

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 614.876:621.039.58:004.94(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-421-432>

Поступила в редакцию 24.08.2022
Received 24.08.2022

В. В. Кляус¹, О. М. Жукова¹, Е. В. Николаенко¹, А. М. Шайбак², А. В. Трусов²

¹Научно-практический центр гигиены, Минск, Республика Беларусь

²Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения
и мониторингу окружающей среды, Минск, Республика Беларусь

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА БЕЛОРУССКОЙ АЭС С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ J-RODOS И RECASS-ЭКСПРЕСС

Аннотация. С помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС проведено моделирование радиологических и радиационно-экологических последствий тяжелой запроектной аварии на энергоблоке Белорусской АЭС с реактором типа ВВЭР-1200. Результаты моделирования показали, что при выбросе радионуклидов из защитной оболочки реактора общим выбросом $2,15 \cdot 10^{15}$ Бк максимальные значения плотности выпадений из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения аварии составят для I-131 $2,98 \cdot 10^5$ Бк/м² (J-RODOS) и $7 \cdot 10^5$ Бк/м² (RECASS-ЭКСПРЕСС), а Cs-137 – $1,11 \cdot 10^4$ Бк/м² и $1,3 \cdot 10^5$ Бк/м² соответственно. Разница в значении плотности выпадений радионуклидов, смоделированная данными программными комплексами, увеличивается с расстоянием от источника выброса и на расстоянии более 10 км составляет 1 порядок величины. Прогнозируемые значения эквивалентной дозы облучения щитовидной железы взрослых и детей за первые 7 сут после аварии, полученные с помощью расчетов J-RODOS, в 3–4 раза выше, чем с использованием программного продукта RECASS-ЭКСПРЕСС. На расстоянии 3–5 км от площадки АЭС дозы составили от 3,7 до 14,8 мЗв у взрослых и от 16,2 до 32,5 мЗв у детей. Значения общей эффективной дозы при моделировании J-RODOS в 2 раза выше, чем у RECASS-ЭКСПРЕСС, на расстоянии 3 км от площадки (0,60 и 0,32 мЗв соответственно) и в 1,5 раза выше на расстоянии 5 км от площадки (0,30 и 0,21 мЗв соответственно). С увеличением расстояния от АЭС сходимость в полученных результатах оценки общей эффективной дозы увеличивается. Ни один из полученных результатов прогнозирования не превышает установленных критериев аварийного реагирования и не указывает на необходимость проведения защитных мероприятий для населения.

Ключевые слова: Cs-137, I-131, J-RODOS, RECASS-ЭКСПРЕСС, авария, Белорусская АЭС, доза облучения, защитные меры, население, плотность выпадений

Для цитирования: Сравнительный анализ результатов моделирования последствий тяжелой аварии на Белорусской АЭС с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС / В. В. Кляус [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 421–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-421-432>

Viktoriya V. Kliaus¹, Olga M. Zhukova¹, Alena U. Nikalayenka¹, Alla M. Shaibak², Aliaksandr V. Trusau²

¹Scientific-Practical Center of Hygiene, Minsk, Republic of Belarus

²Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring,
Minsk, Republic of Belarus

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF SIMULATION OF THE CONSEQUENCES OF A SERIOUS ACCIDENT AT A BELARUSIAN NPP WITH THE USE OF J-RODOS AND RECASS-EXPRESS SOFTWARE COMPLEXES

Abstract. Using the J-RODOS and RECASS-EXPRESS software packages, modeling of the radiological and radiation-ecological consequences of a severe beyond design basis accident at the power unit of the Belarusian NPP with a VVER-

1200 reactor was carried out. The simulation results showed that if radionuclides were released from the reactor containment at the level of $2.15 \cdot 10^{15}$ Bq, the maximum values of the fallout from the atmosphere to the surface 1 day after the accident will be $2.98 \cdot 10^5$ Bq/m² for I-131 (J-RODOS) and $7 \cdot 10^5$ Bq/m² (RECASS-EXPRESS), and for Cs-137 – $1.11 \cdot 10^4$ Bq/m² and $1.3 \cdot 10^5$ Bq/m², respectively. The difference in the values of the radionuclide fallout, modeled by these software packages, increases with the distance from the release source and at a distance of more than 10 km reaches 1 order of magnitude. The predicted values of the equivalent thyroid dose for adults and children for the first 7 days after the accident, obtained using J-RODOS calculations, are 3–4 times higher than using RECASS-EXPRESS software product. At a distance of 3–5 km from the NPP site, doses ranged from 3.7 to 14.8 mSv for adults and 16.2 to 32.5 mSv for children. The values of the total effective dose with the J-RODOS simulation are 2 times higher than those with RECASS-EXPRESS at a distance of 3 km from the site (0.60 and 0.32 mSv, respectively) and 1.5 times higher at a distance of 5 km from the site (0.30 and 0.21 mSv respectively). As the distance from the NPP increases, the convergence in the obtained evaluation results of total effective dose increases. None of the obtained prediction results exceeds the established emergency response criteria and do not indicate the need for protective measures for the public.

Keywords: Cs-137, I-131, J-RODOS, RECASS-EXPRESS, emergency, Belarusian NPP, exposure dose, protective actions, public, fallout

For citation: Kliaus V. V., Zhukova O. M., Nikalayenka A. U., Shaibak A. M., Trusau A. V. Comparative analysis of the results of simulation of the consequences of a serious accident at a Belarusian NPP with the use of J-RODOS and RECASS-EXPRESS software complexes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 421–432 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-421-432>

Введение. В связи с пуском в эксплуатацию первой в Республике Беларусь атомной электростанции (Белорусской АЭС) возникает необходимость в оценке возможных радиологических и радиационно-экологических последствий аварий различной степени тяжести для обеспечения готовности к аварийному реагированию в соответствии с национальным законодательством и международными требованиями¹. В Республике Беларусь в системе ситуационно-кризисных центров (далее – СКЦ) используются два программных комплекса, которые предназначены для поддержки принятия решений при управлении радиационными авариями за пределами площадки АЭС, – J-RODOS (СКЦ Министерства здравоохранения Республики Беларусь на базе Научно-практического центра гигиены) и RECASS-ЭКСПРЕСС (СКЦ Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь на базе Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (далее – Белгидромет)).

