

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Н.Ю. Истомина, М.Д. Носков, А.Д. Истомин, В.С. Бугрина, К.Е. Попова

Северский технологический институт НИЯУ МИФИ

636036, Томская обл., г. Северск, пр. Коммунистический, 65



Обсуждается применение геоинформационных и экспертно-моделирующих систем для оценки влияния эксплуатации объектов ядерной энергетики на окружающую среду. Дано описание структуры и функций геоинформационного экспертно-моделирующего программного комплекса АРИА. Программный комплекс АРИА обладает функциональными возможностями создания и визуализации цифровых моделей местности, потенциально опасных объектов, объектов-реципиентов; моделирования и визуализации радиационной обстановки; анализа радиоактивной ситуации по уровням активности и мощности дозы для объектов-реципиентов различной геометрии. Комплекс позволяет рассчитывать пространственные распределения удельной активности радионуклидов, дозы и мощности дозы, обусловленной внешним и внутренним путями воздействия ионизирующего излучения.

Представлены результаты применения программного комплекса АРИА для расчета радиационной обстановки при поступлении радионуклидов в приземный слой атмосферы при штатном и аварийном режимах функционирования объектов ядерной энергетики. В первом случае радиационная обстановка рассчитывалась для района расположения Калининской АЭС, во втором – проведена оценка последствий серии кратковременных аварийных выбросов вследствие аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии в 2011 г.

Обсуждается вклад долгоживущих и короткоживущих радионуклидов в формирование радиационного фона в случае аварийного выброса и при штатном режиме работы АЭС. На ранней стадии аварии наиболее значимым фактором, определяющим дозовые нагрузки персонала и населения, является ингаляционная доза, на поздней стадии аварии, как и при штатной эксплуатации АЭС, – доза, обусловленная излучением долгоживущих радионуклидов, находящихся в поверхностном слое почвы. Показано, что индивидуальная эквивалентная доза в районе размещения КАЭС на четыре порядка ниже значения предела годовой дозы для персонала, установленного нормами радиационной безопасности.

Ключевые слова: прогнозирование, радиационная обстановка, выбросы в атмосферу, математическое моделирование, поддержка принятия решения, геоинформационная система, ядерная энергетика.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных принципов обеспечения безопасности функционирования объектов ядерной энергетики является радиационная безопасность прилегающих территорий. Международным ядерным сообществом введен ряд документов, направленных на повышение уровня безопасности функционирования АЭС, предотвращение тяжелых аварий и смягчение их последствий [1 – 3]. Выход радионуклидов в приземный слой атмосферы может происходить как при производственных авариях, так и при штатной эксплуатации АЭС. Аварийные ситуации, сопряженные с риском выбросов радиоактивных веществ в атмосферу, могут возникать вследствие природных катастроф (извержение вулкана, землетрясение и т.п.), человеческого фактора, а также возникновения неисправности оборудования. При аварийных выбросах значительно превышаются критические значения параметров, определяющих радиационную безопасность. Возникает необходимость разработки оптимальных рекомендаций по проведению мероприятий с целью снижения радиогенного риска для населения прилегающих территорий. При штатной эксплуатации объектов ядерной энергетики активность радионуклидов, поступающих в атмосферу с газоаэрозольным выбросом, значительно ниже критических значений, но также требует контроля и нормирования. Наличие информационных систем, предназначенных для сбора, накопления, выдачи и анализа информации, предоставляющих сведения о пространственном распределении объектов с их визуализацией на карте местности, значительно повышает эффективность решения задач по обеспечению радиационной безопасности населения [4].

