

УДК 621.039.5:614.87

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

Ю. Е. КРЮК<sup>1)</sup>, А. Л. МОСТОВЕНКО<sup>1)</sup>, Е. К. НИЛОВА<sup>1)</sup>, В. А. КУЗЬМИНЧУК<sup>1)</sup>, К. Ю. ВОЙТЕНКО<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Центр по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ул. Шпилевского, 59-7Н, 220067, г. Минск, Беларусь

Проведен сравнительный анализ программных средств для оценки и прогнозирования параметров, характеризующих радиационную обстановку, при возникновении гипотетической аварийной ситуации на объектах использования атомной энергии. Для выполнения анализа выходных параметров и ранжирования программных средств по степени заложенного в них консерватизма выбран сценарий аварийной ситуации на объекте проекта АЭС-2006, связанный со снижением температуры теплоносителя и, как следствие, изменением реактивности. Рассматривалось возникновение спектра разрывов паропроводов внутри и вне контайнмента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубки в парогенераторе, в результате которого происходят потеря теплоносителя первого контура, длительное истечение пара из аварийного парогенератора и выброс с паром радиоактивных продуктов, накопившихся в первом контуре, в машинный зал и окружающую среду. Представлены результаты ранжирования программных средств для применения в деятельности информационно-аналитического центра Департамента по ядерной и радиационной безопасности. Установлено, что в расчетные коды оперативной оценки (HotSpot и RECASS Express) заложена наибольшая степень консерватизма. Данные инструментарии позволяют обеспечивать быстрые упрощенные расчеты для ранней стадии аварии на радиационно-опасном объекте и могут быть рекомендованы к использованию при оценке и прогнозировании радиационной обстановки в качестве первых инструментариев. При этом статус проведенной оценки радиационной ситуации рекомендуется считать предварительным, дополнительным к основным расчетам, выполненным, к примеру, расчетными кодами JRODOS и RECASS NT, технические возможности которых позволяют выполнять оценку радиационного воздействия, в том числе на значительных расстояниях от источника как в случае возникновения аварийных ситуаций, так и в рамках проведения командно-штабных учений.

**Ключевые слова:** программные средства; аварийные ситуации; радиационная обстановка; объемная активность; плотность загрязнения.

### Образец цитирования:

Крюк ЮЕ, Мостовенко АЛ, Нилова ЕК, Кузьминчук ВА, Войтенко КЮ. Сравнительный анализ программных средств для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:55–60. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-55-60>

### For citation:

Kruk YuE, Mostovenko AL, Nilova EC, Kuzminchuk VA, Voitenko KYu. Comparative analysis of softwares for assessment and prediction of radiation situation indicators. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:55–60. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-55-60>

### Авторы:

**Юлианна Евгеньевна Крюк** – кандидат биологических наук, доцент; директор Центра по ядерной и радиационной безопасности.

**Андрей Леонидович Мостовенко** – заместитель директора Центра по ядерной и радиационной безопасности.

**Екатерина Константиновна Нилова** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела радиационной безопасности.

**Виктор Анатольевич Кузьминчук** – младший научный сотрудник отдела радиационной безопасности.

**Кирилл Юрьевич Войтенко** – ведущий инженер отдела радиационной безопасности.

### Authors:

**Yulianna E. Kruk**, PhD (biology), docent; director of the center for nuclear and radiation safety.

[kruk@bcnrs.by](mailto:kruk@bcnrs.by)

**Andrey L. Mostovenko**, deputy director of the center for nuclear and radiation safety.

[mostovenko@bcnrs.by](mailto:mostovenko@bcnrs.by)

**Ekaterina C. Nilova**, PhD (biology), senior researcher at the department of radiation safety department.

[nilova@bcnrs.by](mailto:nilova@bcnrs.by)

**Viktor A. Kuzminchuk**, junior researcher at the department of radiation safety.

[kuzminchuk@bcnrs.by](mailto:kuzminchuk@bcnrs.by)

