12

Уровни радиологической защиты (УР3, %) при выбросах радионуклидов РУ БРЕСТ-ОД-300 в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32
Мужчины	2,70	90,27	30,85	93,08	61,24	96,12	46,01	94,60
Женщины	0	76,61	0	86,58	41,84	94,18	10,33	91,03
Оба пола	0	83,69	0	89,94	50,94	95,09	27,07	92,71

В данном случае УР31 по критерию 10^{-6} исчерпан как для женского населения младше 20, так и в среднем для населения обоих полов младше 20 лет. Для поддержания уровня пренебрежимо малого риска 10^{-6} по населению Томской области, проживающему вблизи РУ БРЕСТ-ОД-300, как видно из табл. 12, величина УР32 для девочек в возрасте младше 5 лет должна быть поднята с 76,61% до 90%, т.е. на 13,39%. Для повышения УР32 на 13,39% требуется уменьшение дозы облучения от трития на 60%: с 13,2 мкЗв до 5,29 мкЗв.

Кроме того, величина ΔPAU для Томской области равна 10,8%, что означает необходимость повышения уровня оказания онкологической помощи населению.

В табл. 13 приведены данные по уровням радиологической защиты УР31 и УР32 для различных половозрастных групп населения в условиях нормальной эксплуатации МФР, при использовании медико-демографических данных в целом по населению РФ, а в табл. 14 – аналогичные данные для населения Томской области. Лучевые нагрузки на население при условии нормальной эксплуатации МФР крайне низки (радиационные риски намного меньше пренебрежимо малого уровня 10^{-6}).

Таблица 13

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов МФР
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32
Мужчины	98,61	99,86	99,25	99,93	99,76	99,98	99,46	99,95
Женщины	99,00	99,90	99,42	99,94	99,79	99,98	99,63	99,96
Оба пола	98,80	99,88	99,33	99,93	99,78	99,98	99,55	99,95

Таблица 14

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов МФР
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32	УР31	УР32
Мужчины	98,42	99,84	99,14	99,91	99,73	99,97	99,38	99,94
Женщины	98,76	99,88	99,27	99,93	99,75	99,98	99,55	99,95
Оба пола	98,59	99,86	99,21	99,92	99,74	99,97	99,47	99,95

В табл. 15 приведены данные по уровням радиологической защиты УР31 и УР32 для различных половозрастных групп населения в условиях нормальной эксплуатации МФР, при использовании медико-демографических данных в целом по населению РФ, а в табл. 16 – аналогичные данные для населения Томской области. По общероссийским медико-демографическим данным минимальные значения УР31 имеет женское население младше 5 лет (табл. 15), а для женского населения Томской области младше 5 лет УР31=0, т.е. полностью исчерпан (табл. 16). В данном случае для поддержания уровня пренебрежимо малого риска 10^{-6} по всем половозрастным группам дозы облучения должны быть снижены на 20% (внешнего – с 2,62 мкЗв до 2,10 мкЗв, внутреннего – с 1,46 мкЗв до 1,17 мкЗв). В обоих случаях основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs .

Таблица 15

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов МП
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2
Мужчины	53,17	95,32	67,92	96,79	84,60	98,46	76,00	97,60
Женщины	6,63	90,66	41,55	94,16	77,49	97,75	63,59	96,36
Оба пола	29,90	92,99	54,74	95,47	81,05	98,10	69,79	96,98

Таблица 16

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов МП
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2
Мужчины	50,38	95,04	65,71	96,57	83,45	98,34	74,37	97,44
Женщины	0	89,97	36,90	93,69	75,15	97,51	60,42	96,04
Оба пола	25,06	92,51	51,30	95,13	79,30	97,93	67,40	96,74

Величина ΔPAU по Томской области при нормальной эксплуатации МП составляет 5,3%, т.е. PAU на областном уровне выше PAU , который был бы получен в среднем для населения РФ в таких же условиях облучения, что подчёркивает необходимость повышения уровня онкологической помощи для населения Томской области.