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРТНО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС АРИА

Информационные системы предоставляют широкие возможности для оперативного прогнозирования радиационной обстановки на прилегающих к предприятиям атомной отрасли территориях. Прогнозирование проводится с учетом метеоусловий, данных об источнике выброса, информации о реципиентах радиационного воздействия. В Северском государственном технологическом институте НИЯУ МИФИ был разработан геоинформационный экспертно-моделирующий комплекс (ГИЭМК) АРИА, предназначенный для оценки последствий выбросов радиоактивных веществ в приземный слой атмосферы [5]. ГИЭМК может быть использован для оценки радиационной обстановки территорий при штатных и аварийных выбросах в атмосферу; прогнозирования последствий гипотетических аварийных выбросов радиоактивных веществ в атмосферу; разработки практических рекомендаций с целью минимизации последствий выбросов. Функционально ГИЭМК подразделяется на следующие взаимодействующие системы: геоинформационную, моделирующую, экспертно-аналитическую.

Геоинформационная система предназначена для отображения пространственно-временных и атрибутивных данных объектов на карте рассматриваемой территории. Визуальное представление информации базируется на цифровой модели местности (ЦММ), организованной в виде множества слоев (карт-подложек). Одним из основных слоев геоинформационной системы является физическая карта местности. Реальные объекты, расположенные на рассматриваемом участке территории, отображаются в векторном формате и образуют другие слои ЦММ. Каждому реальному объекту сопоставляется объект геоинформационной системы, который характеризуется набором пространственных и тематических данных. Для определения положения объектов на карте местности используется декартова система координат. Тематически реальные объекты разделяются на объекты-реципиенты радиационного риска и потенциально опасные объекты. Как реципиенты радиационного риска, так

и потенциально опасные объекты геометрически классифицируются как точечные, линейные, площадные.

Моделирующая система содержит модули расчета распространения радиоактивных веществ и воздействия радионуклидов [6]. Модуль для расчета распространения радиоактивных веществ предназначен для определения удельных активностей в воздухе и на подстилающей поверхности. Воздействие ионизирующего излучения определяется с помощью расчета эквивалентных доз. Работа каждого из модулей базируется на соответствующей математической модели. Для описания распространения радиоактивных веществ в приземном слое атмосферы используется метод случайно блуждающих точек [6], в котором учитываются ветровой перенос, турбулентная диффузия, взаимодействие частиц примеси с поверхностью, вторичный подъем, временная неоднородность метеоусловий. Параметры устойчивости атмосферы задаются в соответствии с классификацией Пасвилла - Гиффорда [7]. Математическая модель оценки воздействия радиоактивных веществ базируется на методике расчета эквивалентных доз, обусловленных облаком радиоактивных веществ, радионуклидами, осевшими на почву, ингаляцией радионуклидов. Расчеты доз осуществляются на основе данных моделирования распространения радиоактивных примесей с учетом соответствующих характеристик излучения отдельных радионуклидов. Результаты расчетов отображаются на карте местности в виде изолиний поверхностных концентраций, временных графиков и изолиний мощностей эквивалентных доз.

Экспертно-аналитическая система ГИЭМК содержит модули, предназначенные для определения параметров модели распространения радионуклидов и анализа последствий аварийной ситуации, и нормативную базу данных. Модель распространения радиоактивных веществ и ее параметры определяются в соответствии с характеристиками выбросов и метеоусловий, введенных пользователем. Источник выброса задается с помощью следующих параметров: высота, геометрическая форма, интенсивность, радионуклидный состав. Параметры рассеяния идентифицируются в соответствии с введенными пользователем скоростью и направлением ветра, облачностью, инсоляцией, интенсивностью осадков. Данные о параметрах модели передаются моделирующей системе. Оценка последствий аварийной ситуации производится соответствующим модулем на основании результатов прогнозных расчетов. Последствия аварийной ситуации оцениваются в соответствии с введенным пользователем уровнем физической величины (активность радионуклидов на поверхности, эквивалентная доза и ее мощность). Оценка последствий аварийной ситуации также проводится для выбранных пользователем населенных пунктов. При этом используется информация из базы данных по объектам-реципиентам радиационного риска. Результаты анализа радиационной обстановки отображаются на карте местности и в табличном виде. Результаты оценки радиационной обстановки предоставляют пользователю суммарные данные по ареалу, в котором значение физических величин превышает заданный уровень, или по выбранным объектам-реципиентам. Кроме оценок, проводимых непосредственно после окончания расчета распространения радионуклидов, экспертно-аналитическая система позволяет получать долгосрочные оценки последствий выбросов. Сопоставление результатов прогнозных оценок и нормативной базы данных позволяет рекомендовать меры, способствующие уменьшению радиационного риска населения. В процессе работы экспертно-аналитической системы формируется отчет.