**Kirill Yu. Voitenko**, leading engineer at the department of radiation safety.

[aitsenka@bcnrs.by](mailto:aitsenka@bcnrs.by)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARES FOR ASSESSMENT AND PREDICTION OF RADIATION SITUATION INDICATORS

*Yu. E. KRUK<sup>a</sup>, A. L. MOSTOVENKO<sup>a</sup>, E. C. NILOVA<sup>a</sup>, V. A. KUZMINCHUK<sup>a</sup>, K. Yu. VOITENKO<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus  
59/7N Shpileŭskaga Street, Minsk 220067, Belarus*

*Corresponding author: E. C. Nilova (nilova@bcnrs.by)*

This article presents the results of comparative analysis of software tools for assessing and predicting parameters characterizing the radiation situation in the event of a hypothetical emergency at nuclear facilities. To analyze the output parameters and rank the software according to the degree of conservatism, an emergency scenario at the AES-2006 design facility was selected. This scenario is associated with a decrease in the coolant temperature and, as a consequence, a change in reactivity. The results of ranking software tools for use in the activities of the Information and Analytical Center of the Department of Nuclear and Radiation Safety are presented. It has been established that the highest degree of conservatism is embedded in the operational assessment codes (HotSpot and RECASS Express). These tools make it possible to provide quick simplified calculations for the early stage of an accident at a Nuclear Facility and can be recommended for use in assessing and predicting the radiation situation as the first tools. In this case, the status of the assessment of the radiation situation is recommended to be considered preliminary, additional to the main calculations performed, for example, with the JRODOS and RECASS NT design codes, the technical capabilities of which allow assessing the radiation impact, including at significant distances from the source, as in the case of emergency situations, and within the framework of the command and staff exercises.

**Keywords:** software tools; emergency situations; radiation situation; beyond design basis accidents; volumetric activity; pollution density.

### Введение

В настоящее время во многих странах сформированы национальные системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, обеспечивающие как аварийную готовность и аварийное реагирование в случае ядерных и радиационных аварий, так и контроль состояния объектов использования атомной энергии, а также информационно-аналитическую поддержку в случае возникновения аварийных ситуаций. Характер и масштабы аварийных процедур для обеспечения готовности и реагирования должны соответствовать потенциальной величине выбросов радиоактивных веществ и характеру угрозы. Оценка угрозы должна проводиться таким образом, чтобы обеспечивались основные детальные требования к мерам по обеспечению готовности и реагирования. При оценке угрозы должны быть определены территории за пределами площадки, для которых ядерная или радиационная аварийная ситуация может требовать инициирования и корректировки срочных защитных и других мер в пределах зон аварийного реагирования в соответствии со стратегией защиты.

Важной составной частью функционирования таких систем является применение систем поддержки принятия решений в случае чрезвычайных ситуаций на радиационно опасных объектах. Они призваны обеспечивать как анализ, складывающейся в результате аварии радиационной обстановки, и прогноз ее развития, так и выработку рекомендаций по защите персонала объектов использования атомной энергии, населения, подвергшегося воздействию радиоактивного выброса и снижению возможных последствий для окружающей среды.

Прогноз масштабов последствий потенциальных аварий должен учитывать метеорологические, почвенно-климатические, демографические, экономические и иные особенности зон аварийного реагирования.

В этой связи представляется целесообразным провести ранжирование отдельных программных средств для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки при возникновении аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии по степени заложенного в них консерватизма для применения в деятельности информационно-аналитического центра Департамента по ядерной и радиационной безопасности.

Цель исследований – выполнить сравнительный анализ выходных параметров и ранжирование по степени консерватизма программных средств для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки при возникновении аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии.

