

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-89-95>

УДК 004.42: 621.311.25: 614.876

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ

М. К. Муккушева¹, С. И. Спиридонов², Р. А. Микаилова², А. В. Топорова^{3*}

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

² НИЦ «Курчатовский институт» ВНИИРАЭ, Москва, Россия

³ Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

*E-mail для контактов: toporova@nnc.kz

В статье приведен обзор и сравнение программных средств для прогнозирования радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации и в случае аварийной ситуации на АЭС. Рассмотрены основные характеристики, функциональные особенности, преимущества и недостатки программных пакетов RESRAD, CROM, PC-CREAM 08®, ESTE Annual Impacts, POM, ESTE, НОСТРАДАМУС, RECASS, RODOS. Выделены критерии оценки качества и эффективности программных средств. Обоснован оптимальный расчетный инструментарий, применимый для условий штатной работы АЭС (пакет CROM) и для аварийных ситуаций (система RODOS).

Ключевые слова: программное обеспечение, АЭС, нормальная эксплуатация, аварийная ситуация, годовая эффективная доза, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование и оценка фактического и потенциального радиационного воздействия атомных электростанций (АЭС) на население представляют собой важный аспект обеспечения безопасности и устойчивости ядерной энергетики. Программные средства, предназначенные для прогнозирования радиационных последствий в нормальных условиях эксплуатации АЭС и в случае аварийных ситуаций, играют ключевую роль в данном контексте. Эти инструменты позволяют оценить возможные риски для здоровья человека и состояния окружающей среды, обеспечивают прозрачность в информационном обмене и способствуют разработке эффективных стратегий безопасности.

В данной статье предлагается рассмотреть программные обеспечения для прогнозирования радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации и в случае аварийной ситуации на АЭС.

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

К настоящему времени разработан ряд программных средств, предназначенных для оценки дозовых нагрузок на население при нормальной эксплуатации объектов ядерной энергетики. К ним относятся: RESRAD [1], CROM [2], PC-CREAM 08® [3], ESTE Annual Impacts [4], POM [5]. Также создан ряд программных пакетов для прогнозирования дозовых нагрузок на население в случае аварийных ситуаций на объектах ядерной энергетики: ESTE [6], НОСТРАДАМУС (в поздних версиях – POM) [5, 7], RECASS [8], JRODOS [9].

Программные средства имеют отличия по своим возможностям, точности и доступности, поэтому не-

обходимо определить наиболее подходящие и эффективные инструменты для прогнозирования радиационного воздействия и поддержки принятия решений в случае ядерной или радиационной аварии, а также для планирования и оптимизации реабилитационных мероприятий на загрязненных территориях.

В таблице 1 представлена информация о пяти программных средствах для оценки радиационного воздействия на население при штатной эксплуатации АЭС. Выполнен сравнительный анализ расчетных инструментов по их назначению, исходным данным, используемым моделям, функциональным особенностям, поддерживаемым платформам, техническим характеристикам и типу лицензий.

Назначение и основные функциональные возможности всех программных средств для радиоэкологической оценки штатных выбросов АЭС в основном совпадают, но, при этом, имеются и различия. Так, RESRAD в качестве исходных данных использует характеристики загрязнения почвы, позволяя оценить распространение радиоактивных веществ из почвы в другие компоненты окружающей среды и по пищевым цепочкам. POM позволяет оценить дозовые нагрузки на население только от выбросов в атмосферу, в то время как CROM, PC-CREAM 08 и ESTE Annual Impacts позволяют рассчитать дозы также и от сбросов в водные объекты. ESTE Annual Impacts и POM характеризуются более сложными моделями распространения примесей в атмосфере и имеют ГИС-модули для графического представления полученных результатов, поэтому указанным программам требуется большой объем дискового пространства и оперативной памяти.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ

Таблица 1. Характеристики программных средств для оценки радиационного воздействия на население при штатной эксплуатации АЭС