Результаты расчетов отображаются на карте местности в виде изолиний поверхностных концентраций, изолиний мощности эквивалентных доз, графиков динамики мощностей доз и доз в контрольных точках ЦММ, графиков распределения мощностей доз и доз вдоль выбранных направлений (сечений) ЦММ. Анализ результатов

расчетов по уровням активности, мощности дозы и дозы производится с помощью сопоставления с пределами доз, представленными в нормах радиационной безопасности (НРБ) [8]. Отчет о работе комплекса формируется в виде документа MS Word. Моделирование последствий выхода в окружающую среду газоаэрозольного облака радионуклидов проводилось для аварийной ситуации на АЭС «Фукусима-1» 2011 г., а также для штатной эксплуатации Калининской АЭС.

АВАРИЙНЫЙ ВЫБРОС НА АЭС «ФУКУСИМА-1», ЯПОНИЯ, 2011 Г.

Оценка последствий аварийного выброса на АЭС «Фукусима-1» остается одной из актуальных проблем на протяжении всего послеаварийного периода. Решение этой задачи включает в себя определение параметров источника выбросов, метеоусловий, при которых происходило распространение газоаэрозольного облака радионуклидов, а также определение распределений радионуклидов на поверхности и расчета доз, обусловленных радионуклидами, находящимися в приземном слое атмосферы и на поверхности. Ряд событий на АЭС Фукусима-1, приведших к значительному увеличению радиационного фона в окрестности АЭС, представлены в табл. 1 [9 – 12].

Таблица 1

Прямой выход радионуклидов в приземный слой атмосферы при аварии на АЭС «Фукусима-1» [9, 11]

№	Время начала	Событие	Источник	Продолжительность выброса	Высота, м
1	15.03 06:10	Выброс	Блок № 2	Мгновенный	50
2	15.03 06:20	Выброс	Блок № 4	Мгновенный	150
3	15.03 09:38	Пожар	Блок № 4	2 часа	150
4	16.03 05:45	Пожар	Блок №4	2 часа	150

Таблица 2

Радионуклидный состав выбросов [9, 11]

Нуклид	Активность, ПБк	
	15 марта	16 марта
Kr-85	2,7	3,7
Te-132	0,78	130
I-131	7,5	180
I-132	8	200
I-133	1,7	300
Xe-133	170	240
Xe-135	2,3	3,3
Cs-134	2,2	48
Cs-137	1,4	29

Прямой выход радионуклидов в атмосферу был возможен 15 марта в 6:10 и в 6:20 в результате взрывов в блоках № 2 и № 4 соответственно, а также в результате, последующего пожара в блоке № 4. По различным оценкам, в результате аварийных выбросов в атмосферу поступило суммарно около 15,8 ЭБк (табл. 2 [9, 11]). В период развития аварийных событий направление ветра было переменчивым [7, 9]. В первой половине дня 15 марта преобладало южное направление

ветра, 16 марта – северо-западное. Значение скорости ветра изменялось от 5 до 20 м/с.

Полученные с помощью моделирования изолинии мощности эквивалентной дозы, формируемой на высоте 1 м осевшими на поверхность радионуклидами, через сутки после первых предполагаемых газоаэрозольных выбросов в атмосферу (16 марта, 8:20) представлены на рис. 1.