### Материалы и методы исследования

В качестве инструментариев для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки при возникновении гипотетических аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии

и реализации соответствующих задач в рамках деятельности информационно-аналитического центра Госатомнадзора определен перечень пакетов следующих программных средств: JRODOS (ЕС), RECASS NT, Express (Российская Федерация) и HotSpot (США).

Программно-технический комплекс RECASS (NT) разработан Федеральным информационно-техническим центром Росгидромета (далее – ФИАЦ Росгидромета) для оценки обстановки и прогноза последствий поступления (в результате выбросов, сбросов, разливов, взрывов и пожаров) загрязняющих веществ в окружающую среду, а также поддержки принятия решений в условиях загрязнения природной среды, в том числе при радиационных авариях [1]. RECASS NT внедрена и много лет успешно используется в ФИАЦ Росгидромета, на российских АЭС – Ленинградской, Волгодонской, Нововоронежской, Кольской, Белоярской, Билибинской, Смоленской, Калининской и Курской. В составе системы RECASS был разработан программный инструмент EXPRESS для предварительных расчетов загрязнения воздуха и доз облучения населения при аварийных атмосферных выбросах радиоактивности [1].

Код «HotSpot» был разработан Lawrence Livermore Laboratory (США) при моделировании распространения радиоактивных веществ в атмосфере. Для целей аварийного реагирования код позволяет предоставлять первичные расчеты, необходимые для быстрой оценки текущей радиационной обстановки для 4-х моделируемых случаев аварийного выброса: взрыв, пожар, шлейф и ресуспензия.

Система RODOS (ЕС) представляет собой синтез ряда инновационных методов и технологий для проведения оценки и прогнозирования радиационной обстановки, а также выработки защитных мероприятий с целью снижения последствий радиационной аварии. Модули прогнозирования позволяют выполнять прогноз загрязнения атмосферы и водных объектов как в локальном масштабе (до 100 км), так и до нескольких тысяч километров, осуществлять оценку доз облучения с применением контрмер как с ними, так и без них. Заложенные функции и инструменты позволяют адаптировать модели, базы данных и пользовательский интерфейс к национальным условиям и предпочтениям пользователя.

В инструментариях, предназначенных для оперативной оценки, позволяющих проводить упрощенные расчеты для ранней стадии аварии и наглядное представление результатов расчетов (RECASS Express и HotSpot), в основу расчетов концентраций радионуклидов в приземном слое атмосферы положена Гауссова модель переноса поллютантов от мгновенного точечного источника. В модулях JRODOS оценка переноса и осаждения радионуклидов производится также с помощью модели переноса частиц Лагранжа [2]. Гауссова же модель переноса применима для расчетов концентраций радионуклидов в силу выполнения следующих условий:

- радиоактивные примеси представляют собой газы или паро-газовые смеси с плотностью, не превышающей плотность воздуха, либо аэрозоли с размерами частиц до 10 мкм;
- до момента рассеяния облака радиоактивных примесей метеоусловия предполагаются неизменными;
- применяются эмпирические зависимости для дисперсий с учетом условий данной пересеченной местности;

- расстояния от источника рассматриваются в интервале от 100 м до 10 км [3; 4].

Таким образом, модель атмосферной дисперсии Гаусса является одной из наиболее распространенных и широко применяемых из них для оценки приземных концентраций загрязнителя, поступающего из источника загрязнения [5].

Расчет параметров, характеризующих радиационную обстановку, проводился в соответствии с заложенными в программных кодах подходами.

Для проведения сравнительного анализа выходных параметров и ранжирования указанных программных средств по степени заложенного консерватизма в рамках выполнения работы<sup>1</sup> выбран сценарий аварийной ситуации на объекте проекта АЭС-2006, связанный со снижением температуры теплоносителя и, как следствие, изменением реактивности.

В качестве аварийного сценария рассматривалось возникновение спектра разрывов паропроводов внутри и вне контайнмента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубы в парогенераторе, в результате которого происходят потеря теплоносителя первого контура, длительное истечение пара из аварийного парогенератора и выброс с паром радиоактивных продуктов, накопившихся в первом контуре, в машинный зал и окружающую среду. Согласно рассматриваемому сценарию, выброс продуктов деления в атмосферу происходит через быстродействующую редуцирующую установку сброса пара неаварийного парогенератора при разрыве паропровода внутри контайнмента с разрывом одной трубы в парогенераторе (на отметке 32 м) и из аварийного парогенератора при разрыве паропровода вне контайнмента с разрывом одной трубы в парогенераторе (высота выброса – 10 м). Активность радионуклидов в выбросе (без учета инертных радиоактивных газов и  $^{132-135}\text{I}$ ):  $^{131}\text{I} - 8,60 \cdot 10^{11}$  Бк,  $^{134}\text{Cs} - 5,22 \cdot 10^9$  Бк,  $^{137}\text{Cs} - 7,81 \cdot 10^9$  Бк.

<sup>1</sup>ГР 20201416. Выполнить моделирование процессов смешения теплоносителя в первом контуре и сравнительный анализ показателей радиационной обстановки в аварийных ситуациях. Минск: [б. н.]; 2020. 197 с.



Принимался атмосферный путь переноса радионуклидов как один из наиболее значимых путей распространения радионуклидов в случае возникновения аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии [5]. Направление ветра выбрано с учетом формирования загрязнения на территории Республики Беларусь (в восточном направлении). Распространение радиоактивных выбросов находится в прямой зависимости от высоты их подъема, обусловленной разностью температур в источнике и окружающей среде. Для проведения расчетов принято одно из наихудших метеорологических условий, свойственных району размещения Белорусской АЭС: скорость ветра 5 м/с; категория устойчивости атмосферы по Пасквиллу –  $F^2$ , продолжительность однофазного выброса – 1 ч.

### Результаты исследования и их обсуждение

В качестве выходных параметров, характеризующих радиационную обстановку в результате возникновения гипотетической аварийной ситуации, выбраны интегральная суммарная объемная активность радионуклидов в воздухе,  $\text{Бк} \cdot \text{с}/\text{м}^3$  и плотность поверхностного загрязнения через 2 ч,  $\text{Бк}/\text{м}^2$ .

Примеры представления результатов расчетов плотности поверхностного загрязнения  $^{131}\text{I}$  через 2 ч после выброса с применением расчетных кодов JRODOS и RECASS NT на картографической основе в виде тематического слоя приведены на рис. 1, 2.

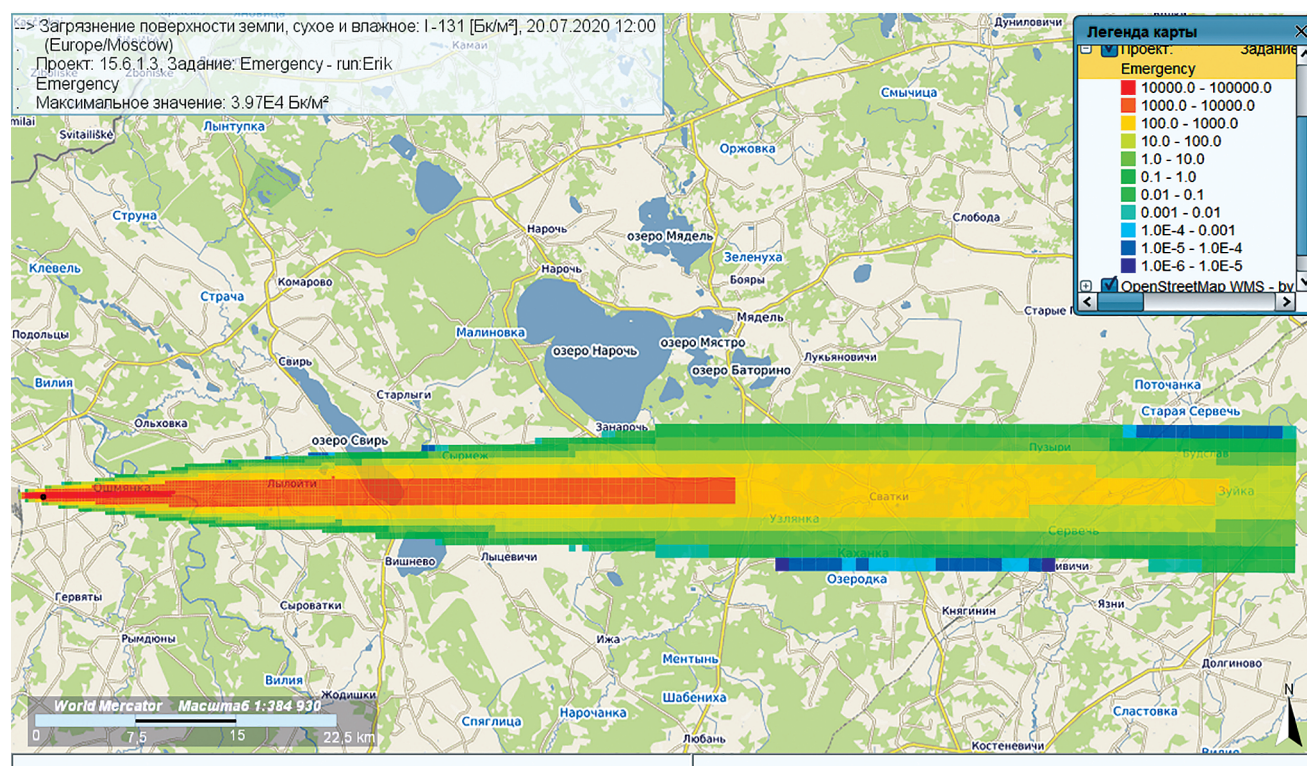


Рис. 1. Результаты оценки плотности поверхностного загрязнения  $^{131}\text{I}$  через 2 ч после выброса с применением кода JRODOS,  $\text{Бк}/\text{м}^2$

Fig. 1. The results of assessing the density of surface contamination with  $^{131}\text{I}$  (2 hours after the release) using the JRODOS code,  $\text{Bq}/\text{m}^2$

В табл. представлен сравнительный анализ результатов расчетов радиационных последствий аварийной ситуации, связанной с возникновением спектра разрывов паропроводов внутри и вне контейнента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубки в парогенераторе, выполненных с применением JRODOS, RECASS NT и Express, а также HotSpot.

Принимая во внимание представленные в табл. значения параметров, характеризующие радиационное воздействие при возникновении рассмотренного события, расчетные коды по степени заложенного в них консерватизма можно ранжировать в следующий логический ряд по убыванию значений приведенных характеристик (начиная с программных инструментов, предназначенных для оперативных предварительных расчетов загрязнения воздуха, поверхности и доз облучения): HotSpot → RECASS

<sup>2</sup>1588-ПЗ-ОИ4. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Книга 11: Оценка воздействия на окружающую среду. Часть 9. Заявление о возможном воздействии на окружающую среду АЭС. Минск: [б. н.]; 2009. 131 с.



Express → JRODOS → RECASS NT. Различие в значениях, приведенных в таблице величин, характеризующих радиационную обстановку, ожидаемую в случае возникновения гипотетической аварийной ситуации, рассчитанных с применением рассматриваемых расчетных кодов, обусловлено как отличиями в заложенных в программных средствах моделях для оценки рассеяния радиоактивной примеси, так и неравенством значений параметров, используемых в расчетах искомых характеристик с применением различных инструментариев.

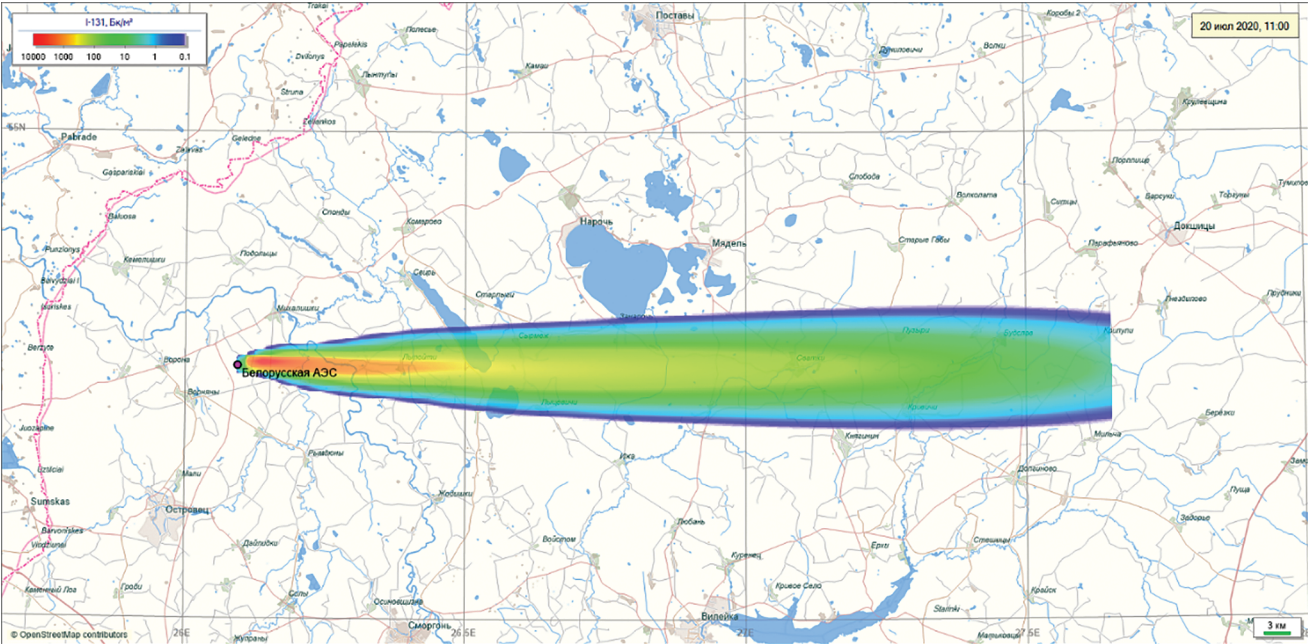


Рис. 2. Результаты оценки плотности поверхностного загрязнения <sup>131</sup>I через 2 ч после выброса с применением кода RECASS NT, Бк/м<sup>2</sup>

Fig. 2. The results of assessing the density of surface contamination with <sup>131</sup>I (2 hours after the release) using the RECASS NT code, Bq/m<sup>2</sup>

Таблица

Сравнительный анализ результатов расчетов радиационных последствий возникновения аварийной ситуации, выполненных с применением JRODOS, RECASS NT, Express и HotSpot

Table

Comparative analysis of the results of calculations of the radiation consequences of an emergency, performed using JRODOS, RECASS NT, Express and HotSpot

Расчетный код	Расстояние по оси следа от АЭС, где ожидаются максимальные значения параметров, км	Интегральная суммарная объемная активность радионуклидов в воздухе, Бк·с/м <sup>3</sup>	Плотность поверхностного загрязнения через 2 ч после выброса, Бк/м <sup>2</sup>		
			<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>131</sup> I
JRODOS	1–3	1,3·10 <sup>9</sup>	2,6·10 <sup>2</sup>	3,8·10 <sup>2</sup>	4,0·10 <sup>4</sup>
RECASS NT	1–2	1,2·10 <sup>9</sup>	1,0·10 <sup>2</sup>	1,3·10 <sup>2</sup>	1,4·10 <sup>4</sup>
RECASS Express	1	4,8·10 <sup>10</sup>	3,9·10 <sup>3</sup>	5,8·10 <sup>3</sup>	8,1·10 <sup>5</sup>
HotSpot	0,2–0,4	1,2·10 <sup>11</sup>	1,9·10 <sup>6</sup>		

Заключение

В результате сравнительного анализа выходных параметров программных средств при выполнении оценки радиационных последствий в случае возникновения спектра разрывов паропроводов внутри и вне контейнмента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубки

в парогенераторе установлено, что в расчетные коды оперативной оценки (HotSpot и RECASS Express) заложена наибольшая степень консерватизма. При этом данные инструментарии позволяют обеспечивать быстрые упрощенные расчеты для устранения ранней стадии аварии на радиационно-опасном объекте и наглядное представление результатов расчетов. В этой связи они являются удобными программными продуктами для проведения обучения и тренировок экспертов по анализу ситуаций при гипотетических аварийных выбросах радиоактивных веществ и могут быть рекомендованы к использованию в целях оперативного исполнения функций информационно-аналитического центра Госатомнадзора по оценке и прогнозированию радиационной обстановки в качестве первых инструментариев.

Однако заложенные в данных инструментариях подходы накладывают временные и пространственные ограничения ввиду существенного увеличения погрешности прогноза по мере отдаления от источника на расстояние свыше 10 км и при времени моделирования свыше нескольких часов. В этой связи статус проведенной оценки радиационной обстановки рекомендуется считать предварительным, дополнительным к основным расчетам, выполненным, к примеру, расчетными кодами JRODOS и RECASS NT, технические возможности которых позволяют выполнять оценку радиационного воздействия, в том числе на значительных расстояниях от источника как в случае возникновения аварийных ситуаций, так и в рамках проведения командно-штабных учений. Он может применяться также в качестве многофункциональных систем выработки адекватных к частным условиям с учетом ряда количественных и качественных критериев стратегических направлений проведения контрмер для ликвидации/минимизации возможных последствий аварий для использования лицами, принимающими решение.

### Библиографические ссылки

1. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Научно-производственное объединение «Тайфун» [Интернет]. [Прочитано 8 июня 2020]; 2020. Доступно по: <http://www.rpatyphoon.ru/products/software-hardware/recass.php>.
2. Franc VD, et al. Atmospheric Transport Modeling with 3D Lagrangian Dispersion Codes Compared with SF6 Tracer Experiments at Regional Scale. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2007;3;1–13.
3. Колодкин ВМ, Мурин АВ, Петров АК и др. *Количественная оценка риска химических аварий*. Ижевск: Удмуртский университет; 2001. 228 с.
4. Greenberg HR, et al. Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry. New York: Van Nostrand Reinhold Co; 1991. 315 p.
5. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety reports series N 19. Vienna: IAEA; 2001. 229 p.

### References

1. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Research and Production Association «Typhoon» [Интернет]. [Cited 2020 June 8]; 2020. Available from: <http://www.rpatyphoon.ru/products/software-hardware/recass.php>.
2. Franc VD, et al. Atmospheric Transport Modeling with 3D Lagrangian Dispersion Codes Compared with SF6 Tracer Experiments at Regional Scale. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2007;3;1–13.
3. Kolodkin VM, Murin AV, Petrov AK, et al. *Kolichestvennaya otsenka riska himicheskikh avarii* [Quantitative assessment of the risk of chemical accidents]. Izhevsk: Udmurt University; 2001. 228 p. Russian.
4. Greenberg HR, et al. Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry. New York: Van Nostrand Reinhold Co; 1991. 315 p.
5. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety reports series N 19. Vienna: IAEA; 2001. 229 p.

Статья поступила в редакцию 01.02.2021.  
Received by editorial board 01.02.2021.