Программное средство	RESRAD	CROM	PC-CREAM 08	ESTE Annual Impacts	POM
Назначение	- оценка дозы облучения репрезентативного человека - оценка риска онкологических заболеваний	- оценка дозы облучения разных возрастных групп населения - оценка доз на биоту	- оценка индивидуальных доз облучения для 3-х возрастных групп населения - оценка коллективных доз	- оценка дозы облучения разных возрастных групп населения - оценка доз на биоту	- оценка дозы облучения разных возрастных групп населения для штатных и аварийных выбросов - оценка мощностей доз и интегральных доз облучения населения на отдельные органы
Исходные данные	- параметры загрязненной территории (направление, площадь загрязнения, координаты с-х территорий, домов, водных объектов) - концентрации радионуклидов в почве - коэффициенты распределения радионуклидов в компонентах окружающей среды - коэффициенты перехода радионуклидов в продукты растительного и животного происхождения, а также в рыбу и ракообразных	- характеристика источника выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты (размеры источника, активности радионуклидов) - расстояние от источника выброса до точки, где располагается детектор - метео-параметры и характеристика подстилающей поверхности - характеристики водных объектов - коэффициенты перехода радионуклидов в продукты растительного и животного происхождения, а также в рыбу и моллюсков - характеристики выращивания с.-х. культур и содержания с.-х. животных - особенности поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп	- характеристика источника выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты (размеры источника, активности радионуклидов) - расстояние от источника выброса до точки, где располагается детектор - метео-параметры и характеристика подстилающей поверхности - характеристики водных объектов - коэффициенты перехода радионуклидов в продукты растительного и животного происхождения, а также в рыбу и моллюсков - характеристики выращивания с.-х. культур и содержания с.-х. животных - особенности поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп	- географическая информация (карта местности, координаты, рельеф, характеристики водных объектов) - характеристика источника выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты (размеры источника, состав и активность) - метео-параметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепи - факторы поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп	- географическая информация (карта местности, координаты, рельеф) - характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - особенности поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепи
Используемые модели распространения примесей в атмосфере	гауссова модель дисперсии	гауссова модель дисперсии	модель рассеяния гауссовского шлейфа	модель траектории облака, объединенная с гауссовой моделью дисперсии в горизонтальном направлении и с моделью, основанной на уравнении диффузии в вертикальном направлении	лагранжева траекторная стохастическая модель атмосферного переноса
Отличительные черты	- графическое представление расположения объектов в схематичном виде в декартовой системе координат - возможность включить расчет дозы от радона - коэффициенты перехода трития и углерода-14 в продукты питания рассчитываются программой самостоятельно	- дружелюбный интерфейс (программа проводит пользователя по цепочке вычислений без возможности совершить ошибку, пропустив какой-то шаг) - встроенная база данных имеет значения по умолчанию для некоторых входных параметров, что позволяет провести скрининговую оценку - в базе данных содержатся примеры расчетов из SRS-19, что позволяет освоить программу быстрее	- модели для трития и углерода-14 оценивают дозовую нагрузку от продуктов питания - большое количество параметров для водных объектов позволяют точнее моделировать распространение радиоактивных примесей в воде	- графическое представление пространственной информации - в программу загружаются базы данных региональных параметров, необходимых для оценки - программа формируется специально под предприятие ЯТЦ	- графическое представление пространственной информации - сложная модель распространения выброса позволяет подробнее моделировать атмосферный перенос на сотни километров - в программу можно загрузить базы данных региональных параметров, необходимых для оценки - оценка доз также проводится для отдельных органов - программа позволяет также выполнять оценку доз для аварийных сценариев
Поддерживаемые платформы	Windows	Windows	Windows	Windows	Windows
Технические характеристики:					
- частота процессора	> 2.8 ГГц	> 2.8 ГГц	> 2.8 ГГц	> 1 ГГц	> 1 ГГц
- объем оперативной памяти	> 512 Мб	> 512 Мб	> 512 Мб	> 4 Гб	> 4 Гб
- объем дискового пространства	> 100 Мб	> 100 Мб	> 100 Мб	> 20 Гб	> 20 Гб
Тип лицензии	бесплатная	бесплатная	проприетарная	проприетарная	проприетарная

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ

Три из пяти рассмотренных программ доступны только по проприетарной лицензии и в большей степени используются в локальных ведомствах. Программы RESRAD и CROM доступны бесплатно, но дружелюбность интерфейса выше у CROM, поскольку программа пошагово открывает нужные окна в каждом модуле оценки, что значительно упрощает работу.

Таблица 2 содержит информацию о четырех программных средствах для прогнозирования радиационного воздействия на население в случае аварии на АЭС. Все они имеют одинаковое назначение, сходные функциональные возможности и похожие технические характеристики. В то же время, программы различаются по ряду показателей, к которым можно отнести особенности интегрированных в их состав моделей, поддерживаемые платформы, типы лицензии. Следует отметить существенные различия в точности моделей распространения примесей в атмосфере на разном масштабе: каждое программное средство включает модель для оценки ситуаций на локальном и мезомасштабном уровнях.

ESTE отличается от других программ обратным моделированием для оценки активности реального выброса. НОСТРАДАМУС и RECASS не оценивают миграцию радионуклидов по пищевой цепочке.

В отличие от остальных программных средств JRODOS может быть установлен не только на Windows, но и на Linux и Mac OS. JRODOS – двух-

компонентная система и состоит из двух приложений – Сервер и Клиент. В отличие от остальных программных продуктов это позволяет запускать его сразу на нескольких компьютерах, установив Сервер на один из них и подключив его к локальной сети. Таким образом, пользователи могут запускать Клиент на своих персональных компьютерах и выполнять вычисления, что снижает ресурсоемкость процесса и оптимизирует работу сотрудников.

Анализ программных средств позволил сформировать перечень критериев, по которым были определены оптимальные инструменты для оценки дозовых нагрузок на население: доступность программного средства (тип лицензии); возможности, определяемые составом расчетных модулей (моделей); дружелюбность интерфейса; ресурсоемкость; поддерживаемые платформы.

Оптимальным (с точки зрения моделирования процессов, параметрического обеспечения, доступности и «дружелюбности» интерфейса) программным средством для прогнозирования последствий хронических радиоактивных выбросов для населения является пакет CROM, разработанный на основе миграционных моделей МАГАТЭ. Этот пакет позволяет прогнозировать поведение радионуклидов в атмосфере и природных средах, оценивать плотности загрязнения, накопление радиоактивных веществ в компонентах экосистем и сельскохозяйственной продукции.

Таблица 2. Характеристики программных средств для оценки радиационного воздействия в случае аварии на АЭС

Программное средство	ESTE	НОСТРАДАМУС / POM	RECASS	JRODOS
Назначение	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций
Исходные данные	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепочки - информация о возрастных группах населения и сельском хозяйстве	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных - информация о разных возрастных группах населения	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных - информация о разных возрастных группах населения	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепочки - информация о возрастных группах населения и сельском хозяйстве
Используемые модели распространения примесей в атмосфере	модель траектории облака (PTM) и модель Лагранжевых частиц (LPM)	лагранжево-стохастическая модель распространения радионуклидов в атмосфере	STAMP, RIMPUFF	ATSTEP, RIMPUFF, DIPCOT
Отличительные черты	- обратное моделирование для оценки активности реального выброса - программа формируется специально под предприятие ЯТЦ с учетом региональных параметров - при запросе разработчики добавляют в программу модель оценки доз от потребления продуктов питания - рекомендация защитных мер	- рекомендация защитных мер - результаты расчета представляются в виде отдельных окон с картами, на которых имеется анимированный слой динамики целевых показателей	- рекомендация защитных мер - программа может использоваться не только для оценки последствий аварийных выбросов радиоактивных веществ, но и химических загрязнителей, а также при выбросах вулканического пепла и продуктов горения лесных и торфяных пожаров.	- графическое представление пространственной информации - в программу можно загрузить слои карт с различными характеристиками (рельеф, землепользование, и т.д.) - рекомендация защитных мер - оценка доз от потребления продуктов питания
Поддерживаемые платформы	Windows	Windows	Windows	Windows, Linux, Mac OS
Технические характеристики				
– частота процессора	> 1 ГГц	> 1 ГГц	> 1 ГГц	> 2 ядра
– объем оперативной памяти	> 4 Гб	> 4 Гб	> 4 Гб	> 4 Гб
– объем дискового пространства	> 100 Гб	> 100 Гб	>100 Гб	+2 Гб на каждого пользователя > 1 Тб для сервера
Тип лицензии	проприетарная	проприетарная	проприетарная	бесплатная