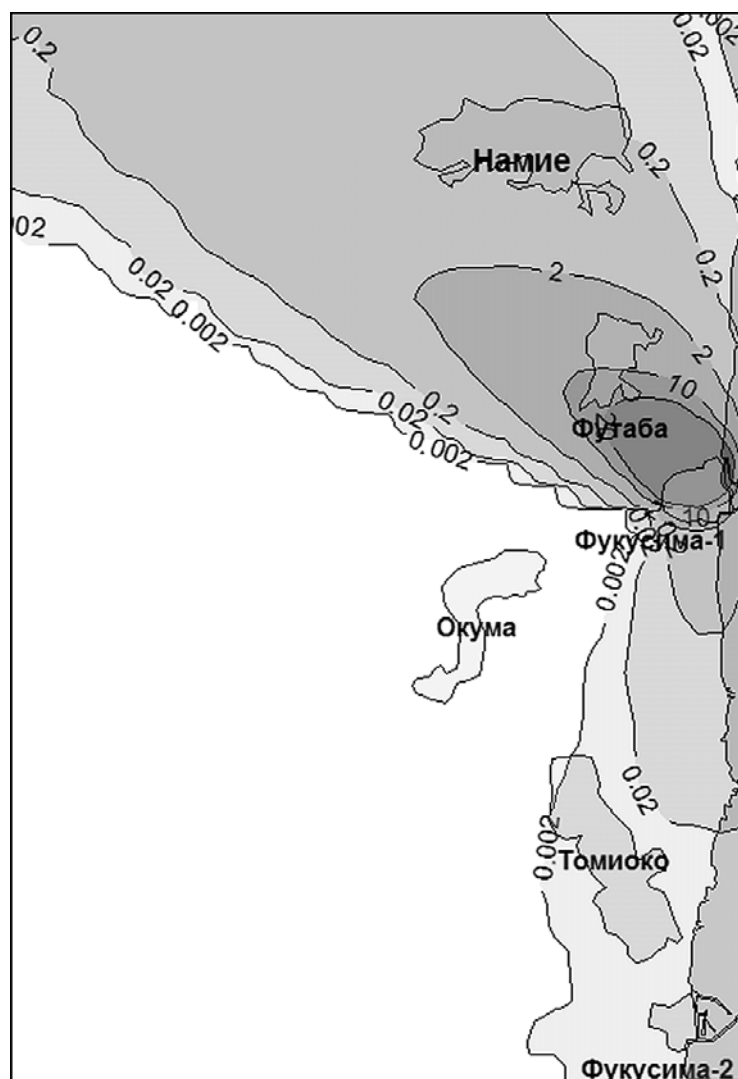


Рис. 1. Изолинии мощности эквивалентной дозы, обусловленной радионуклидами, осевшими на поверхность, мкЗв/с. Аварийный выброс АЭС Фукусима-1

Уровни изолиний мощности эквивалентной дозы следующие: 0,002; 0,2; 2; 10; 20 мкЗв/с. В соответствии с имевшими место метеоусловиями радиационный южный след сформировался 15 марта, радиационный след в северо-западном направлении – 16 марта. Населенный пункт Томиоко и территория АЭС Фукусима-2 попадают в ареал южного следа с мощностью дозы 0,002 мкЗв/с. Полученные данные динамики мощности эквивалентной дозы от излучения газоаэрозольного облака радионуклидов в контрольной точке, расположенной на территории промплощадки Фукусима-2 ЦММ, представлены на рис. 2.

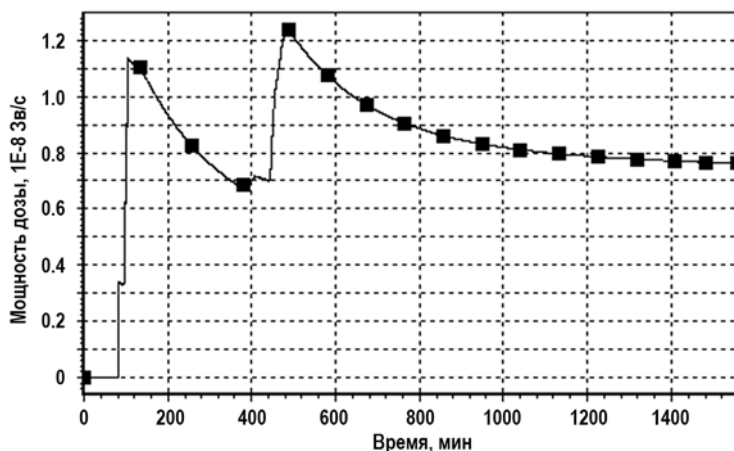


Рис. 2. Динамика мощности эквивалентной дозы в контрольной точке промплощадки АЭС Фукусима-2

Из графика видно, что первый максимум мощности дозы 114 мкЗв/с наблюдается через 104 мин после взрыва на втором энергоблоке. Следующий максимум мощности дозы 124 мкЗв/с обусловлен выбросом и последующим пожаром на четвертом энергоблоке. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с данными [9, 11]. Населенный пункт Намизэ, расположенный северо-западнее АЭС Фукусима-1, попадает в ареал с мощностью дозы $0,02 \text{ мкЗв/с}$, город Футаба – в ареале с изолиниями от 2 до 10 мкЗв/с . Анализ радиационной обстановки на территории АЭС «Фукусима-1» проводился для контрольных точек ЦММ промплощадки. В точке, находящейся на северо-западе промплощадки (северо-западные ворота АЭС Фукусима-1), максимальная мощность эквивалентной дозы, обусловленной внешним излучением облака радионуклидов, составила $17,8 \text{ мЗв/с}$; мощность ингаляционной дозы – 47 мкЗв/с . В контрольной точке, являющейся цифровой моделью центрального КПП, максимальная мощность эквивалентной дозы, обусловленной внешним излучением облака радионуклидов, составила $20,9 \text{ мЗв/с}$; ингаляционная мощность дозы – $61,2 \text{ мкЗв/с}$.

ШТАТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ КАЛИНИНСКОЙ АЭС

Оценка радиационной обстановки, обусловленной штатной эксплуатацией АЭС была проведена для района размещения Калининской АЭС (КАЭС) – одной из крупнейших поставщиков электроэнергии в восемь регионов РФ. Расчеты проводились с привязкой к ЦММ района размещения КАЭС, созданной на основе физической карты [13]. Учитывались направления и повторяемость значений скорости ветра [14], а также суммарная годовая активность и радионуклидный состав выхода радионуклидов в газоаэрозольной форме в атмосферу [15]. ЦММ включает в себя источник выбросов, объекты-реципиенты (населенные пункты), контрольные точки («Север», «Запад», «Юг», «Восток»), заданные на расстоянии 500 м от источника. Результаты расчета радиационной обстановки, представлены изолиниями мощности эквивалентной дозы (рис. 3), обусловленной излучением радионуклидов, осевших на подстилающую поверхность; уровни изолиний: $0,5 \cdot 10^{-15}$; $1 \cdot 10^{-15}$; $2 \cdot 10^{-15}$; $5 \cdot 10^{-15}$; $10 \cdot 10^{-15} \text{ Зв/с}$.

Результаты расчета годовых эквивалентных доз в контрольных точках ЦММ КАЭС (табл. 3) позволяют сделать следующие выводы. Технологически измененный радиационный фон на территории промплощадки обусловлен в большей степени внешним воздействием радионуклидов, находящихся в воздухе. Эквивалентная доза в воздухе формируется активностью инертных радиоактивных газов (ИРГ), преобладающих в выбросах радионуклидов в атмосферный воздух. Эквивалентная доза на

поверхности промплощадки КАЭС, обусловленная излучением присутствующих в выбросах долгоживущих нуклидов Cs-134 и Cs-137, на один порядок меньше дозы, создаваемой внешним β- и γ-излучением радионуклидов в воздухе. Ингаляционная эквивалентная доза, создаваемая преимущественно изотопами йода, на восемь порядков меньше дозы, формируемой излучением радионуклидов в воздухе. Таким образом, величина годовой суммарной эквивалентной дозы в контрольных точках промплощадки КАЭС, определяемая, в основном, значениями годовой эквивалентной дозы в воздухе, на четыре порядка ниже значения предела годовой дозы для персонала (20 мЗв/год [4]).

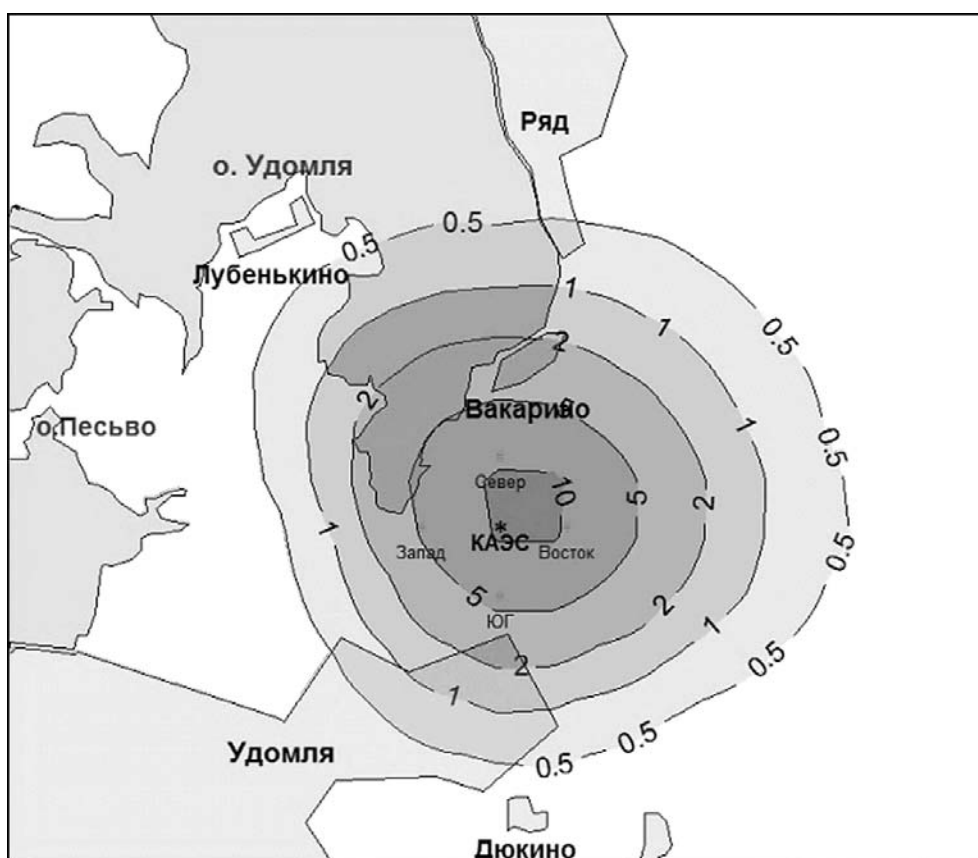


Рис. 3: Изолинии мощности эквивалентной дозы, обусловленной радионуклидами, осевшими на поверхность, 10^{-15} Зв/с. Штатная эксплуатация КАЭС

Таблица 3

Радиационный фон в контрольных точках ЦММ КАЭС

Объект	Контрольная точка	Ингаляционная эквивалентная доза, мкЗв/г.	Эквивалентная доза от радионуклидов на поверхности, мкЗв/г.	Эквивалентная доза от радионуклидов в воздухе, мкЗв/г.
КАЭС	Север	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,157	4,333
	Восток	$1,87 \cdot 10^{-8}$	0,147	3,512
	Юг	$1,16 \cdot 10^{-8}$	0,095	2,179
	Запад	$1,89 \cdot 10^{-8}$	0,103	3,542

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение программных комплексов, интегрирующих возможности оперативной обработки больших объемов семантических, пространственных и временных данных, значительно повышает эффективность действий по обеспечению радиационной безопасности населения. Позволяет избежать потерь времени при определении оптимальных решений в планировании мероприятий по защите населения в случае возникновения аварийной ситуации. В случае штатной эксплуатации на основании результатов расчетов разработать сценарии развития событий, которые могут привести к существенным выбросам радиоактивных веществ в атмосферу, и меры по предотвращению нежелательных последствий.

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы. На ранней стадии аварии дозовые нагрузки населения и персонала формируются излучением радионуклидов, находящихся в газоаэрозольном облаке выброса. При оседании аэрозольных частиц из облака радионуклидов наиболее значимым фактором является ингаляционная доза; на поздней стадии аварии, как и при штатной эксплуатации АЭС, – доза, обусловленная излучением долгоживущих радионуклидов, находящихся в поверхностном слое почвы. Показано, что индивидуальная эквивалентная доза в районе размещения КАЭС на четыре порядка ниже значения предела годовой дозы для персонала, установленного нормами радиационной безопасности.

Авторы статьи выражают благодарность оргкомитету XV Международной молодежной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019» за предоставленную возможность публикации статьи.

Литература

1. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Safety Series No 115 – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996. – 370 p. Электронный ресурс: https://gnsn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_115_1996_Pub996_EN.pdf/ (дата обращения 20.03.2020).
2. Intervention criteria in a nuclear or radiation emergency. Safety Series No 109 – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1994. – 48 p. Электронный ресурс: https://gnsn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_109_1994.pdf/ (дата обращения 20.03.2020).
3. Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, General Safety Guide. Safety Standards Series No. GSG-2 – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. – 120 p. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1467_web.pdf/ (дата обращения 20.03.2020).
4. Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д., Геловани В.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. – М.: Эдиторал УРСС, 2001. – 304 с.
5. Носков М.Д., Истомин А.Д., Истомина Н.Ю., Чеглоков А.А. Геоинформационный экспертно-моделирующий комплекс АРИА для оценки последствий выбросов радиоактивных веществ в атмосферу. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613014 от 14.04.2011.
6. Жиганов А.Н., Истомина Н.Ю., Носков М.Д. Моделирование последствий выброса радиоактивных веществ в атмосферу // Известия вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 4 (приложение). – С. 100-104.
7. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 2009. – 234 с.
9. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Киселев А.Е. и др. Оперативный анализ аварии на АЭС

«Фукусима-1» (Япония) и прогнозирование ее последствий. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – Вып. 3. – С. 151-159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9540-7>.

10. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». – М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. – 408 с. Электронный ресурс: http://www.ibrae.ac.ru/docs/Monografii/velikhov_web.pdf/ (дата обращения 20.03.2020).

11. Авария на АЭС «Фукусима-Дайити». Доклад генерального директора. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – 278 с. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf/> (дата обращения: 20.03.2020).

12. The Fukushima Daiichi Accident / International Atomic Energy Agency. – 2015. – Vol. 4 : Radiological Consequences. – 262 p. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV4-Web.pdf/> (дата обращения 20.03.2020).

13. Карта Тверской области. Электронный ресурс: <http://openstreet-map.ru/#map=16/56.8417/61.3167&q=Тверская область&qmap=/> (дата обращения 20.03.2020).

14. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Дата введения 2019-05-29. Электронный ресурс: <http://sniprf.ru/sp131-13330-2018/> (дата обращения 20.03.2020).

15. Отчет по экологической безопасности за 2018 год КАЭС. Электронный ресурс: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/922/92289881c70e1cbb3b2734745f70a720.pdf/> (дата обращения 20.03.2020).

Поступила в редакцию 21.03.2020 г.

Рекомендована к публикации оргкомитетом
XV Международной молодежной научно-практической конференции
«Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019»

Авторы

Истомина Надежда Юрьевна, доцент, к.т.н.,
e-mail: istomina.n.u@mail.ru

Носков Михаил Дмитриевич, зам. руководителя по научной работе и международной деятельности, зав. кафедрой профессор, д.ф.-м.н.
E-mail: MDNoskov@merphi.ru

Истомин Андрей Дмитриевич, доцент, к.ф.-м.н.,
E-mail: ADIstomin@merphi.ru

Бугрина Валерия Сергеевна, студентка
E-mail: vbugrina@mail.ru

Попова Ксения Евгеньевна, студентка
E-mail: ksenya.ksenia.popova@mail.ru

SIMULATION OF THE RADIATION SITUATION IN NUCLEAR POWER DEPLOYMENT AREAS

Istomina N.Yu., Noskov M.D., Istomin A.D., Bugrina V.S., Popova K.Ye.
Seversk Technological Institute, NRNU «MEPhI»
65 Kommunistichesky av., Seversk, Tomsk reg., 636036 Russia

ABSTRACT

The use of geoinformation and expert simulation systems to assess the environmental effects from operation of nuclear power installations is discussed. The structure and the functions of the ARIA geoinformation and expert simulation software package are described. ARIA features functional capabilities for building and visualizing digital models of the locality, hazardous installations, and recipient facilities, simulating and visualizing the radiation situation, and analyzing the radiation situation in terms of the activity and dose rate levels for recipient facilities of various geometries. The system makes it possible to calculate spatial distributions of the radionuclide specific activity, the dose and the dose rate as defined by the external and internal pathways for the ionizing radiation impacts.

The paper presents the results of using the ARIA software package to calculate the radiation situation with the entry of radionuclides into the surface air layer during normal and emergency operating modes of nuclear power installations. In the former case, the radiation situation was calculated for the Kalinin NPP deployment area. In the latter case, the consequences from a series of short-term emergency releases in the wake of the Fukushima Daiichi accident in Japan in 2011 were assessed.

The contribution of long- and short-lived radionuclides to the formation of the radiation background in the event of an emergency release and during normal NPP operation is discussed. Inhalation dose is the most important factor defining the dose rates for the personnel and the public at the early accident stage. That at the later accident stage, both during an accident and during normal NPP operation, is the dose caused by the radiation from the long-lived radionuclides in the surface soil layer. It has been shown that the individual equivalent dose in the Kalinin NPP deployment area is four orders of magnitude as low as the annual dose threshold value set by the radiation safety standards.

Key words: prediction, radiation situation, atmospheric release, mathematical simulation, support of decision-making, geoinformation system, nuclear power.

REFERENCES

1. *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. Safety Series No 115, IAEA, Vienna, 1996. Available at: https://gssn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_115_1996_Pub996_EN.pdf/ (accessed Mar 20, 2020).
2. *Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency*. Safety Series No 109, IAEA, Vienna, 1994. Available at: https://gssn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_109_1994.pdf/ (accessed Mar 20, 2020).
3. *Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, General Safety Guide*. Safety Standarts Series No GSG-2, IAEA, Vienna, 1994. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1467_web.pdf/ (accessed Mar 20, 2020).
4. Bashlykov A.A, Britkov V.B., Vyazilov E.D., Gelovani V.F. *Intelligent decision support systems in emergency situations using information on the state of the environment*. Moscow. Editorial URSS Publ., 2001 (in Russian).

5. Noskov M.D., Istomin A.D., Istomina N.Yu., Cheglov A.A. Geoinformation expert-modeling complex ARIA to evaluate effluents consequences of radioactive substances into the atmosphere. *Certificate for the State Registration of the Computer Program No 2011613014, 14.04.2011* (in Russian).
6. Zhiganov A.N., Istomina N.Yu., Noskov M.D. Modeling of consequences of radioactive substances effluent into the atmosphere. *Izvestiya vuzov. Physics*. 2000, v. 43, no 4, pp. 100-104 (in Russian).
7. Gusev N.G., Belyaev V.A. *Radioactive Release in the Biosphere: Handbook*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 224 p. (in Russian).
8. NRB-99/2009 *Standards of radiation security: Sanitary Rules and Standards*. Moscow. Information-publishing Centre of Goskomsanepidnadzor Publ., 2009, 234 p. (in Russian).
9. Harutyunyan R.V., Bolshov L.A., Kiselev A.E., Krasnoperov S.N., Pavlovsky O.A., Panchenko S.V., