
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 614.876+614.84+614.73

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА БЕЛОРУССКОЙ АЭС ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ

В. В. КЛЯУС¹⁾, Е. В. НИКОЛАЕНКО¹⁾, О. М. ЖУКОВА¹⁾, Н. С. КОЧЕРГИНА¹⁾

¹⁾Научно-практический центр гигиены,
ул. Академическая, 8, 220012, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты прогнозной оценки уровней аварийного выброса радионуклидов, мощности дозы гамма-излучения, плотности выпадений на почву. Дан прогноз доз облучения населения Беларуси в результате возможной тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС (далее – БелАЭС). Установлено, что при реперной запроектной аварии на БелАЭС (выброс радионуклидов в окружающую среду порядка $4,5 \cdot 10^{15}$ Бк), продолжительность переноса радиоактивного загрязнения на расстояние до 100 км от БелАЭС при различных сценариях метеоусловий составит менее 2 ч. Суммарная плотность выпадения ^{131}I на территории до 100 км вокруг БелАЭС составит менее 29 кБк/м² (0,78 Ки/км²), плотность выпадения ^{137}Cs – 5,6 кБк/м² (0,15 Ки/км²). Максимальное прогнозируемое значение дозы облучения щитовидной железы составит до 93,8 мЗв, дозы облучения всего тела – 2,86 мЗв.

Образец цитирования:

Кляус ВВ, Николаенко ЕВ, Жукова ОМ, Кочергина НС. Прогнозная оценка последствий тяжелой аварии на Белорусской АЭС для здоровья населения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;3:40–48. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-3-40-48>

For citation:

Kliaus VV, Nikalayenka AU, Zhukova OM, Kacharhina NS. Prognosis of the consequences of the severe accident at the Belorussian NPP to public health. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;3:40–48. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-3-40-48>

Авторы:

Виктория Вячеславовна Кляус – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности.

Елена Владимировна Николаенко – кандидат медицинских наук; заведующий лаборатории радиационной безопасности.

Ольга Митрофановна Жукова – кандидат технических наук; старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности.

Наталья Сергеевна Кочергина – специалист лаборатории радиационной безопасности.

Authors:

Viktoryia V. Kliaus, PhD (biology); senior researcher at the laboratory of radiation safety.

vkliaus@gmail.com

Alena U. Nikalayenka, PhD (medicine); head of the laboratory of radiation safety.

nikolaenko67@gmail.com

Olga M. Zhukova, PhD (engineering); senior researcher at the laboratory of radiation safety.

Olga.Zhukova.47@inbox.ru

Natallia S. Kacharhina, specialist at the laboratory of radiation safety.

natkoch09@gmail.com

На основании полученных результатов исследований обоснован перечень и объем необходимых защитных мероприятий для населения и разработаны рекомендации по проведению аварийного радиационного мониторинга (далее – АРМ) вокруг БелАЭС с учетом международных рекомендаций и нормативных документов Республики Беларусь.

Ключевые слова: радионуклид; Белорусская АЭС; тяжелая запроектная авария; мощность дозы; объемная активность; выпадения; доза облучения населения; аварийный радиационный мониторинг.

PROGNOSYS OF THE CONSEQUENCES OF THE SEVERE ACCIDENT AT THE BELORUSIAN NPP TO PUBLIC HEALTH

V. V. KLIAUS^a, A. U. NIKALAYENKA^a, O. M. ZHUKOVA^a, N. S. KACHARHINA^a

^aScientific Practical Centre of Hygiene,
8 Akademičnaja Street, Minsk 220012, Belarus
Corresponding author: V. V. Kliaus (vkliaus@gmail.com)

The article presents the results of assessment of the levels of emergency radionuclide discharge, gamma dose rates, radionuclide fallout, as well as the prognosis of public exposure doses to the population of Belarus as a result of a possible severe nuclear accident at the Belarusian NPP. It was found that, in the case of a severe nuclear accident at the Belarusian NPP with total activity of the accidental release of $4.5 \cdot 10^{15}$ Bq, the transfer of radioactive contamination to a distance up to 100 km from the site under various meteorological scenarios, will be less than 2 hours. The total contamination density of the territory with ^{131}I and ^{137}Cs isotopes within 100 km radius around the Belarusian NPP will be less than 29 kBq/m² (0.78 Ci/km²) and less than 5.6 kBq/m² (0.15 Ci/km²) respectively. Maximum value of the thyroid dose will be up to 93.8 mSv, and of the effective dose – 2.86 mSv. Based on the obtained results, the justification for public protective measures was made and recommendations were given for conducting emergency radiation monitoring, taking into account international recommendations and national radiation safety standards of the Republic of Belarus.

Keywords: radionuclide; Belarusian NPP; severe nuclear accident; specific activity; dose rate; public exposure doses; radiation monitoring.

Введение

В соответствии с законодательством Республики Беларусь в компетенцию органов государственного санитарного надзора (далее – госсаннадзора) и ситуационно-кризисного центра (далее – СКЦ) Министерства здравоохранения Республики Беларусь входит оценка доз облучения населения (прогнозируемых и полученных), радиационный мониторинг продуктов питания и питьевой воды в населенных пунктах в ситуациях планируемого, существующего и аварийного облучения¹.

Как показывает практика, на АЭС возможны нарушения режимов нормальной эксплуатации и возникновения аварийных ситуаций с выходом радиоактивных веществ за пределы площадки АЭС – запроектные аварии (далее – ЗА), что представляет потенциальный риск для населения и окружающей среды, требующий принятия срочных защитных мероприятий за пределами площадки в границах заранее установленных радиусов аварийного реагирования², технических и организационных мер по проведению АРМ. Разработки научно обоснованной программы по проведению АРМ продуктов питания, питьевой воды и населенных пунктов, а также методических основ оценки прогнозируемых и полученных доз облучения населения при авариях на атомных электростанциях требует проведения прогнозных оценок возможных последствий тяжелых аварий для здоровья населения при отсутствии защитных мероприятий и после их введения.

Цель исследования: выполнить оценку возможных радиологических последствий реперной тяжелой запроектной аварии на БелАЭС для здоровья населения Беларуси, обосновать перечень и объем защитных мероприятий для населения и разработать рекомендации по проведению аварийного радиационного мониторинга вокруг БелАЭС.

¹О радиационной безопасности [Интернет] : Закон Республики Беларусь, 18 июня 2019 г. № 198-З. [Прочитано 01 июня 2020]. Доступно по: https://www.pravo.by/upload/docs/op/H11900198_1561496400.pdf.

²План защитных мероприятий при радиационной аварии на Белорусской атомной электростанции (внешний аварийный план) [Интернет] : утвержден постановлением Совета Министров Республики Беларусь 22 марта 2018 г. № 211. [Прочитано 01 июня 2020]. Доступно по: <https://energodoc.by/document/view?id=3245>.

Материалы и методы исследования

Методы оценки результатов. Для оценки возможных последствий тяжелых аварий на БелАЭС для здоровья населения Беларуси в качестве запроектной аварии выбран реперный сценарий тяжелой аварии с большой течью теплоносителя первого контура с отказом активной части САОЗ (ДУ346+ECCS) и дополнительным наложением полного обесточивания АЭС в первые 24 ч, описанный в ПООБ БелАЭС и основанный на результатах выполнения вероятностного анализа безопасности (ВАОБ-1 и ВАОБ-2) [1].

В качестве исходного состояния энергоблока рассмотрен режим работы блока на 100 % мощности. Аварийный выброс на интервале 1–30 суток после аварии формируется при этом за счет низкого (байпас контайнмента и байпас фильтров) и высотного (через венттрубу) выбросов. При оценке доз облучения населения выброс на данном этапе аварии консервативно рассмотрен на высоте 30 м, так как низкий выброс является менее благоприятным сценарием при аварии на АЭС.

Оценка аварийного выброса радионуклидов выполнена с помощью программного кода InterRas [2], оценка содержания радионуклидов в объектах окружающей среды и доз облучения человека – кода JRODOS [3].

Для моделирования переноса радионуклидов в атмосфере и прогноза радиоактивных выпадений при ЗА на БелАЭС были рассмотрены 5 сценариев метеоусловий, характерных для Островецкой площадки, выбранных на основе анализа многолетних метеорологических данных: 2 летних, 2 зимних и 1 условный сценарий экстремальных погодных условий с максимальной скоростью ветра, наблюдавшейся за последние 5 лет (табл. 1).

Таблица 1

Сценарии метеоусловий, использованные при прогнозировании последствий ЗА на БелАЭС

Table 1

Scenarios of the meteorological conditions used to predict the consequences of the beyond design basis accident at the Belarusian NPP

Сценарий	1	2	3	4	5
Дата	03.06.2019	10.05.2019	09.01.2019	31.01.2019	условный
Направление ветра, °	110	102	125	70	45
Скорость ветра, м/с	2	2	2,5	3	25
Категория устойчивости атмосферы	D	F	C	E	D
Высота слоя перемешивания, м	400	100	560	100	800
Осадки, мм	нет	дождь, 1,2	нет	мокрый снег	нет
Температура воздуха, °C	+20	+15	-14	+2	+15
Давление, мм. рт. ст	750	738	745	743	800
Влажность воздуха, %	70	80–100 (при осадках)	85	95	70

Дозы облучения населения рассчитаны за первые 10 ч, 7 дней и за первый месяц после аварии с целью сравнения полученных значений с действующими национальными и международными критериями реагирования, а также оценки вероятности возникновения у населения Республики Беларусь детерминированных и стохастических эффектов [4–6].

Рассчитаны следующие дозы облучения:

- средняя ОБЭ – взвешенная поглощенная доза облучения красного костного мозга;
- эквивалентная доза облучения щитовидной железы;
- эффективная доза внешнего облучения от проходящего радиоактивного облака;
- эффективная доза внешнего облучения от выпадений;
- эффективная доза внутреннего облучения от ингаляционного поступления радионуклидов;
- эффективная доза внутреннего облучения от потребления загрязненных радионуклидами продуктов питания;
- общая эффективная доза, которая складывается из эффективных доз внешнего и внутреннего облучения [2; 3].

В качестве репрезентативного лица для оценки общей эффективной дозы облучения при авариях выбран взрослый человек (старше 17 лет), потребляющий продукты питания местного производства. Уровни

потребления выбраны в соответствии со статистическими данными в целом по Республике Беларусь. Для оценки дозы облучения щитовидной железы в качестве репрезентативных лиц выбраны дети до 12 лет.

Прогнозирование последствий ЗА и анализ полученных результатов проводились с учетом установленных для БелАЭС радиусов аварийного реагирования:

- зона предупредительных мер (далее – ЗПМ) – радиус 3 км. Защитные меры в пределах ЗПМ принимаются до или вскоре после выброса радиоактивного материала или облучения с учетом создавшейся обстановки;
- зона планирования срочных защитных мер (далее – ЗПСМ) – радиус 15 км. Защитные меры в пределах ЗПСМ выполняются на основе данных радиационного мониторинга окружающей среды или с учетом создавшейся обстановки.

Зоны определяются как территории приблизительно круглой формы с центром окружностей, совпадающим с геометрическим центром отрезка, соединяющим устья вентиляционных труб энергоблоков № 1 и 2 Белорусской АЭС. Исходя из складывающейся обстановки, в аварийной ситуации может потребоваться проведение защитных мероприятий только в конкретной части (секторах) зон аварийного реагирования. Кроме того, согласно рекомендациям МАГАТЭ, предусматриваются меры по мониторингу (на подготовительном этапе, до возникновения аварийной ситуации) мощности дозы от выпадений и последующего проведения защитных мероприятий в течение такого срока (от недели до месяца), когда их осуществление позволит эффективно снизить возникновение стохастических эффектов (на расстоянии до 100 км), а также ограничить потребления местных продуктов питания и питьевой воды (на расстоянии до 300 км).

Результаты исследования и их обсуждение

Общая расчетная активность аварийного выброса радионуклидов при реперной ЗА на БелАЭС за первые сутки составит $4,5 \cdot 10^{15}$ Бк (табл. 2).

Таблица 2

Выброс радионуклидов в окружающую среду за первые сутки при ЗА на БелАЭС, Бк

Table 2

Radionuclide release into the environment during the first 24 hours after the beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq

Радионуклид	Активность, Бк	Радионуклид	Активность, Бк	Радионуклид	Активность, Бк
^{134}Cs	$9,90 \cdot 10^{12}$	I-135	$5,00 \cdot 10^{13}$	Xe-131m	$2,60 \cdot 10^{13}$
^{136}Cs	$2,00 \cdot 10^{12}$	Kr-83m	$8,20 \cdot 10^{12}$	Xe-133	$3,60 \cdot 10^{15}$
^{137}Cs	$6,90 \cdot 10^{12}$	Kr-85	$3,40 \cdot 10^{13}$	Xe-133m	$8,80 \cdot 10^{13}$
^{138}Cs	$6,90 \cdot 10^{12}$	Kr-85m	$4,40 \cdot 10^{13}$	Xe-135	$2,90 \cdot 10^{14}$
^{131}I	$3,60 \cdot 10^{13}$	Kr-87	$2,20 \cdot 10^{13}$	Xe-135m	$1,30 \cdot 10^{13}$
^{132}I	$3,00 \cdot 10^{13}$	Kr-88	$7,40 \cdot 10^{13}$	Xe-138	$6,00 \cdot 10^{12}$
^{133}I	$6,50 \cdot 10^{13}$	Rb-86	$7,10 \cdot 10^{10}$	Всего	$4,50 \cdot 10^{15}$
^{134}I	$2,30 \cdot 10^{13}$	Rb-88	$6,10 \cdot 10^{13}$		

Продолжительность переноса радиоактивного загрязнения на расстояние до 100 км от БелАЭС при сценариях 1–4 ЗА с общим выбросом радионуклидов в атмосферу, равным $2,15 \cdot 10^{15}$ Бк (за 10 ч), составит менее 2 ч (рис. 1).

Максимальные значения мощности дозы гамма-излучения при ЗА на БелАЭС составят (согласно прогнозу) до 77 мкЗв/ч в непосредственной близости от площадки (сценарий 2). Данные значения превышают критерий ДУВЗ (мощность дозы на высоте 1 м над уровнем земли – 1 мкЗв/ч) на расстоянии до 8 км от БелАЭС и требуют введения в данном радиусе таких защитных мер, как прекращение потребления местных продуктов питания (овощей и молока) и питьевой воды из открытых источников. Кроме того, в течение недели, согласно международным рекомендациям МАГАТЭ [5], потребуется проведение радиационного аварийного мониторинга местных продуктов питания в радиусе до 100 км от станции [6].

Диапазон значений доз облучения красного костного мозга взрослого человека за 10 ч с момента аварии при сценариях 1–5 в радиусе 3 км от Белорусской АЭС составит от $1,7 \cdot 10^{-5}$ до $1,91 \cdot 10^{-4}$ Гр, в радиусе 15 км от Белорусской АЭС – от $1,24 \cdot 10^{-6}$ до $1,53 \cdot 10^{-5}$ Гр, в радиусе 100 км – от $3,21 \cdot 10^{-10}$ до $6,13 \cdot 10^{-7}$ Гр (табл. 3). Следовательно, критерий аварийного реагирования – 1 Гр не будет превышен ни в одном из рассмотренных сценариев ЗА. Принятия срочных защитных мер для населения Беларуси для предотвращения или сведения к минимуму тяжелых детерминированных эффектов при ЗА на Белорусской АЭС не потребуется [4–6].

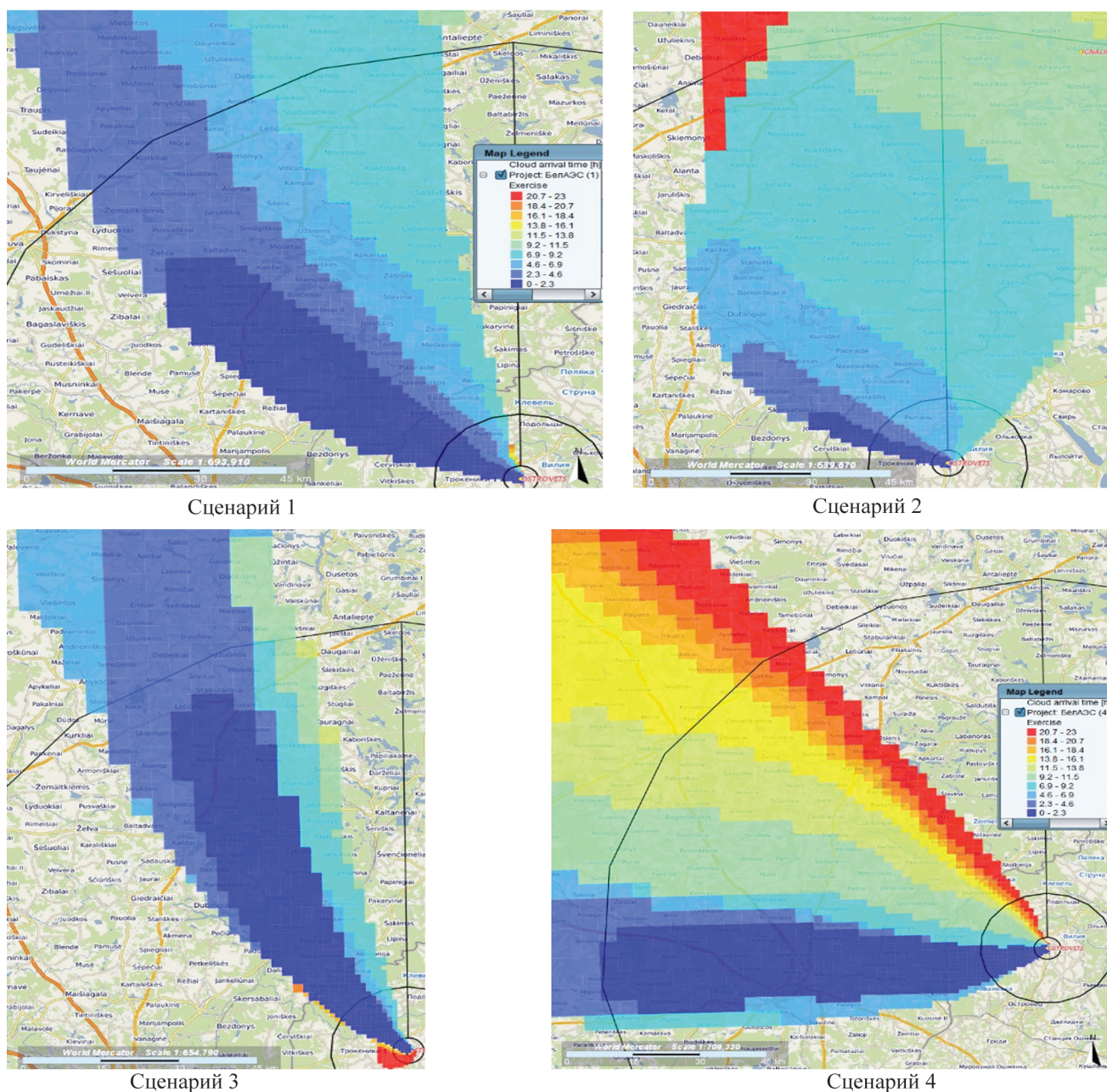


Рис. 1. Сценарии продолжительности переноса радиоактивного загрязнения на расстояние до 100 км от БелАЭС, ч

Fig. 1. Radioactive contamination transfer to a distance of up to 100 km from Belarusian NPP, hours

Загрязнение территорий через 1 сутки после ЗА на Белорусской АЭС представлено в табл. 3. Для сценариев 1, 3 и 5 рассматриваются прогнозируемые значения сухих выпадений, для сценариев 2 и 4 – суммарно сухих и влажных выпадений.

Максимальные плотности выпадения ^{131}I на расстоянии 3 км от БелАЭС за 24 ч после ЗА на БелАЭС для сценариев 1–5 составляют 298 кБк/м², 462 кБк/м², 393 кБк/м², 271 кБк/м² и 120 кБк/м² соответственно.

Максимальные плотности выпадения ^{137}Cs на расстоянии 3 км от БелАЭС за 24 ч после ЗА на БелАЭС для сценариев 1–4 будут менее 37 кБк/м² (1 Ки/км²). Следовательно, согласно расчетным данным, загрязнение территории ^{137}Cs при ЗА на БелАЭС на расстоянии 3–5 км от станции будет незначительным.

С целью оценки необходимости проведения йодной профилактики у населения оценены дозы облучения щитовидной железы. Оценка проведена для двух возрастных групп: взрослые (от 12 до 45 лет) и дети (до 12 лет). Прогнозируемые значения доз облучения щитовидной железы для всех 5 сценариев ЗА за первые 7 дней после аварии представлены в табл. 4.

Таблица 3

Плотность выпадений ^{131}I и ^{137}Cs на поверхность почвы за 24 ч после ЗА на Белорусской АЭС, Бк/м²

Table 3

Deposition density of ^{131}I and ^{137}Cs on the soil during the first 24 h after beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m²

Расстояние от БелАЭС, км	Сценарий 1		Сценарий 2		Сценарий 3		Сценарий 4		Сценарий 5	
	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs
3	$2,98 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^4$	$4,62 \cdot 10^5$	$2,55 \cdot 10^4$	$3,93 \cdot 10^5$	$1,99 \cdot 10^4$	$2,71 \cdot 10^5$	$3,76 \cdot 10^4$	$1,23 \cdot 10^5$	$3,73 \cdot 10^3$
5	$1,50 \cdot 10^5$	$6,05 \cdot 10^3$	$1,81 \cdot 10^5$	$9,20 \cdot 10^3$	$2,30 \cdot 10^5$	$1,45 \cdot 10^4$	$1,56 \cdot 10^5$	$2,19 \cdot 10^4$	$6,16 \cdot 10^4$	$1,92 \cdot 10^3$
10	$1,47 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^3$	$6,80 \cdot 10^4$	$6,40 \cdot 10^3$	$6,51 \cdot 10^4$	$5,11 \cdot 10^3$	$3,58 \cdot 10^4$	$6,20 \cdot 10^3$	$2,02 \cdot 10^4$	$6,64 \cdot 10^2$
15	$8,48 \cdot 10^3$	$7,18 \cdot 10^2$	$1,16 \cdot 10^4$	$2,41 \cdot 10^3$	$8,02 \cdot 10^3$	$1,99 \cdot 10^3$	$2,90 \cdot 10^4$	$5,66 \cdot 10^3$	$8,69 \cdot 10^3$	$3,07 \cdot 10^2$
20	$5,19 \cdot 10^3$	$4,31 \cdot 10^2$	$9,36 \cdot 10^3$	$1,14 \cdot 10^3$	$4,81 \cdot 10^3$	$1,40 \cdot 10^3$	$1,78 \cdot 10^4$	$3,83 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^3$	$2,06 \cdot 10^2$
25	$3,12 \cdot 10^3$	$2,80 \cdot 10^2$	$7,11 \cdot 10^3$	$8,38 \cdot 10^2$	$2,91 \cdot 10^3$	$9,74 \cdot 10^2$	$1,16 \cdot 10^4$	$2,72 \cdot 10^3$	$3,33 \cdot 10^3$	$1,33 \cdot 10^2$
30	$2,29 \cdot 10^3$	$2,04 \cdot 10^2$	$5,37 \cdot 10^3$	$7,58 \cdot 10^2$	$1,78 \cdot 10^3$	$7,56 \cdot 10^2$	$8,49 \cdot 10^3$	$2,08 \cdot 10^3$	$1,98 \cdot 10^3$	$8,37 \cdot 10^1$
35	$1,66 \cdot 10^3$	$1,65 \cdot 10^2$	$3,75 \cdot 10^3$	$6,61 \cdot 10^2$	$1,23 \cdot 10^3$	$3,59 \cdot 10^2$	$5,54 \cdot 10^3$	$1,50 \cdot 10^3$	$1,73 \cdot 10^3$	$7,62 \cdot 10^1$
40	$1,30 \cdot 10^3$	$1,33 \cdot 10^2$	$3,02 \cdot 10^3$	$6,05 \cdot 10^2$	$8,48 \cdot 10^2$	$4,32 \cdot 10^2$	$4,02 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^3$	$1,54 \cdot 10^3$	$6,99 \cdot 10^1$
45	$1,19 \cdot 10^3$	$1,35 \cdot 10^2$	$2,47 \cdot 10^3$	$5,49 \cdot 10^2$	$6,89 \cdot 10^2$	$3,70 \cdot 10^2$	$3,00 \cdot 10^3$	$9,28 \cdot 10^2$	$1,48 \cdot 10^3$	$6,84 \cdot 10^1$
50	$1,09 \cdot 10^3$	$1,29 \cdot 10^2$	$1,88 \cdot 10^3$	$4,66 \cdot 10^2$	$8,41 \cdot 10^2$	$3,46 \cdot 10^2$	$2,66 \cdot 10^3$	$9,17 \cdot 10^2$	$1,31 \cdot 10^3$	$6,12 \cdot 10^1$
55	$9,60 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^2$	$1,69 \cdot 10^3$	$4,19 \cdot 10^2$	$7,19 \cdot 10^2$	$3,21 \cdot 10^2$	$2,21 \cdot 10^3$	$7,97 \cdot 10^2$	$1,31 \cdot 10^3$	$6,18 \cdot 10^1$
60	$8,75 \cdot 10^2$	$1,17 \cdot 10^2$	$1,40 \cdot 10^3$	$3,55 \cdot 10^2$	$4,74 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^2$	$1,95 \cdot 10^3$	$7,02 \cdot 10^2$	$7,43 \cdot 10^2$	$3,60 \cdot 10^1$
65	$6,59 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^2$	$9,27 \cdot 10^2$	$2,24 \cdot 10^2$	$3,55 \cdot 10^2$	$2,10 \cdot 10^2$	$1,73 \cdot 10^3$	$6,32 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^3$	$5,65 \cdot 10^1$
70	$6,47 \cdot 10^2$	$1,08 \cdot 10^2$	$6,61 \cdot 10^2$	$1,84 \cdot 10^2$	$3,72 \cdot 10^2$	$1,41 \cdot 10^2$	$1,61 \cdot 10^3$	$4,65 \cdot 10^2$	$8,41 \cdot 10^2$	$4,24 \cdot 10^1$
75	$5,30 \cdot 10^2$	$9,44 \cdot 10^1$	$4,98 \cdot 10^2$	$1,56 \cdot 10^2$	$3,94 \cdot 10^2$	$1,81 \cdot 10^2$	$1,56 \cdot 10^3$	$4,02 \cdot 10^2$	$1,03 \cdot 10^3$	$5,27 \cdot 10^1$
80	$4,11 \cdot 10^2$	$8,21 \cdot 10^1$	$4,25 \cdot 10^2$	$1,34 \cdot 10^2$	$3,28 \cdot 10^2$	$1,83 \cdot 10^2$	$1,60 \cdot 10^3$	$3,57 \cdot 10^2$	$8,95 \cdot 10^2$	$4,62 \cdot 10^1$
85	$4,10 \cdot 10^2$	$8,08 \cdot 10^1$	$3,41 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^2$	$3,97 \cdot 10^2$	$1,81 \cdot 10^2$	$1,62 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^2$	$9,32 \cdot 10^2$	$4,84 \cdot 10^1$
90	$3,16 \cdot 10^2$	$7,10 \cdot 10^1$	$2,69 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^2$	$3,07 \cdot 10^2$	$1,81 \cdot 10^2$	$1,55 \cdot 10^3$	$2,75 \cdot 10^2$	$9,13 \cdot 10^2$	$4,77 \cdot 10^1$
95	$3,09 \cdot 10^2$	$7,40 \cdot 10^1$	$1,97 \cdot 10^2$	$1,17 \cdot 10^2$	$3,28 \cdot 10^2$	$1,78 \cdot 10^2$	$1,42 \cdot 10^3$	$2,51 \cdot 10^2$	$8,08 \cdot 10^2$	$4,26 \cdot 10^1$
100	$2,64 \cdot 10^2$	$7,11 \cdot 10^1$	$1,65 \cdot 10^2$	$1,21 \cdot 10^2$	$2,44 \cdot 10^2$	$1,76 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^3$	$2,53 \cdot 10^2$	$7,26 \cdot 10^2$	$3,86 \cdot 10^1$

Таблица 4

Дозы облучения щитовидной железы за первые 7 дней после ЗА на Белорусской АЭС, мЗв

Table 4

Thyroid doses in the first 7 days after beyond design basis accident at the Belarusian NPP, mSv

Расстояние от БелАЭС, км	Сценарий 1		Сценарий 2		Сценарий 3		Сценарий 4		Сценарий 5	
	Взрослые	Дети	Взрослые	Дети	Взрослые	Дети	Взрослые	Дети	Взрослые	Дети
3	$1,48 \cdot 10^1$	$3,25 \cdot 10^1$	$4,20 \cdot 10^1$	$9,24 \cdot 10^1$	$4,26 \cdot 10^1$	$9,38 \cdot 10^1$	6,38	$1,40 \cdot 10^1$	5,16	$1,14 \cdot 10^1$
5	7,34	$1,62 \cdot 10^1$	$1,64 \cdot 10^1$	$3,61 \cdot 10^1$	$2,65 \cdot 10^1$	$5,84 \cdot 10^1$	3,43	7,54	2,64	5,81
10	1,10	2,43	4,81	$1,06 \cdot 10^1$	6,22	$1,37 \cdot 10^1$	$5,58 \cdot 10^{-1}$	1,23	$8,83 \cdot 10^{-1}$	1,94
15	$6,83 \cdot 10^{-1}$	1,50	1,76	3,87	1,96	4,31	$3,78 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$3,88 \cdot 10^{-1}$	$8,54 \cdot 10^{-1}$
20	$4,13 \cdot 10^{-1}$	$9,08 \cdot 10^{-1}$	1,64	3,62	1,30	2,85	$2,06 \cdot 10^{-1}$	$4,53 \cdot 10^{-1}$	$2,53 \cdot 10^{-1}$	$5,56 \cdot 10^{-1}$
25	$2,52 \cdot 10^{-1}$	$5,54 \cdot 10^{-1}$	1,18	2,60	$8,81 \cdot 10^{-1}$	1,94	$1,29 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^{-1}$	$1,29 \cdot 10^{-1}$	$2,83 \cdot 10^{-1}$
30	$1,97 \cdot 10^{-1}$	$4,33 \cdot 10^{-1}$	$7,04 \cdot 10^{-1}$	1,55	$7,37 \cdot 10^{-1}$	1,62	$9,81 \cdot 10^{-2}$	$2,16 \cdot 10^{-1}$	$9,88 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-1}$
35	$1,57 \cdot 10^{-1}$	$3,46 \cdot 10^{-1}$	$2,69 \cdot 10^{-1}$	$5,91 \cdot 10^{-1}$	$3,87 \cdot 10^{-1}$	$8,52 \cdot 10^{-1}$	$6,76 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-1}$	$8,87 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-1}$
40	$1,26 \cdot 10^{-1}$	$2,78 \cdot 10^{-1}$	$1,71 \cdot 10^{-1}$	$3,77 \cdot 10^{-1}$	$4,69 \cdot 10^{-1}$	1,03	$5,57 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-1}$	$8,14 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$
45	$1,35 \cdot 10^{-1}$	$2,96 \cdot 10^{-1}$	$2,20 \cdot 10^{-1}$	$4,85 \cdot 10^{-1}$	$4,35 \cdot 10^{-1}$	$9,58 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-1}$	$8,09 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-1}$
50	$1,20 \cdot 10^{-1}$	$2,65 \cdot 10^{-1}$	$2,11 \cdot 10^{-1}$	$4,64 \cdot 10^{-1}$	$4,12 \cdot 10^{-1}$	$9,07 \cdot 10^{-1}$	$4,23 \cdot 10^{-2}$	$9,30 \cdot 10^{-2}$	$7,36 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-1}$
55	$1,05 \cdot 10^{-1}$	$2,31 \cdot 10^{-1}$	$1,61 \cdot 10^{-1}$	$3,55 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-1}$	$3,98 \cdot 10^{-1}$	$3,72 \cdot 10^{-2}$	$8,18 \cdot 10^{-2}$	$7,44 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-1}$
60	$1,10 \cdot 10^{-1}$	$2,42 \cdot 10^{-1}$	$1,62 \cdot 10^{-1}$	$3,56 \cdot 10^{-1}$	$3,15 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-1}$	$4,39 \cdot 10^{-2}$	$9,67 \cdot 10^{-2}$	$4,39 \cdot 10^{-2}$	$9,65 \cdot 10^{-2}$
65	$1,02 \cdot 10^{-1}$	$2,25 \cdot 10^{-1}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$2,60 \cdot 10^{-1}$	$2,54 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$	$3,57 \cdot 10^{-2}$	$7,85 \cdot 10^{-2}$	$6,94 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-1}$
70	$9,30 \cdot 10^{-2}$	$2,05 \cdot 10^{-1}$	$6,05 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	$1,67 \cdot 10^{-1}$	$3,68 \cdot 10^{-1}$	$3,10 \cdot 10^{-2}$	$6,82 \cdot 10^{-2}$	$5,23 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$
75	$7,87 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-1}$	$6,28 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-1}$	$2,06 \cdot 10^{-1}$	$4,52 \cdot 10^{-1}$	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$6,22 \cdot 10^{-2}$	$6,59 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-1}$
80	$7,84 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-1}$	$5,49 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-1}$	$2,06 \cdot 10^{-1}$	$4,54 \cdot 10^{-1}$	$3,54 \cdot 10^{-2}$	$7,78 \cdot 10^{-2}$	$5,82 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-1}$
85	$7,23 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$6,34 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$2,07 \cdot 10^{-1}$	$4,55 \cdot 10^{-1}$	$3,90 \cdot 10^{-2}$	$8,57 \cdot 10^{-2}$	$6,18 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-1}$
90	$6,26 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-1}$	$7,16 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$2,05 \cdot 10^{-1}$	$4,50 \cdot 10^{-1}$	$3,71 \cdot 10^{-2}$	$8,16 \cdot 10^{-2}$	$6,15 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-1}$
95	$6,01 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-1}$	$6,94 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-1}$	$1,98 \cdot 10^{-1}$	$4,37 \cdot 10^{-1}$	$3,27 \cdot 10^{-2}$	$7,19 \cdot 10^{-2}$	$5,56 \cdot 10^{-2}$	$1,22 \cdot 10^{-1}$
100	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-2}$	$1,81 \cdot 10^{-1}$	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$4,27 \cdot 10^{-1}$	$3,09 \cdot 10^{-2}$	$6,80 \cdot 10^{-2}$	$5,13 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$

Максимальные прогнозируемые значения доз облучения щитовидной железы в радиусе 3 км составят до 93,8 мЗв у детей и до 42,6 мЗв у взрослых; в радиусе 15 км – до 4,31 мЗв у детей и до 1,96 у взрослых (сценарий 3). Максимальные прогнозируемые значения доз облучения щитовидной железы будут наблюдаться у детей, а на расстоянии более 5 км от БелАЭС могут превысить критерий аварийного реагирования для проведения йодной профилактики (50 мЗв за первые 7 дней) [4–6].

С целью определения необходимости проведения укрытия, эвакуации, дезактивации, ограничения потребления пищевых продуктов, молока и воды, контроля радиоактивного загрязнения оценена общая эффективная доза облучения за первые 7 дней.

Прогнозируемые значения общей эффективной дозы для взрослых при всех рассматриваемых метеосценариях ЗА при условиях нормальной жизнедеятельности (человек проводит часть времени в помещении, то есть учтен эффект экранирования) и при постоянном нахождении человека на открытом воздухе представлены на рис. 2.

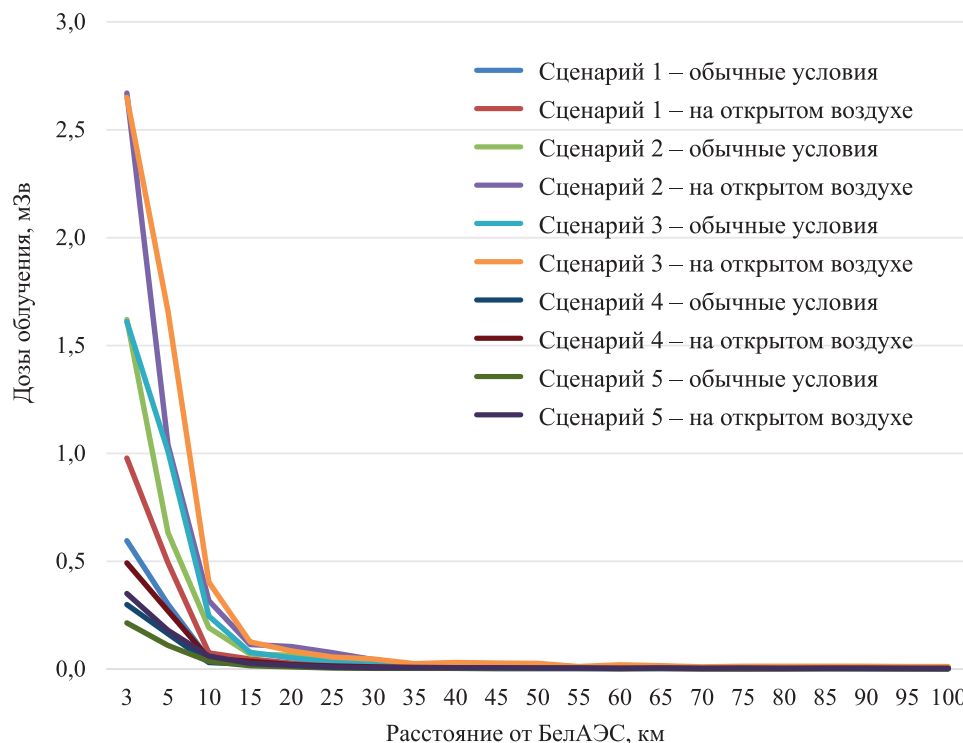


Рис. 2. Прогнозируемые общие эффективные дозы облучения населения за первые 7 дней после ЗА на Белорусской АЭС

Fig. 2. Estimated total effective doses to the public in the first 7 days after accident at the Belarusian NPP

Результаты анализа свидетельствуют, что максимальное значение общей эффективной дозы за первые 7 дней после ЗА будет наблюдаться при сценарии 2, предположительно при постоянном пребывании на открытом воздухе и составят в ЗПМ (в радиусе 3 км от площадки) 2,67 мЗв, а в ЗПСМ (в радиусе 15 км от площадки) – 0,11 мЗв, что не превысит установленный критерий аварийного реагирования – 100 мЗв и не потребует мер по укрытию и/или эвакуации населения из данных зон.

В радиусе 100 км от БелАЭС прогнозируемые значения общей эффективной дозы облучения населения в зависимости от метеоситуации и времени пребывания на открытом воздухе будут в диапазоне от 1,44 до 11,9 мкЗв.

Для летних сценариев ЗА (1–3) рассчитаны дозы внутреннего облучения взрослого населения за счет потребления продуктов питания (лиственные овощи, молоко, мясо, картофель), загрязненных основными дозообразующими радионуклидами – ^{131}I и ^{137}Cs на ранней стадии аварии (за первые сутки и 7 суток) в зонах аварийного планирования (в радиусе 3 км, 15 км и 100 км от БелАЭС) (табл. 5).

Суммарная доза облучения населения от потребления продуктов питания, загрязненных суммарно ^{131}I и ^{137}Cs , за 7 дней после ЗА в ЗПМ составит 0,19 мЗв, в ЗПСМ – 0,008 мЗв, а в РРП – 0,0006 мЗв. Данные уровни доз облучения не превысят установленного предела дозы для населения – 1 мЗв/год [6], исходя из которого рассчитаны нормативы содержания радионуклидов в продуктах питания (РДУ-99) и не превысят общих критериев реагирования для пищевых продуктов и других предметов потребления с целью снижения риска возникновения стохастических эффектов – 10 мЗв в течение первого года [5].

Таблица 5

Дозы внутреннего облучения населения за счет перорального поступления пищевых продуктов, загрязненных ^{131}I и ^{137}Cs , за 7 дней после ЗА на БелАЭС, мЗв

Table 5

Doses of the internal exposure of the public due to consumption of foodstuffs contaminated with ^{131}I and ^{137}Cs , in the 7 days after beyond design basis accident at Belarusian NPP, mSv

Радионуклид	Листовые овощи	Свинина	Коровье молоко	Суммарно от всех продуктов
3 км от БелАЭС				
^{131}I	$5,92 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \cdot 10^{-7}$	$5,91 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$
^{137}Cs	$3,68 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-2}$	$7,06 \cdot 10^{-2}$
Сумма	$9,60 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$9,27 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-1}$
15 км от БелАЭС				
^{131}I	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$8,83 \cdot 10^{-9}$	$1,40 \cdot 10^{-3}$	$3,42 \cdot 10^{-3}$
^{137}Cs	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$4,70 \cdot 10^{-3}$
Сумма	$4,48 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$3,64 \cdot 10^{-3}$	$8,13 \cdot 10^{-3}$
100 км от БелАЭС				
^{131}I	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$8,82 \cdot 10^{-10}$	$4,47 \cdot 10^{-5}$	$9,47 \cdot 10^{-5}$
^{137}Cs	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$2,46 \cdot 10^{-4}$	$5,17 \cdot 10^{-4}$
Сумма	$3,20 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$2,91 \cdot 10^{-4}$	$6,12 \cdot 10^{-4}$

Максимальные значения общей эффективной дозы облучения с учетом потребления за первые 7 дней составят: в ЗПМ – 2,86 мЗв, в ЗПСМ – 0,118 мЗв, а в РРП – до 15 мкЗв.

В случае ЗА на Белорусской АЭС общая эффективная доза облучения населения не превысит критерия реагирования (100 мЗв за первые 7 дней) ни в одном из рассматриваемых сценариев.

Для определения необходимости проведения долгосрочного медицинского наблюдения за облученным населением, а также мероприятий с целью выявления и эффективного лечения радиационно-индуцируемых заболеваний, оценены общие эффективные дозы облучения населения за первые 30 дней после ЗА на Белорусской АЭС как при нормальных условиях жизнедеятельности, так и при повышенном времени нахождения на открытом воздухе.

Результаты оценки свидетельствуют, что за пределами площадки АЭС в ближней зоне (от 3 км) при обычных условиях жизнедеятельности минимальное значение общей эффективной дозы составило 0,23 мЗв (сценарий 5), максимальное – 1,73 мЗв (сценарий 2). При нахождении человека на открытом воздухе 80 % времени результаты составили от $3,79 \cdot 10^{-1}$ мЗв (сценарий 5) до 2,84 мЗв (сценарий 2).

Значения общей эффективной дозы в дальней зоне (50–100 км) при обычных условиях жизнедеятельности варьировались от $1,75 \cdot 10^{-3}$ мЗв (сценарий 5) до $1,66 \cdot 10^{-2}$ мЗв (сценарий 3). При повышенном времени нахождения человека на открытом воздухе – от $2,88 \cdot 10^{-3}$ мЗв (сценарий 5) до $2,72 \cdot 10^{-2}$ мЗв (сценарий 3).

Максимальные прогнозируемые значения общей эффективной дозы облучения населения за первый месяц после ЗА на БелАЭС за пределами площадки составят: в ЗПМ – 2,84 мЗв, в ЗПСМ – 0,13 мЗв, что не потребует защитных мероприятий в виде последующего медицинского наблюдения и консультирования [3].

Дозы облучения населения от потребления загрязненных ^{131}I и ^{137}Cs продуктов питания за 1 год после ЗА на Белорусской АЭС не превысят критерия аварийного реагирования для временного переселения, дезактивации, завоза чистых пищевых продуктов и информирования населения (100 мЗв в год) [4–6].

Заключение

По результатам проведенной прогнозной оценки радиологических последствий радиационных аварий на АЭС установлено, что при реперной запроектной аварии на Белорусской АЭС с общим выбросом радионуклидов в атмосферу за 1 сутки равным $4,5 \cdot 10^{15}$ Бк продолжительность переноса радиоактивного загрязнения на расстояние до 100 км от Белорусской АЭС при различных сценариях метеоусловий составит менее 2 ч.

Согласно расчетным данным, территория в радиусе 3 км вокруг БелАЭС при 3А (сценарии 1–5) будет загрязнена изотопом ^{131}I с плотностью загрязнения от 120 до 462 кБк/м². Суммарная плотность выпадений ^{131}I и ^{137}Cs в радиусе 15 км, 30 км, 100 км составит менее 37 кБк/м² (1 Ки/км²). Следовательно, таких дополнительных защитных мер, как дезактивационные работы на этой территории, проводить не потребуется, однако обязательно необходимо проведение радиационного аварийного мониторинга.

Прогнозируемые уровни доз облучения населения указывают на то, что могут потребоваться следующие меры по защите населения:

- проведение йодной профилактики у взрослых на расстоянии до 3 км от БелАЭС, а у детей – более 5 км от БелАЭС;
- введение запрета на потребление местных продуктов питания и воды из открытых источников требуется в радиусе 100 км от БелАЭС [7];
- таких дополнительных мероприятий, как дезактивационные работы на территории вокруг Белорусской АЭС, проводить не потребуется;
- обязательно проведение радиационного мониторинга, а также мониторинга продуктов питания и питьевой воды в радиусе 100 км от БелАЭС;
- информирование населения.

Полученные результаты могут быть использованы органами госсаннадзора и СКЦ Министерства здравоохранения для выполнения возложенных на них задач по аварийному реагированию на радиационные аварии на АЭС, включая проведение аварийного радиационного мониторинга местных продуктов питания и питьевой воды, выполнение прогноза доз облучения населения и введение запрета на потребление местных продуктов питания и воды из открытых источников водоснабжения, разработку инструкций, аварийных планов и процедур по обеспечению аварийной готовности и реагирования.

Результаты данного исследования использованы при разработке Программы аварийного радиационного мониторинга и метода планирования и проведения аварийного радиационного мониторинга продуктов питания, питьевой воды и мест проживания населения при авариях на Белорусской, Ровенской и Смоленской АЭС.

Библиографические ссылки

1. Белорусская АЭС. Блок 1. Предварительный отчет по обоснованию безопасности. Глава 15. Анализ аварий. Книга 1–7. Нижний Новгород : РОСАТОМ, НИАЭП; 2015. 2404 с.
2. INTERRAS 1.2. Вена: МАГАТЭ; 2000. 105 с.
3. Ievdin I, et al. JRodos User Guide [Internet, cited 2020 June 3]. Available from: https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_UserGuide.pdf.
4. Критерии оценки радиационного воздействия: гигиенический норматив : утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213. *Радиационная гигиена*. Минск : РЦГЭиОЗ; 2013. с. 35–167.
5. Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7. Vienna: IAEA; 2015. 102 p.
6. Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Guide № GSG-2. Vienna: IAEA; 2015. 102 p.

References

1. *Belorusskaya AES. Blok 1. Predvaritelnyy otchet po obespecheniu bezopasnosti. Chast 15. Analis avariyy. Kniga 1–7* [Belarusian nuclear power plant. Block 1: Preliminary Safety Analysis Report. Chapter 15. Analysis of accidents. Book 1–7]. Nizhny Novgorod : ROSATOM, NEAEP; 2015. 2404 p. Russian.
2. INTERRAS 1.2. Vienna: IAEA; 2000. 105 p.
3. Ievdin I, et al. JRodos User Guide [Internet, cited 2020 June 3]. Available from: https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_UserGuide.pdf.
4. Radiation exposure assessment criteria: hygiene. standard: approved Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus on December 28, 2012 № 213. *Radiation hygiene*. Minsk: RCHEPH; 2013. p. 35–167. Russian.
5. Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7. Vienna: IAEA; 2015. 102 p.
6. Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Guide № GSG-2. Vienna: IAEA; 2015. 102 p.

Статья поступила в редколлегию 13.07.2021.
Received by editorial board 13.07.2021.