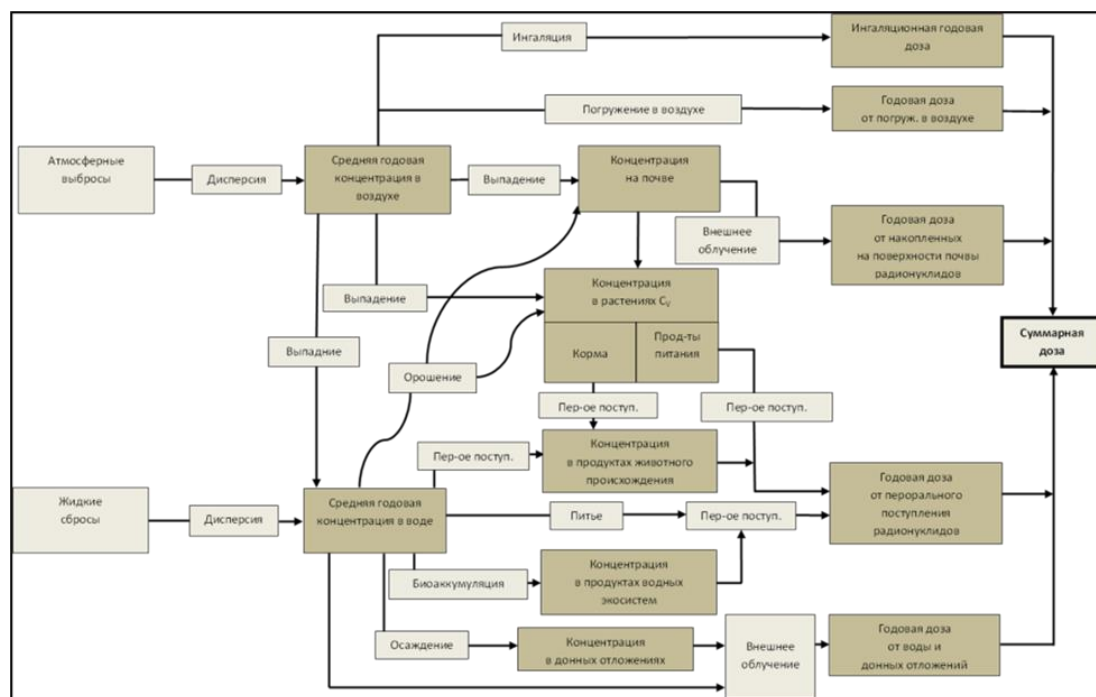


Рисунок 1. Процессы, определяющие формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека в результате атмосферных выбросов и сбросов АЭС (программное средство CROM)

Программный пакет CROM был разработан Лабораторией информационных технологий (LABI) Школы промышленных инженеров Политехнического университета Мадрида в сотрудничестве с CIEMAT в рамках программы оценки воздействия радиационного фактора на окружающую среду.

CROM позволяет выполнить оценку дозовых нагрузок на разные возрастные группы населения в результате атмосферных выбросов и жидких сбросов в условиях нормальной эксплуатации АЭС. Модели, входящие в состав данного пакета, относятся к классу «screening models», то есть, моделей первичной консервативной оценки. Степень консерватизма оценённых доз определяется значениями параметров, использованных в расчётах.

Поскольку CROM применим при непрерывных выбросах в окружающую среду, можно принять допущение о том, что распределение радионуклидов в компонентах окружающей среды является квазиравновесным. В рамках возможных сценариев рассматриваются выбросы радионуклидов в атмосферу и радиоактивные сбросы в водные объекты (реки, эстуарии, морские береговые воды и озера или водохранилища). Во всех случаях рассчитывается дисперсия радионуклидов в среде в результате процессов диффузии и миграции. В результате проведения расчётов оцениваются концентрации радионуклидов в компонентах окружающей среды и дозовые нагрузки на критические группы населения с учётом различных путей поступления радиоактивных веществ в организм человека (рисунок 1).

Программный пакет CROM характеризуется оптимальным уровнем сложности (для решения поставленной задачи) и хорошо проработанным параметрическим обеспечением. Этот пакет создан с учётом информации, представленной в документе МАГАТЭ SRS №19 [10] с некоторыми улучшениями на основе EUR 15760 [11].

Для прогнозирования воздействия аварийных выбросов АЭС на население можно рекомендовать систему RODOS, разработанную Европейской комиссией. RODOS предоставляет информацию для принятия решений на локальном, региональном и национальном уровнях, а также для ранних и поздних стадий развития аварии. Этот программный комплекс позволяет выполнять сценарные расчеты по применению мероприятий, предназначенных для ликвидации последствий аварийных ситуаций [9].

В 2011 г. был проведен реинжиниринг системы на основе языка программирования JAVA, что позволило создать кроссплатформенную версию JRODOS, расширяющую возможности применения геоинформационных систем, современных технологий баз данных и интегрирования внешних модулей. Программный код, реализованный в среде Java, запускается во всех операционных системах.

Для проведения вычислений в программный комплекс JRODOS интегрированы математические модели рассеивания примесей в атмосфере (рисунок 2), миграции радионуклидов по пищевым цепочкам, дозиметрические модели, а также модели, позволяющие прогнозировать применение контрмер.

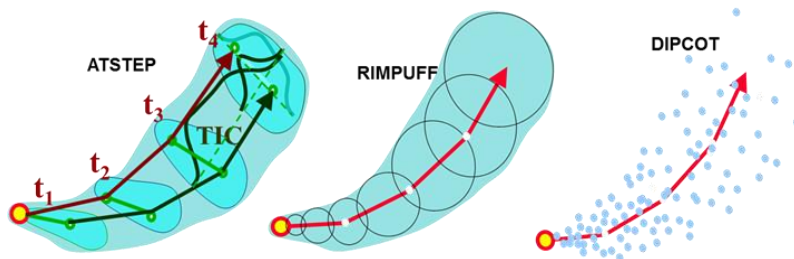


Рисунок 2. Моделирование рассеивания примесей в атмосфере (система RODOS)



Рисунок 3. Процессы, моделируемые в FDMT (система RODOS)

Дозовые нагрузки на население оцениваются по всем путям облучения (внутреннее облучение от ингаляции и перорального поступления радионуклидов, внешнее облучение от облака и осаждаемого радиоактивного материала). Так, составной частью системы JRODOS является модуль миграции радионуклидов по пищевым цепочкам – FDMT (Food Chain and Dose Module for Terrestrial Pathways) (рисунок 3).

В настоящее время система JRODOS используется в оперативных целях в Австрии, Финляндии, Германии, Нидерландах, Швейцарии и т.д. Более 20-ти учреждений в 16-ти странах используют систему на национальном и местном уровнях.

Проект RODOS в течение длительного времени находит свое применение в международной сети NERIS (Европейская платформа по подготовке к ядерным и радиационным чрезвычайным ситуациям и восстановлению). Эта сеть объединяет ученых, исследователей и специалистов, государственных администраторов и других заинтересованных лиц, которые содействуют согласованному подходу к обеспечению реагирования на чрезвычайные ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе выполнен обзор и сравнение программных средств, предназначенных для прогнозирования радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации или в случае аварийной ситуации на АЭС. Рассмотрены основные характеристики, функциональные особенности, пре-

имущества и недостатки этих программных пакетов. Выделены критерии, по которым можно оценивать качество и эффективность программных средств: доступность программного средства (тип лицензии); возможности, определяемые составом расчетных модулей (моделей); дружелюбность интерфейса; ресурсоемкость; поддерживаемые платформы.

Обоснован оптимальный расчетный инструмент для прогнозирования дозовых нагрузок на население при штатной работе АЭС (программный пакет CROM) и при аварийных ситуациях (система RODOS).

Сделан вывод о том, что при разработке программ радиозоологического мониторинга необходимо оценивать вклады радионуклидов в дозовую нагрузку по данным, характеризующим как штатные выбросы АЭС, так и выбросы для всех сценариев проектных и запроектных аварий. Необходимыми компонентами такой оценки являются (кроме данных по радиоактивным выбросам), расчетные модели и значения параметров, характеризующих регионы расположения АЭС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках бюджетной программы 217 «Развитие науки» BR21882185 «Исследования в поддержку создания и безопасного функционирования атомной электростанции в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА

1. User's manual for RESRAD-OFFSITE code version 4. – Vol. 1 – Methodology and Models Used in RESRAD-OFFSITE Code [Электронный ресурс]. – URL: https://resrad.evs.anl.gov/docs/RESRAD-OFFSITE_UsersManual.pdf.
2. Robles, B. Modelos implementados en el código CROM (Código de cRiba para evaluación de iMpacto) / B. Robles, A. Suárez, JC Mora, D. Cancio. – Madrid: CIEMAT, 2007. – 60 p. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/274641470>.
3. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08 [Электронный ресурс]. – URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/434637/HPA-RPD-058_June_2015.pdf.
4. Ľudovít Lipták. Este annual impacts-system for assessment of radiological impacts of operational discharges from nuclear facilities / Ľudovít Lipták, Eva Fojčíková, Monika Krpelanová, Miroslav Chylý, Peter Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2-3. – P. 315–320. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz225>
5. Программное средство для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе (за пределами промышленной площадки объекта использования ядерной энергии. Учебная версия 1.0. POM/E1.0 : Учебное пособие. – М. : Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. – 132 с.
6. Fojčíková, E. Este–decision support system for nuclear and radiological accidents / E. Fojčíková, Ľ. Lipták, M. Krpelanová, M. Chylý, P. Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2–3. – P. 321–325. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz226>
7. Арутюнян, Р.В. Компьютерная система НОСТРАДАМУС для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно-опасных объектах / Р.В. Арутюнян, В.В. Беликов, Г.В. Беликова, О.С. Сороковикова и др. // Известия академии наук. – 1995. – Т. 33, № 4. – 44 с.
8. Косых В.С., Бородин Р.В., Корнейчук Н.А. RECASS NT: система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно и химически опасных объектах. Сб. статей под ред. М.П. Коломеева «Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. – Т. 3. – С. 24–35.
9. Ievdin, I. RODOS re-engineering: aims and implementation details. / I. Ievdin, D. Trybushnyi, M. Zheleznyak, W. Raskob // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, No. 5. – P. 181–189. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2010024>
10. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. – 229 p.
11. European Commission, Directorate-General for Environment, Directorate-General for the Information Society and Media, Lawson, G., Simmonds, J., Mayall, A., Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment, Publications Office, 1995 [Электронный ресурс]. – URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1078584c-9e21-40d1-9104-82939f315f25>.

REFERENCES

1. User's manual for RESRAD-OFFSITE code version 4. – Vol. 1 – Methodology and Models Used in RESRAD-OFFSITE Code [Electronic resource]. – URL: https://resrad.evs.anl.gov/docs/RESRAD-OFFSITE_UsersManual.pdf.
2. Robles, B. Modelos implementados en el código CROM (Código de cRiba para evaluación de iMpacto) / B. Robles, A. Suárez, JC Mora, D. Cancio. – Madrid: CIEMAT, 2007. – 60 p. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/274641470>.
3. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08 [Electronic resource]. – URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/434637/HPA-RPD-058_June_2015.pdf.
4. Ľudovít Lipták. Este annual impacts-system for assessment of radiological impacts of operational discharges from nuclear facilities / Ľudovít Lipták, Eva Fojčíková, Monika Krpelanová, Miroslav Chylý, Peter Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2-3. – P. 315–320. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz225>
5. Programmnoe sredstvo dlya rascheta radiatsionnoy obstanovki v mezomasshtabe (za predelami promyshlennoy ploshchadki ob"ekta ispol'zovaniya yadernoy energii. Uchebnaya ver-siya 1.0. ROM/E1.0 : Uchebnoe posobie. – Moscow: In-t problem bezopasnogo razvitiya atomnoy energetiki RAN, 2018. – 132 p.
6. Fojčíková, E. Este–decision support system for nuclear and radiological accidents / E. Fojčíková, Ľ. Lipták, M. Krpelanová, M. Chylý, P. Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2–3. – P. 321–325. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz226>
7. Arutyunyan, R.V. Komp'yuternaya sistema NOSTRADA-MUS dlya podderzhki prinyatiya resheniy pri avariynyykh vybrosakh na radiatsionno-opasnykh ob"ektakh / R.V. Arutyunyan, V.V. Belikov, G.V. Belikova, O.S. Sorokovikova i dr. // Izvestiya akademii nauk. – 1995. – Vol. 33, No. 4. – 44 p.
8. Kosykh V.S., Borodin R.V., Korneychuk N.A. RECASS NT: sistema informatsionnoy podderzhki prinyatiya resheniy v sluchae avariynyykh situatsiy na radiatsionno i khimicheskii opasnykh ob"ektakh. Sb. statey pod red. M.P. Kolomeeva "Problemy gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushchey sredy" – Obninsk: GU "VNIIGMI-MTsD", 2010. – Vol. 3. – P. 24–35.
9. Ievdin, I. RODOS re-engineering: aims and implementation details. / I. Ievdin, D. Trybushnyi, M. Zheleznyak, W. Raskob // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, No. 5. – P. 181–189. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2010024>
10. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. – 229 p.
11. European Commission, Directorate-General for Environment, Directorate-General for the Information Society and Media, Lawson, G., Simmonds, J., Mayall, A., Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment, Publications Office, 1995 [Electronic resource]. – URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1078584c-9e21-40d1-9104-82939f315f25>.

**ХАЛЫҚ ҮШІН АТОМ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ШТАТТЫҚ ЖӘНЕ АВАРИЯЛЫҚ
ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫНЫҢ РАДИОЭКОЛОГИЯЛЫҚ САЛДАРЫН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН
БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚҰРАЛДАРДЫ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ**

М. К. Мүкүшева¹, С. И. Спиридонов², Р. А. Микаилова², А. В. Топорова^{3*}

¹ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

² «Курчатов институты» ФЗО ВНИИРАЭ, Мәскеу, Ресей

³ ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: toporova@nnc.kz

Мақалада қалыпты пайдалану кезінде және АЭС-та авариялық жағдай барысында халыққа радиациялық әсерді болжауға арналған бағдарламалық құралдарға шолу және салыстыру келтірілген. RESRAD, CROM, PC-CREAM 08®, ESTE Annual Impacts, ROM, ESTE, NOSTRADAMUS, RECASS, RODOS бағдарламалық пакеттерінің негізгі сипаттамалары, функционалдық ерекшеліктері, артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылады. Бағдарламалық құралдардың сапасы мен тиімділігін бағалау критерийлері бөлінді. АЭС (CROM пакеті) және төтенше жағдайлар (RODOS жүйесі) үшін қолданылатын оңтайлы есептеу құралдары негізделген.

Түйін сөздер: бағдарламалық қамтамасыз ету, АЭС, қалыпты пайдалану, авариялық жағдай, жылдық тиімді доза, мониторинг.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE TOOLS TO PREDICT
THE RADIOECOLOGICAL CONSEQUENCES AFTER ROUTINE
AND ACCIDENTAL EMISSIONS BY NPP FOR THE POPULATION**

M. K. Mukusheva¹, S. I. Spiridonov², R. A. Mikailova², A. V. Toporova^{3*}

¹ RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan

² NRC “Kurchatov Institute” VNIIRAE, Moscow, Russia

³ Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

*E-mail for contacts: toporova@nnc.kz

This article provides an overview and comparison of software tools to predict the public radiation effect under normal and off-normal NPP operating conditions. The main characteristics, functional features, advantages and disadvantages of the software packages RESRAD, CROM, PC-CREAM 08®, ESTE Annual Impacts, POM, ESTE, NOSTRADAMUS, RECASS, RODOS were addressed. Criteria for assessing the quality and efficiency of software tools were highlighted. The optimal computational toolware applicable to the NPP normal (CROM package) and off-normal (RODOS system) operating conditions was substantiated.

Keywords: software, NPP, normal operation, off-normal situation, annual effective dose, monitoring.