Предполагаемым регионом размещения РУ БР-1200 является Челябинская область. В табл. 17 приведены данные по уровням радиологической защиты УРЗ1 и УРЗ2 для различных половозрастных групп населения в условиях нормальной эксплуатации РУ БР-1200, при использовании медико-демографических данных в целом по населению РФ, а в табл. 18 – аналогичные данные для населения Челябинской области. Следует отметить высокий уровень радиологической защиты населения по показателям УРЗ1 и УРЗ2. Величина $\Delta PAU=0$, т.к. онкозаболеваемость в Челябинской области ниже контрольного общероссийского показателя. При строительстве двух РУ БР-1200, как видно из табл. 8, величина пожизненного атрибутивного риска равна $2,5 \cdot 10^{-7}$, что значительно ниже величины пренебрежимо малого риска 10^{-6} .

Предполагаемым регионом размещения РУ БН-1200 является Свердловская область. В табл. 19 приведены данные по уровням радиологической защиты УРЗ1 и УРЗ2 для различных половозрастных групп населения в условиях нормальной эксплуатации РУ БН-1200, при использовании медико-демографических данных в целом по населению РФ, а в табл. 20 – аналогичные данные для населения Свердловской области.

Таблица 17

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов РУ БР-1200
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2
Мужчины	92,48	99,25	94,79	99,48	97,12	99,71	95,90	99,59
Женщины	81,70	98,17	89,97	99,00	95,95	99,59	93,30	99,33
Оба пола	87,09	98,71	92,38	99,24	96,54	99,65	94,60	99,46

Таблица 18

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов РУ БР-1200
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по Челябинской области**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2
Мужчины	92,48	99,25	94,79	99,48	97,14	99,71	95,94	99,59
Женщины	82,43	98,24	89,95	98,99	95,79	99,58	93,36	99,34
Оба пола	87,53	98,75	92,39	99,24	96,41	99,64	94,54	99,45

Таблица 19

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов РУ БН-1200
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по РФ**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2
Мужчины	71,41	97,14	79,99	98,00	88,87	98,89	84,26	98,43
Женщины	33,93	93,39	62,48	96,25	84,36	98,44	75,01	97,50
Оба пола	52,67	95,27	71,23	97,12	86,61	98,66	79,63	97,96

Таблица 20

**Уровни радиологической защиты (УРЗ, %) при выбросах радионуклидов РУ БН-1200
в условиях нормальной эксплуатации с учётом фоновых показателей
онкозаболеваемости и онкосмертности по Свердловской области**

Пол	Возраст при поступлении радионуклида и внешнем облучении, лет							
	5		20		50		усреднённый возраст	
	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2	УРЗ1	УРЗ2
Мужчины	72,73	97,27	80,93	98,09	89,42	98,94	85,11	98,51
Женщины	32,19	93,22	61,51	96,15	83,96	98,40	74,57	97,46
Оба пола	52,46	95,25	71,22	97,12	86,69	98,67	79,84	97,98

Уровень радиологической защиты является высоким: в критической группе девочек младше 5 лет УРЗ1=32,19%. Величина $\Delta PAU=0$, т.к. онкозаболеваемость в Свердловской области ниже аналогичного среднего показателя по РФ.

Полученные данные по PAU и УРЗ дают углублённое представление об уровне радиологической защиты населения и дополняют технологию оценки радиационных рисков [6-10].

В табл. 6 показаны значения величины LAR для населения при нормальной эксплуатации МП. Важно отметить, что при суммарном риске $7,49 \cdot 10^{-7}$ для детей, риск внешнего облучения составляет $3,90 \cdot 10^{-7}$, т.е. 52%. На рис. 2 и 3 показаны значения LAR онкозаболеваемости за счёт основных радионуклидов при внешнем и внутреннем облучении девочек в возрасте младше 5 лет (рис. 2) и в среднем для населения Томской области (рис. 3).

В табл. 21 приведены итоговые данные по выполнению рискованных ограничений МКРЗ [1] и НРБ-99/2009 [2] на объектах ОДЭК и ПЭК, из которых следует, что граничное значение радиационного риска населения от источников потенциального облучения (10^{-5}) не превышает ни на одном из рассмотренных объектов. Уровень пренебрежимо малого риска (10^{-6}) для населения без учёта пола и возраста не превышает без каких-либо ограничений доз для всех рассмотренных объектов, кроме ОДЭК в целом, тогда как для женского населения в возрасте младше 5 лет данный уровень не превышает для РУ БРЕСТ-ОД-300, МП, ОДЭК в целом и комбинации РУ БР-800 + БН-1200 только при снижении доз облучений на данных объектах.

Рис. 2. Пожизненный атрибутивный риск заболеваемости раком среди женского населения (возраст при облучении и поступлении радионуклидов – младше 5 лет) при внешнем и внутреннем облучении от радионуклидов из годового выброса МП с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области.

Рис. 3. Пожизненный атрибутивный риск заболеваемости раком среди населения обоих полов, усреднённый по всем возрастам при облучении и поступлении радионуклидов, при внешнем и внутреннем облучении от радионуклидов из годового выброса МП с учётом фоновых показателей онкозаболеваемости и онкосмертности по Томской области.

Таблица 21

Выполнение рискованных ограничений НРБ и МКРЗ на объектах ОДЭК и ПЭК

Объекты ОДЭК и ПЭК	Рисковые ограничения		
	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ (учёт пола и возраста)
РУ БРЕСТ	+	+	+ – (³ H)*
МФР	+	+	+
МП	+	+	+ – (¹³⁷ Cs)
ОДЭК	+	+ – (³ H, ¹³⁷ Cs)	+ – (³ H, ¹³⁷ Cs)
РУ БН-1200	+	+	+
РУ БР-1200	+	+	+
2 РУ БР-1200	+	+	+
БР-800 + БН-1200	+	+	+ – (³ H, ¹⁴ C)
БР-1200 + КуАЭС2	+	+	+

Примечание: + выполнение; + – выполнение с ограничением дозы; (³H)* уменьшение дозы по радионуклиду.

На рис. 4-7 представлены снижения годовых доз облучения населения (в %) от дозообразующих радионуклидов и внешнего облучения для объектов ОДЭК по отдельности и в целом для подтверждения выполнения требований безопасности с учётом пола и возраста, а также в среднем для населения при оценке LAR онкозаболеваемости. Из представленных на рисунках данных следует, что снижения лучевых нагрузок необходимы только для соблюдения уровня пренебрежимо малого риска (10^{-6}). Стоит также отметить, что значения LAR онкозаболеваемости с учётом пола и возраста и в среднем для населения, проживающего вблизи МФР, не превышают уровень пренебрежимо малого риска и без снижения лучевых нагрузок.

Рис. 4. Снижение лучевой нагрузки (%) от ^{137}Cs и внешнего облучения (1,46 и 2,62 мкЗв соответственно) для МП для подтверждения выполнения требований безопасности с учётом пола и возраста при оценке пожизненного атрибутивного риска (девочки, возраст при облучении – младше 5 лет).

Рис. 5. Снижение лучевой нагрузки (%) от ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 (13,2 мкЗв) для подтверждения выполнения требований безопасности с учётом пола и возраста при оценке пожизненного атрибутивного риска (девочки, возраст при облучении – младше 5 лет).

На рис. 4 показано, что для того, чтобы величина LAR онкозаболеваемости для девочек в возрасте младше 5 лет при облучении и поступлении радионуклидов в организм от выбросов МП не превышала уровень пренебрежимо малого риска, необходимо одновременное снижение лучевых нагрузок от внешнего облучения и от внутреннего облучения по всем путям поступления от радионуклида ^{137}Cs на 5%. При этом аналогичная величина LAR для населения, проживающего вблизи МП, без учёта пола и возраста не превышает уровень 10^{-6} без снижения лучевых нагрузок.

Рис. 5 показывает, что величина LAR онкозаболеваемости для девочек в возрасте младше 5 лет при облучении и поступлении радионуклидов в организм от выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 не превышает уровень пренебрежимо малого риска (10^{-6}) при снижении лучевой нагрузки от внутреннего облучения по всем путям поступления от радионуклида ^3H на 60%, тогда как аналогичная величина LAR в среднем для населения, проживающего вблизи РУ БРЕСТ-ОД-300, не превышает уровень 10^{-6} и без снижения лучевых нагрузок.

Представленные ниже рис. 6 и 7 показывают, что для того, чтобы величина LAR онкозаболеваемости для населения, проживающего вблизи ОДЭК, не превышала уровень пренебрежимо малого риска (10^{-6}), необходимо:

1) одновременное снижение лучевых нагрузок от внешнего облучения и внутреннего облучения по всем путям поступления от радионуклида ^{137}Cs от выбросов МП на 75% и от внутреннего облучения по всем путям поступления от радионуклида ^3H от выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 на 80% (при оценке LAR с учётом пола и возраста – для девочек младше 5 лет);

2) одновременное снижение лучевых нагрузок от внешнего облучения и внутреннего облучения по всем путям поступления от радионуклида ^{137}Cs от выбросов МП на 5% и от внутреннего облучения по всем путям поступления от радионуклида ^3H от выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 на 10% при оценке LAR в среднем для населения.

Рис. 6. Снижение лучевой нагрузки (%) от ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 (13,2 мкЗв), ^{137}Cs и внешнего облучения для МП (1,46 и 2,62 мкЗв соответственно) и ΣRu для МФР (0,34 мкЗв) в совокупности для подтверждения выполнения требований безопасности по ОДЭК в целом (РУ БРЕСТ-ОД-300, МП, МФР) с учётом пола и возраста при оценке пожизненного атрибутивного риска (девочки, возраст при облучении – младше 5 лет).

Рис. 7. Снижение лучевой нагрузки (%) от ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 (13,2 мкЗв), ^{137}Cs и внешнего облучения для МП (1,46 и 2,62 мкЗв соответственно) и ΣPu для МФР (0,34 мкЗв) в совокупности для подтверждения выполнения требований безопасности по ОДЭК в целом (РУ БРЕСТ-ОД-300, МП, МФР) без учёта пола и возраста при оценке пожизненного атрибутивного риска.

Рис. 8. Снижение лучевой нагрузки (%) от ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 (13,2 мкЗв), ^{137}Cs и внешнего облучения для МП (1,46 и 2,62 мкЗв соответственно) и ΣPu для МФР (0,34 мкЗв) в совокупности для подтверждения выполнения требований безопасности по ОДЭК в целом (РУ БРЕСТ-ОД-300, МП, МФР) с учётом пола и возраста при оценке пожизненного атрибутивного риска онкосмертности и радиологического ущерба (девочки, возраст при облучении – младше 5 лет).

На рис. 4-7 показаны необходимые уровни снижения лучевых нагрузок (доз облучения), рассчитанные на основе современных моделей риска МКРЗ [1] по онкозаболеваемости. Вместе с тем, в действующих в стране НРБ-99/2009 [2] ограничения радиационного риска потенциального облучения относятся к онкологической смертности. Поэтому на основе описанной выше технологии на рис. 8 и 9 показаны требования по снижению лучевых нагрузок в терминах LAR онкосмертности и РАУ. Стоит отметить, что оценки LAR онкосмертности и РАУ с учётом пола и

возраста не превышают уровень пренебрежимо малого риска 10^{-6} для населения, проживающего вблизи МФР и МП в отдельности, а аналогичные оценки для населения в среднем не превышают данный уровень для всех рассмотренных модулей в отдельности и для ОДЭК в целом.

Рис. 8 показывает, что для девочек в возрасте младше 5 лет при облучении и поступлении радионуклидов в организм от выбросов ОДЭК в целом величина LAR онкосмертности будет ниже пренебрежимо малого риска (10^{-6}) при одновременном снижении лучевой нагрузки от радионуклида ^3H на 30% из выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 и от радионуклида ^{137}Cs и внешнего облучения на 20% из выбросов МП, тогда как величина PAU не превышает данный уровень при одновременном снижении лучевой нагрузки от радионуклида ^3H из выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 и от радионуклида ^{137}Cs и внешнего облучения из выбросов МП на 60%.

Рис. 9. Снижение лучевой нагрузки (%) от ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 (13,2 мкЗв) для подтверждения выполнения требований безопасности с учётом пола и возраста при оценке пожизненного атрибутивного риска онкосмертности и радиологического ущерба (девочки, возраст при облучении – младше 5 лет).

На рис. 9 показано, что для того, чтобы величина PAU для девочек в возрасте младше 5 лет при облучении и поступлении радионуклидов в организм от выбросов РУ БРЕСТ-ОД-300 не превышала уровень пренебрежимо малого риска 10^{-6} , необходимо снижение лучевой нагрузки от радионуклида ^3H на 40%. При этом величина LAR онкосмертности с учётом тех же пола и возраста не превышает данный уровень без какого-либо снижения лучевых нагрузок.

Рассмотрим разницу в снижении лучевых нагрузок в метриках риска заболеваемости, риска смертности и величины радиологического ущерба на примере РУ БРЕСТ. Как видно из рис. 6, лучевая нагрузка по ^3H для РУ БРЕСТ должна быть снижена на 80% для достижения пренебрежимо малого (10^{-6}) радиационного риска онкозаболеваемости для критической группы населения. Вместе с тем, как видно из рис. 9, для достижения уровня 10^{-6} радиационного риска онкосмертности снижение лучевой нагрузки по ^3H не требуется, а по показателю PAU требуется снижение на 40%. Полученные оценки уровней радиологического риска могут быть использованы при экономическом обосновании различных технологий по снижению лучевых нагрузок.

Выводы

1. Для населения, проживающего вблизи РУ БРЕСТ-ОД-300, МФР, МП, РУ БР-1200 и РУ БН-1200, прогнозируемые величины УРЗ и РАУ подтверждают выполнение требования НРБ-99/2009 [2] по ограничению радиационного риска потенциального облучения за счёт облучения в течение года на уровне 10^{-5} .
2. Для критической группы населения (для девочек младше 5 лет), проживающего вблизи ОДЭК (ОДЭК в составе РУ БРЕСТ-ОД-300, МФР и МП), пренебрежимо малый риск 10^{-6} [2] может быть достигнут при совокупном уменьшении годовых доз по ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 на 80% и годовых доз по ^{137}Cs на 75% для МП. Для населения в среднем пренебрежимо малый риск может быть достигнут при совокупном снижении годовых доз по ^3H для РУ БРЕСТ-ОД-300 на 10% и годовых доз по ^{137}Cs для МП на 5%.
3. Для населения, проживающего вблизи РУ БН-1200 и РУ БР-1200, а также при увеличении числа РУ БР-1200 в составе ПЭК до двух установок, прогнозируемые значения пожизненного атрибутивного риска (LAR) значительно меньше уровня пренебрежимо малого риска 10^{-6} [2].
4. Величина РАУ, полученная по стандартам МКРЗ, подтверждает необходимость дальнейшего повышения эффективности оказания онкологической помощи населению Томской области для выведения значения РАУ на общенациональный уровень.
5. Учитывая высокий уровень радиологической защиты населения при функционировании МФР ($\text{LAR}=1,41 \cdot 10^{-8}$), представляется возможным продолжение его эксплуатации при создании ПЭК на базе РУ БР-1200.

Публикация подготовлена по результатам выполнения работ в Госкорпорации «Росатом» в рамках ПН «Прорыв».

Литература

1. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 2-4. P. 1-332.
2. 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.
3. **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». Часть 1. Рекомендации МКРЗ //Радиация и риск. 2020. Т. 29, № 4. С. 33-47.
4. **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». Часть 2. Определение радиологического ущерба //Радиация и риск. 2020. Т. 29, № 4. С. 48-68.
5. Злокачественные новообразования в России в 2019 году (заболеваемость и смертность) /под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2020. 252 с.
6. **Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максютков М.А., Корело А.М., Туманов К.А., Пряхин Е.А., Ловачёв 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.
7. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Maksoutov M.A., Tumanov K.A., Vlasov O.K., Shchukina N.V., Tsyb A.F.** Radiation-epidemiological studies of thyroid cancer incidence in Russia after the Chernobyl accident (estimation of radiation risks, 1991-2008 follow-up period) //Radiat. Prot. Dosimetry. 2012. V. 151, N 3. P. 489-499. DOI: 10.1093/rpd/ncs019.
8. **Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A., Suyama A., Mabuchi K.** Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997 //Radiat. Res. 2003. V. 160, N 4. P. 381-407.
9. RERF. Brief Description. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rerf.jp/shared/briefdescript/briefdescript.pdf> (дата обращения 28.04.2021).
10. **Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E., Hakama M., Hill C., Howe G., Kaldor J., Muirhead C.R., Schubauer-Berigan M., Yoshimura T., the International Study Group.** Risk of cancer after low doses of ionizing radiation: retrospective cohort study in 15 countries //BMJ. 2005. V. 331, N 7508. P. 77-80. DOI: 10.1136/bmj.38499.599861.

Radiological protection of the public during the normal operating of the Pilot-demonstration energy complex (PDEC) and in increased total power of reactor plants in the Industrial power complex (IPC) within the framework of the Proryv Project

Ivanov V.K.^{1,2}, Spirin E.V.², Lovachev S.S.¹, Menyajlo A.N.¹, Chekin S.Yu.¹, Solomatin V.M.²

¹ A. Tsyb MRRC, Obninsk;

² Joint Stock Company PRORYV, Moscow

The paper presents results of research on radiological protection of the public during normal operation of Pilot-demonstration energy complex (PDEC) and in increased total power of reactor plants in the Industrial power complex (IPC) based on the current national radiation safety standards (NRB-99/2009), UNSCEAR conclusions and ICRP recommendations. To evaluate radiological protection of the public the concepts of radiological detriment (RD) and the level of radiation protection (LRP) were used. The concepts were also used to examine the compliance of the BREST-OD-300, fabrication/refabrication module, processing module, BR-1200 and BN-1200 reactors, collectively called nuclear objects, with safety standards. RD and LRP were estimated with the use of data of the Russian national cancer statistics and cancer statistics of the regions, wherein nuclear objects are planned to be placed – Tomsk, Sverdlovsk, Chelyabinsk. For the public residing nearby the nuclear objects the estimated LRP and RD meet NRB-99/2009 requirements concerning the restriction of radiation risk at the level of 10^{-5} from potential irradiation during a year. For the public of the critical group (girls younger than 5 years of age), residing nearby the PDEC and the nuclear objects the negligible risk of 10^{-6} can be achievable if annual radiation doses of ^3H , for BREST-OD-300, reduce by 80%, and of annual doses of ^{137}Cs , for the processing module reduce by 75%. The negligible risk for the public can be achieved if annual radiation doses of ^3H for BREST-OD-300 reduce by 10% and annual radiation doses of ^{137}Cs for processing module reduce by 5%. Projected radiation risk value for the public residing nearby BN-1200 and BR-1200 or nearby the IPC with two BR-1200 facilities will be much lower than the level of the negligible risk of 10^{-6} . The RD calculated with ICRP methodology, serves as confirmation of the need to improve efficiency in cancer care in Tomsk region in order the regional RD to be at the national level. Because the high level of radiological protection of the public during the normal operation of the fabrication/refabrication module, its further operation when establishing IPC based on BR-1200 is feasible.

Key words: Pilot-demonstration energy complex (PDEC), Industrial power complex (IPC), radiological detriment (RD), level of radiological protection (LRP), radiation safety standards (NRB-99/2009), ICRP recommendations (103 Publication), BREST-OD-300 reactor, fabrication/refabrication module (MFR), processing module (MP), BR-1200 reactor, BN-1200 reactor.

References

1. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 2-4, pp. 1-332.
2. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards. SanPin 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russian).
3. Chekin S.Yu., Menyajlo A.N., Lovachev S.S., Seleva N.G., Korelo A.M., Tumanov K.A., Ivanov V.K. Potential radiological risk for the population during implementation of the Rosatom Proryv project. Part 1. ICRP recommendations. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2020, vol. 29, no. 4, pp. 33-47. (In Russian).
4. Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyajlo A.N., Lovachev S.S., Seleva N.G., Bakin R.I., Ilchev E.A., Kiselev A.A., Solomatin V.M., Adamov E.O., Lemekhov V.V., Proukhin A.V. Potential radiological risk for the

Ivanov V.K. – Scientific Advisor of NRER, Chief Radioecologist of Project PRORYV, Chairman of RSCR, Corresponding Member of RAS, D. Sc., Tech.; Lovachev S.S. – Research Assistant; Menyajlo A.N. – Lead. Researcher, C. Sc., Biol.; Chekin S.Yu.* – Head of Lab. A. Tsyb MRRC. Spirin E.V. – Chief Researcher of the Dep. of the Chief Radioecologist, Project PRORYV, D. Sc., Biol.; Solomatin V.M. – Head of Dep. of the Chief Radioecologist, Project PRORYV, C. Sc., Biol. JSC PRORYV.

*Contacts: 4 Korozyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249035. Tel.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

- population during implementation of the Rosatom Proryv project. Part 2. Radiation detriment assessment. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2020, vol. 29, no. 4, pp. 48-68. (In Russian).
5. *Malignant neoplasms in Russia in 2019 (morbidity and mortality)*. Eds.: A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, A.O. Shahzadova. Moscow, P.A. Herzen MNIIOI, 2020. 252 p. (In Russian).
 6. **Menyajlo A.N., Chekin S.Yu., Kashcheev V.V., Maksioutov M.A., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin E.A., Lovachev S.S., Karpenko S.V., Kashcheeva P.V., Ivanov V.K.** Lifetime attributable risks from external and internal exposure to radiation: method for estimating. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 8-21. (In Russian).
 7. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Maksioutov M.A., Tumanov K.A., Vlasov O.K., Shchukina N.V., Tsyb A.F.** Radiation-epidemiological studies of thyroid cancer incidence in Russia after the Chernobyl accident (estimation of radiation risks, 1991-2008 follow-up period). *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2012, vol. 151, no. 3, pp. 489-499. DOI: 10.1093/rpd/hcs019.
 8. **Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A., Suyama A., Mabuchi K.** Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat. Res.*, 2003, vol. 160, no. 4, pp. 381-407.
 9. RERF. Brief Description. Available at: <http://www.rerf.jp/shared/briefdescript/briefdescript.pdf> (Accessed 28.04.2021).
 10. **Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E., Hakama M., Hill C., Howe G., Kaldor J., Muirhead C.R., Schubauer-Berigan M., Yoshimura T., the International Study Group.** Risk of cancer after low doses of ionizing radiation: retrospective cohort study in 15 countries. *BMJ*, 2005, vol. 331, no. 7508, pp. 77-80. DOI: 10.1136/bmj.38499.599861.