Данные программные комплексы ежегодно используются при проведении аварийных учений и тренировок для численной оценки возможных уровней загрязнения окружающей среды и ожидаемых доз облучения населения при гипотетической аварии на Белорусской АЭС. Так как в основу программных комплексов заложены различные модели распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и миграции радионуклидов, а также различные методы оценки ожидаемых доз облучения населения, возникает необходимость проведения сравнения и анализа результатов моделирования с помощью данных программных комплексов. Результаты прогнозирования последствий аварии с помощью моделей позволяют на количественном уровне определить необходимость проведения защитных мероприятий в случае аварии на АЭС.

Материалы и методы. Для прогнозирования последствий тяжелой запроектной аварии (далее – ТЗА) на Белорусской АЭС использовались программный комплекс J-RODOS (Java-based Realtime Online Decision Support System)², разработанный Технологическим институтом Карлсруе, и программный комплекс RECASS³, разработанный НПО «Тайфун» и предназначенный для поддержки принятия решений в задачах радиоэкологического анализа и прогностических оценок радиоактивного загрязнения окружающей среды при радиационных авариях.

В основе программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС заложены сходные модели атмосферного переноса примеси на расстоянии до 50 км от источника выброса (модель ат-

¹ Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7. Vienna: IAEA, 2015. 102 p. ; Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213 // Радиационная гигиена: сб. норм. док. Минск: РЦГЭиОЗ, 2013. С. 35–167.

² JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2017. 22 p.

³ Система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно- и химически опасных объектах RECASS. Экспресс. Оценка последствий атмосферного выброса радиоактивности в случае аварии на радиационно-опасном объекте: руководство пользователя. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/f3e/RECASS_Express_8_Manual.pdf (дата обращения 01.08.2022).

мосферной дисперсии Гаусса) [1], есть возможность учета физико-химического состава выброса и высоты источника выброса (приземный или высотный), метеорологических условий (класс стабильности атмосферы, скорость и направление ветра, температура воздуха, осадки и др.), ландшафтно-географических условий (координаты площадки, тип подстилающей поверхности и др.). Основные модели и допущения, используемые в программных комплексах J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС, описаны в соответствующих руководствах.

В качестве входных данных J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС используют параметры источника (выброс радионуклидов), координаты площадки АЭС и метеоусловия, что позволяет спрогнозировать значения следующих параметров:

- объемная активность радионуклидов в объектах окружающей среды;
- интегральная концентрация радионуклидов;
- время прибытия радиоактивного облака и мощность дозы гамма-излучения на местности (J-RODOS);
- поверхностная активность (плотность выпадений радионуклидов на поверхность земли);
- средняя относительная биологическая эффективность излучений – взвешенная поглощенная доза облучения красного костного мозга (далее – доза облучения красного костного мозга);
- эквивалентная доза облучения щитовидной железы взрослых (от 12 до 45 лет) и детей (до 12 лет);
- доза облучения от облака, формируемая вследствие внешнего облучения от проходящего радиоактивного облака;
- доза от выпадений, формируемая вследствие внешнего облучения от выпадений;
- эффективная доза от ингаляционного поступления радионуклидов;
- общая эффективная доза, которая в данном случае складывается из эффективной дозы от ингаляции, дозы вследствие облучения от облака и дозы, сформированной от выпадений;
- необходимость применения мер защиты (контрмер): J-RODOS использует численные значения уровней вмешательства, рекомендованные МАГАТЭ¹, либо национальные значения² (которые задаются пользователем); RECASS-ЭКСПРЕСС – критерии согласно НРБ 99/2009³ либо национальные значения⁴;
- дозы облучения населения с учетом применяемых контрмер (J-RODOS).

Для проведения сравнительной оценки результатов моделирования радиологических и радиационно-экологических последствий аварии на Белорусской АЭС с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС выбран реперный сценарий ТЗА в соответствии с внешним аварийным планом Белорусской АЭС⁵. В качестве реперного сценария ТЗА принята авария с большой течью теплоносителя первого контура с отказом активной части системы аварийного охлаждения зоны и дополнительным наложением полного обесточивания АЭС в первые 24 ч (табл. 1). Данная авария приводит к предельному выбросу.

Для моделирования переноса радионуклидов в атмосфере и прогноза радиоактивных выпадений выбран метеорологический сценарий, характерный для летнего периода на основании анализа данных многолетних наблюдений (с 1999 по 2018 г.), предоставленных Белгидрометом для метеостанции Лынтупы, а ландшафтные условия – характерные для Островецкой площадки (табл. 2).

¹ Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7 ; Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions 2013. Vienna: IAEA, 2015. 145 p.

² Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213.

³ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/56/56325/index.htm> (дата обращения 01.08.2022).

⁴ Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213.

⁵ План защитных мероприятий при радиационной аварии на Белорусской атомной электростанции (внешний аварийный план): утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь 22 марта 2018 г. № 211. URL: <https://energodoc.by/document/view?id=3245> (дата обращения 01.06.2021).

Т а б л и ц а 1. Параметры реперного сценария тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, использованные при расчете аварийного выброса радионуклидов

T a b l e 1. Parameters of the reference scenario of the beyond design basis accident at the Belarusian NPP used in the calculation of the accidental release of radionuclides

Параметр	Значение
Мощность реактора	3200 МВт (полная)
Система охлаждения	Отключена через 3ч
	Включена через 24 ч
Активная зона	Расплавление
Защитная оболочка	Не нарушена
Свободный объем контайнмента	74530 м ³
Негерметичность контайнмента	0,2 % от объема в сутки
	0,1 % от объема в сутки
Байпас контайнмента	1 % от интегральной неплотности контайнмента
Байпас фильтров	1 %
Продолжительность выброса	10 ч
Фракции выброса йода	95 % – аэрозоли;
	4,85 % – молекулярный йод;
	0,15 % – органические соединения
Высота выброса	30 м

Т а б л и ц а 2. Ландшафтно-метеорологические условия, использованные при расчете аварийного выброса радионуклидов при тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС

T a b l e 2. Landscape and meteorological conditions used in the calculation of the accidental release of radionuclides during beyond design basis accident at the Belarusian NPP

Параметр	Значение
Направление ветра, °	110
Скорость ветра, м/с	2
Категория устойчивости атмосферы	D
Высота слоя перемешивания, м	400
Осадки, мм	0
Температура воздуха, °С	+20
Влажность воздуха, %	70
Шероховатость, м	0,1
Высота флюгера, м	10

Выброс радионуклидов в окружающую среду при ТЗА на Белорусской АЭС рассчитан с помощью программного кода InterRas (The International Radiological Assessment System), разработанного МАГАТЭ и предназначенного для использования специалистами, которые выполняют оценку радиологических аварий [2]. Согласно расчетам значение общей активности аварийного выброса составило $2,15 \cdot 10^{15}$ Бк (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Расчетный выброс радионуклидов в атмосферу при тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС

T a b l e 3. Calculated release of radionuclides into the atmosphere during beyond design basis accident at the Belarusian NPP

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

Для раннего этапа аварии проведено моделирование выпадений основных дозообразующих радионуклидов I-131 и Cs-137, сделан расчет ожидаемых эффективных доз облучения для взрослых и эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых и детей.

В основе прогнозирования содержания радионуклидов в воздухе и на поверхности земли на расстоянии до 50 км в обоих программных комплексах лежит Гауссова модель [1], поэтому результаты моделирования сравнивались для диапазона расстояний от 2 км (за пределами границы площадки АЭС) до 50 км.

Результаты. Полученные с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС результаты моделирования выпадений радионуклидов из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения ТЗА на Белорусской АЭС приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Прогноз плотности выпадений I-131 и Cs-137 на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС

Table 4. Prediction of the fallout of I-131 and Cs-137 on the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP

Расстояние от площадки, км	J-RODOS, Бк/м ²		RECASS-ЭКСПРЕСС, Бк/м ²	
	I-131	Cs-137	I-131	Cs-137
3	2,98·10 ⁵	1,11·10 ⁴	7·10 ⁵	1,3·10 ⁵
5	1,50·10 ⁵	6,05·10 ³	4,7·10 ⁵	9,0·10 ⁴
10	1,47·10 ⁴	1,21·10 ³	2,1·10 ⁵	4,1·10 ⁴
15	8,48·10 ³	7,18·10 ²	1,3·10 ⁵	2,5·10 ⁴
20	5,19·10 ³	4,31·10 ²	8,8·10 ⁴	1,7·10 ⁴
25	3,12·10 ³	2,80·10 ²	6,7·10 ⁴	1,3·10 ⁴
30	2,29·10 ³	2,04·10 ²	5,3·10 ⁴	1,0·10 ⁴
35	1,66·10 ³	1,65·10 ²	–	–
40	1,30·10 ³	1,33·10 ²	3,7·10 ⁴	7,4·10 ³
45	1,19·10 ³	1,35·10 ²	–	–
50	1,09·10 ³	1,29·10 ²	2,9·10 ⁴	5,7·10 ³

Согласно расчетным данным максимальные значения плотности выпадения I-131 и Cs-137 на расстоянии 3 км через 1 сут с момента возникновения ТЗА на Белорусской АЭС составят 298 кБк/м² и 11,1 кБк/м² при моделировании с помощью J-RODOS и 700 кБк/м² и 130 кБк/м² – при моделировании RECASS-ЭКСПРЕСС соответственно (см. табл. 4).

Прогнозируемые значения выпадений радионуклидов являются незначительными и не требуют дополнительных защитных мер на этой территории. Например, дезактивационные работы проводить не потребуется, однако обязательно проведение радиационного аварийного мониторинга. Для сравнения: при аварии на Чернобыльской АЭС, суммарная активность выброса радионуклидов при которой оценивается величиной порядка 10¹⁹ Бк, активность выброшенного I-131 составила (1,2–1,7)·10¹⁸ Бк, Cs-137 – 3,7·10¹⁶ Бк [3, табл. 6]. При этом на ближнем следе (до 40 км от места аварии) выпало 5,1 % I-131 (1,3·10⁶ Ки, или 4,81·10¹⁶ Бк) и 1,9 % Cs-137 (2,8·10⁵ Ки, или 1,04·10¹⁶ Бк). Существующие уровни радиоактивного загрязнения территории Гродненской области Cs-137 после аварии на Чернобыльской АЭС находятся в диапазоне от 37 до 185 кБк/м² (плотность загрязнения территории по состоянию на 2015 г.) [4, с. 35–37].

Анализ результатов прогнозирования плотности выпадений I-131 на подстилающую поверхность показал хорошую сходимость расчетных данных, полученных различными программными комплексами в непосредственной близости от источника выброса (3–5 км от источника). Так, на расстоянии свыше 10 км разница в результатах, полученных с помощью RECASS-ЭКСПРЕСС, на 1 порядок величины выше, чем J-RODOS. Для итоговых значений прогнозирования плотности выпадений Cs-137 расхождение в полученных результатах на 1 порядок величины наблюдается на всех расстояниях от источника выброса.

Прогнозируемые значения эквивалентной дозы облучения щитовидной железы взрослых ($E_{inh\text{ вр}}$) и детей ($E_{inh\text{ дети}}$), а также общей эффективной дозы облучения взрослых (E_{total}) за первые 7 сут после аварии, рассчитанные с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС, представлены в табл. 5 и на рис. 5–9.

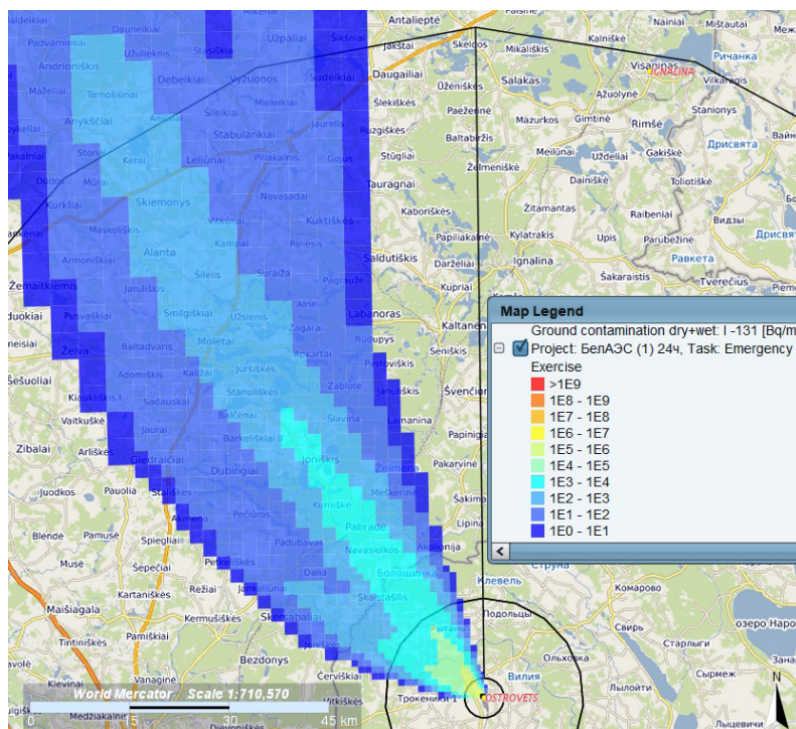


Рис. 1. Прогноз с использованием программного комплекса J-RODOS плотности выпадений I-131 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м²

Fig. 1. Predication using the J-RODOS software package of the fallout of I-131 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m²

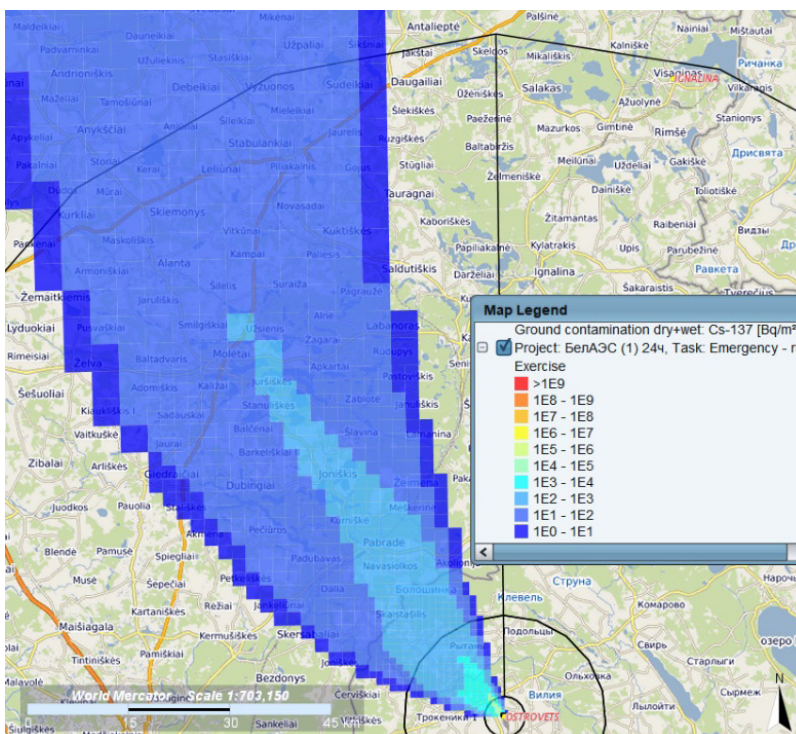


Рис. 2. Прогноз с использованием программного комплекса J-RODOS плотности выпадений Cs-137 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м²

Fig. 2. Predication using the J-RODOS software package of the fallout of Cs-137 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m²

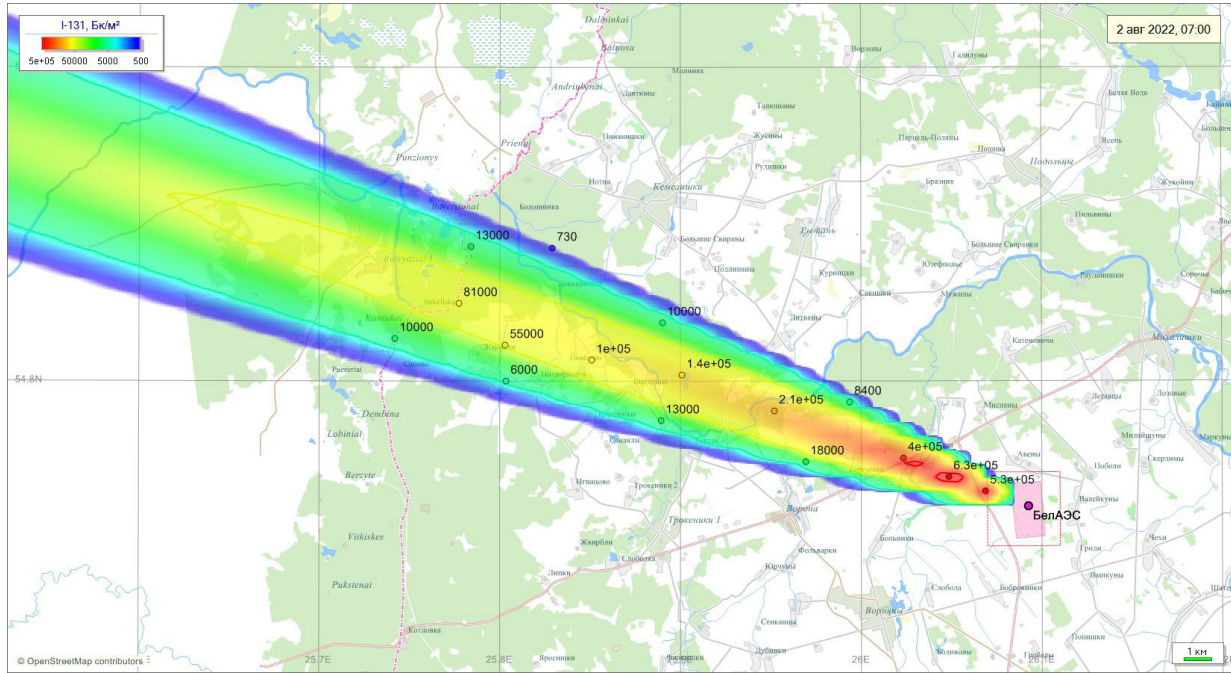


Рис. 3. Прогноз с использованием программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС плотности выпадений I-131 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м²

Fig. 3. Prediction using the RECASS-EXPRESS software package of the fallout of I-131 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m²

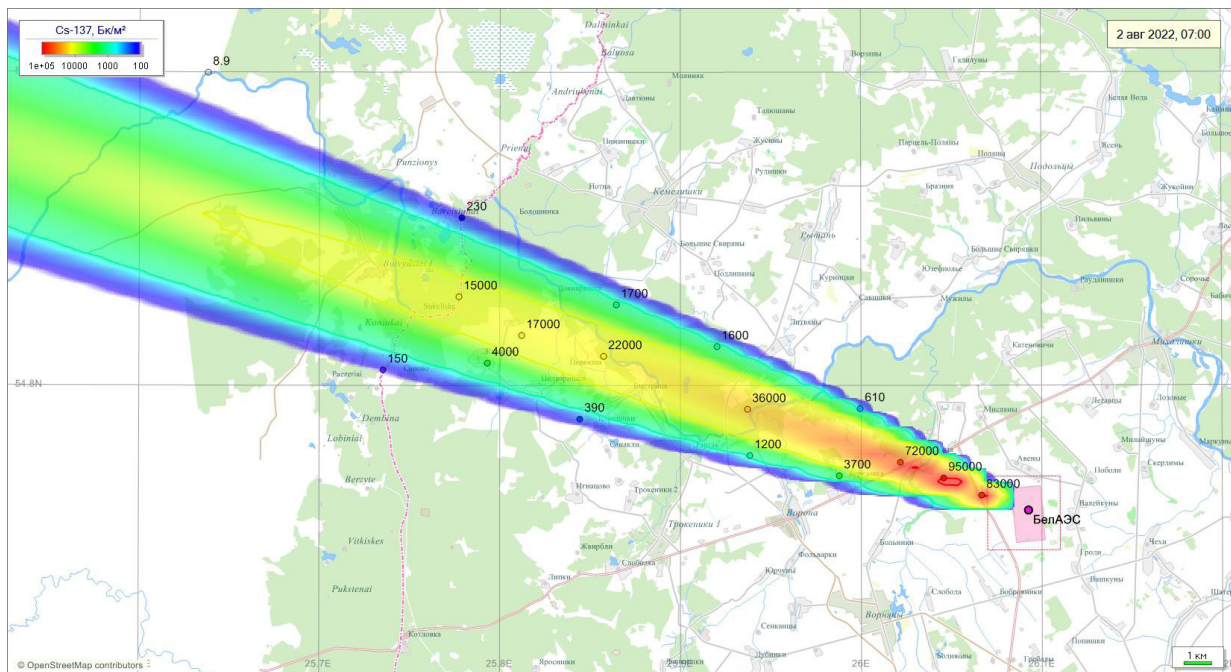


Рис. 4. Прогноз с использованием программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС плотности выпадений Cs-137 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м²

Fig. 4. Prediction using the RECASS-EXPRESS software package of the fallout of Cs-137 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m²

Т а б л и ц а 5. Прогнозируемые значения эквивалентной дозы облучения щитовидной железы и общей эффективной дозы за первые 7 сут после аварии, рассчитанные с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС

Table 5. Predicted values of the equivalent dose to the thyroid gland and total effective dose for the first 7 days after the accident, calculated using the J-RODOS and RECASS-EXPRESS software packages

Расстояние от площадки, км	J-RODOS			RECASS-ЭКСПРЕСС		
	$E_{inh\text{ в\text{зр}}}$	$E_{inh\text{ дети}}$	E_{total}	$E_{inh\text{ в\text{зр}}}$	$E_{inh\text{ дети}}$	E_{total}
3	14,8	32,5	14,8	3,7	8	0,320
5	7,34	16,2	7,34	2,5	5,30	0,210
10	1,1	2,43	1,1	1,1	2,40	0,095
15	0,683	1,5	0,683	0,67	1,40	0,057
20	0,413	0,908	0,413	0,46	0,99	0,040
25	0,252	0,554	0,252	0,35	0,75	0,030
30	0,197	0,433	0,197	0,28	0,60	0,024
40	0,126	0,278	0,157	0,2	0,42	0,017
50	0,120	0,265	0,126	0,15	0,32	0,013

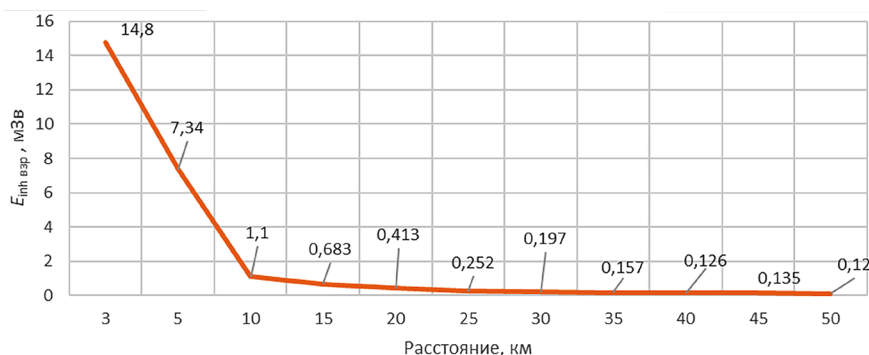


Рис. 5. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса J-RODOS

Fig. 5. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of adults with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the J-RODOS software package

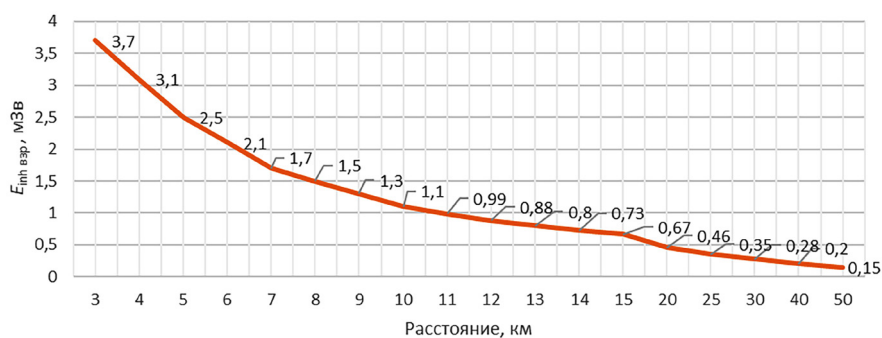


Рис. 6. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС

Fig. 6. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of adults with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the RECASS-EXPRESS software package

В ближней зоне (на расстоянии до 10 км от площадки АЭС) разница значениях эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых и детей, полученных J-RODOS, в 3–4 раза выше, чем RECASS-ЭКСПРЕСС: у взрослых 14,8 мЗв J-RODOS и 3,7 мЗв RECASS-ЭКСПРЕСС на расстоянии 3 км и 7,34 мЗв J-RODOS и 2,5 мЗв RECASS-ЭКСПРЕСС на расстоянии 5 км; у детей 32,5 и 16,2 мЗв J-RODOS и 8 и 5,3 мЗв RECASS-ЭКСПРЕСС соответственно. На расстояниях от 10 до 50 км результаты моделирования различаются незначительно (до 1,5 раза в отдельных точках) (см. рис. 5–8).

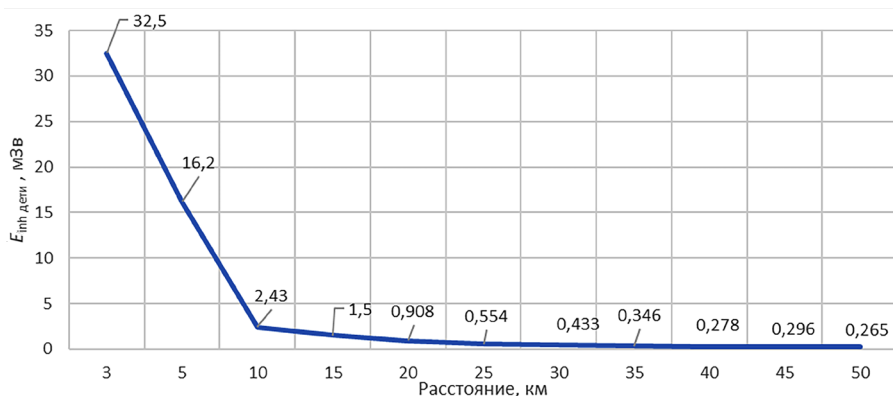


Рис. 7. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы детей с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса J-RODOS

Fig. 7. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of children with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the J-RODOS software package

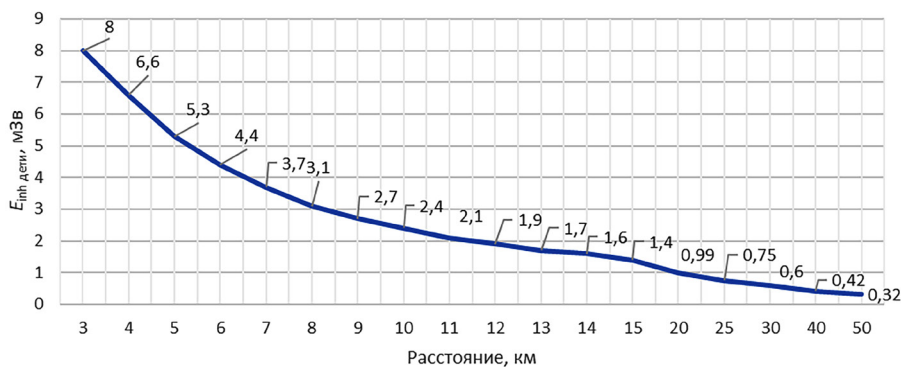


Рис. 8. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы детей с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС

Fig. 8. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of children with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the RECASS-EXPRESS software package

Результаты прогнозирования эквивалентных доз облучения щитовидной железы детей и взрослых ниже установленного критерия аварийного реагирования (50 мЗв за первые 7 сут)¹ и не указывают на необходимость проведения йодного блокирования щитовидной железы у населения².

Уменьшение общей эффективной дозы с расстоянием описывается с высокой степенью достоверности экспоненциальной зависимостью $y = ae^{-bx}$, коэффициент детерминации при этом составляет 0,9794 для J-RODOS и 0,9762 для RECASS-ЭКСПРЕСС.

Максимальное различие в полученных результатах наблюдается в ближней зоне АЭС: полученные значения общей эффективной дозы при моделировании J-RODOS в 2 раза выше, чем у RECASS-ЭКСПРЕСС на расстоянии 3 км от площадки (0,6 и 0,32 мЗв соответственно) и в 1,5 раза выше на расстоянии 5 км от площадки (0,3 и 0,21 мЗв соответственно). С увеличением расстояния от АЭС сходимость в полученных результатах оценки увеличивается, на расстоянии 10–50 км от площадки полученные значения общей эффективной дозы облучения, полученные с помощью RECASS-ЭКСПРЕСС, в 0,3–0,5 выше, чем у J-RODOS, и составляют от 0,01 до 0,1 мЗв (см. рис. 9).

¹ Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213.

² Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7 ; Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions 2013.

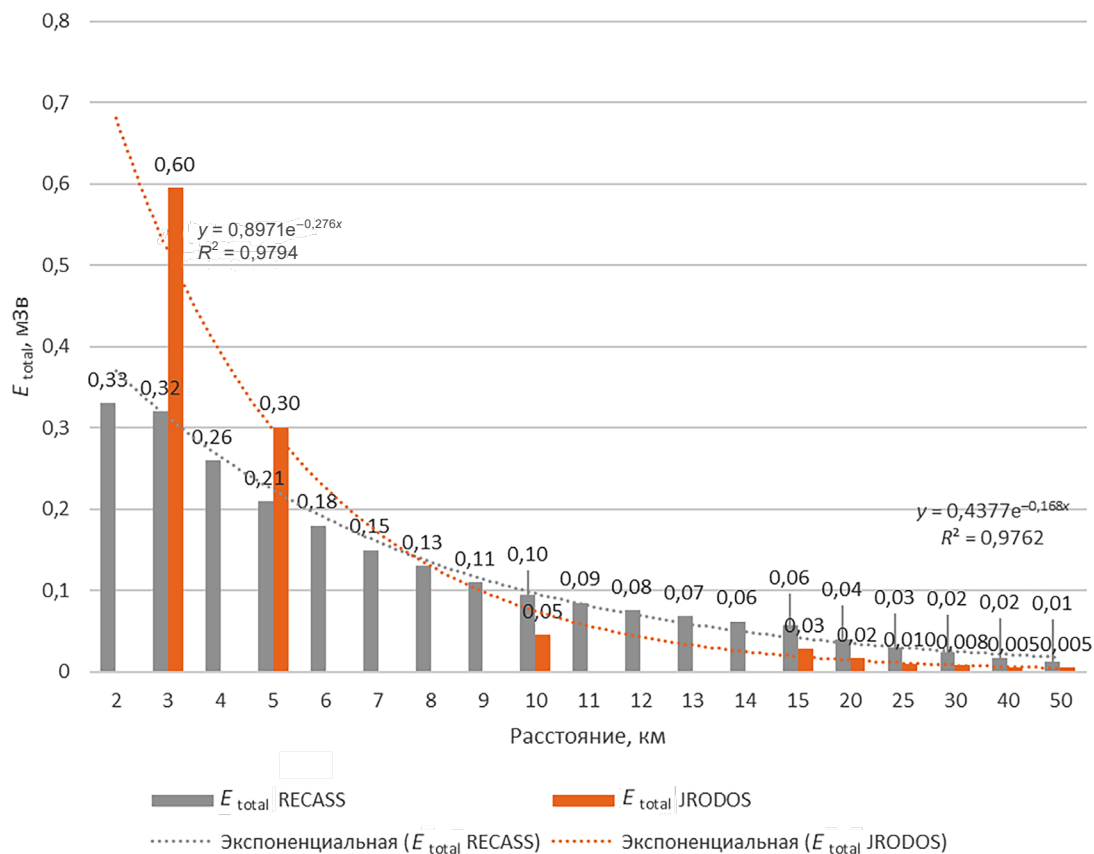


Рис. 9. Изменение общей эффективной дозы облучения взрослых с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС

Fig. 9. Change in the total effective dose to adults with distance from the NPP site according to the results of modeling using the J-RODOS and RECASS-EXPRESS software packages

Результаты прогнозирования общей эффективной дозы облучения населения ниже установленных международных и национальных критериев аварийного реагирования для проведения укрытия, эвакуации, дезактивации, ограничения потребления пищевых продуктов, молока и питьевой воды, контроля радиоактивного загрязнения – 100 мЗв за первые 7 сут¹.

Заключение. При моделировании радиологических и радиационно-экологических последствий ТЗА на Белорусской АЭС с общим выбросом радионуклидов в окружающую среду $2,15 \cdot 10^{15}$ Бк (в том числе $3,60 \cdot 10^{13}$ Бк I-131 и $6,90 \cdot 10^{12}$ Бк Cs-137) с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС выявлены следующие различия в полученных результатах:

разница в значении плотности выпадений радионуклидов I-131 и Cs-137 составляет 1 порядок величины, значения плотности выпадений I-131 совпадают лишь на расстоянии 3–5 км от источника от источника выброса;

разница в значении прогнозируемых значений эквивалентной дозы облучения щитовидной железы как детского, так и взрослого населения, полученных J-RODOS, в 3–4 раза выше, чем RECASS-ЭКСПРЕСС, на расстоянии 3–5 км от площадки; на расстоянии 10 км от площадки и более результаты, полученные обоими программными комплексами, практически равны;

полученные значения общей эффективной дозы при моделировании J-RODOS в 2 раза выше, чем у RECASS-ЭКСПРЕСС, на расстоянии 3 км от площадки и в 1,5 раза выше на расстоянии 5 км от площадки; с увеличением расстояния от АЭС сходимость в полученных результатах оценки увеличивается;

¹ Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7 ; Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213 ; Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions 2013.

ни один из полученных результатов прогнозирования не превышает установленных критериев аварийного реагирования и не указывает на необходимость проведения защитных мероприятий для населения.

Таким образом, RECASS-ЭКСПРЕСС завышает результаты прогнозирования плотности выпадений радионуклидов относительно J-RODOS, при этом различие в полученных дозах облучения невелико (при моделировании J-RODOS значения доз облучения выше вблизи от источника выброса).

J-RODOS имеет бóльшие относительно RECASS-ЭКСПРЕСС расчетные возможности (оценка последствий аварии на расстояния свыше 50 м от источника выброса, расчет содержания радионуклидов в продуктах питания и доз облучения от потребления пищевых продуктов, учет контрмер и доз облучения с применением контрмер и др.), однако из-за необходимости в привязке к данным онлайн период прогнозирования может быть существенно длиннее. Кроме того, прогнозирование на более дальние расстояния закономерно повышает неопределенность полученных результатов.

Различия в результатах моделирования последствий ТЗА на Белорусской АЭС могут объясняться различием в применяемых допущениях при проведении моделирования, заложенных в методы расчета значений концентрации радионуклидов в окружающей среде, а также в используемых коэффициентах при расчете доз облучения населения.

Основанные на моделях программные комплексы (J-RODOS, RECASS-ЭКСПРЕСС и др.) не должны применяться в качестве основы для определения начальных защитных и других мер реагирования во время аварийной ситуации. Тем не менее данные программные комплексы могут быть использованы специалистами, осуществляющими прогноз радиационной обстановки и оценку доз облучения населения на этапе готовности к реагированию на радиационную аварию на АЭС путем моделирования возможных аварийных сценариев для определения необходимости проведения мероприятий по защите населения, а также их масштабов (определение радиусов зон аварийного реагирования).

Модели и выполненные с их помощью прогнозы представляют интерес для установления областей в пределах зоны предупредительных мер или зоны планирования срочных защитных мер, которые должны быть эвакуированы в первую очередь, если эвакуация населения не может осуществляться одновременно во всех направлениях. Кроме того, при аварии на АЭС прогноз распространения выброса может быть полезным для определения приоритетных направлений работы групп мониторинга и для отбора проб.

Список использованных источников

1. Turner, B. D. *Workbook on Atmospheric Dispersion Estimates* / B. D. Turner; U.S. Environmental Protection Agency. – North Carolina, 1970. – 84 p.
2. INTERRAS 1.2 : учеб. пособие. – Вена: МАГАТЭ, 2000. – 105 с.
3. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / редкол.: Ю. А. Израэль (предс., РФ), И. М. Богдевич (предс., Респ. Беларусь) [и др.]. – М. : Минск, 2009. – 140 с.
4. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю. А. Израэль [и др.]; под ред. Ю. А. Израэля. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 296 с.

References

1. Turner B. D. *Workbook on Atmospheric Dispersion Estimates*. North Carolina, U.S. EPA, 1970. 84 p.
2. *NTERRAS 1.2: tutorial*. Vienna, IAEA, 2000. 105 p.
3. Izrael' Yu., A., Bogdevich I. M. et al., eds. *Atlas of Modern and Predictive Aspects of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant in the Affected Territories of Russia and Belarus (AMPA Russia–Belarus)*. Moscow, Minsk, 2009. 140 p. (in Russian).
4. Izrael' Yu. A., Vakulovskiy S. M., Vetrov V. A., Petrov V. N., Rovinskiy F. Ya., Stukin E. D.; Izrael' Yu. A., ed. *Chernobyl: Radioactive Contamination of Natural Environments*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 296 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кляус Виктория Вячеславовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены» (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vkliaus@gmail.com

Жукова Ольга Митрофановна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены» (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga.zhukova.47@inbox.ru

Николаенко Елена Владимировна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационной безопасности, Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены» (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikolaenko67@gmail.com

Шайбак Алла Михайловна – начальник отдела оперативных данных радиационного контроля и мониторинга чрезвычайных ситуаций, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (пр. Независимости, 110, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sham@hmc.by

Трусов Александр Владимирович – начальник службы радиационного мониторинга, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (пр. Независимости, 110, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tav@hmc.by

Information about the authors

Viktoryia V. Kliaus – Ph. D. (Biology), Leading Researcher of the Radiation Safety Laboratory, Republican Unitary Enterprise “Scientific Practical Centre of Hygiene” (8, Akademicheskaya Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vkliaus@gmail.com

Olga M. Zhukova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher of the Radiation Safety Laboratory, Republican Unitary Enterprise “Scientific Practical Centre of Hygiene” (8, Akademicheskaya Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga.zhukova.47@inbox.ru

Alena U. Nikalayenka – Ph. D. (Medicine), Head of the Radiation Safety Laboratory, Republican Unitary Enterprise “Scientific Practical Centre of Hygiene” (8, Akademicheskaya Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolaenko67@gmail.com

Alla M. Shaibak – Head of the Department of Operational Data of Radiation Control and Monitoring of Emergencies, Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sham@hmc.by

Aliaksandr V. Trusau – Head of the Radiation Monitoring Service, Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tav@hmc.by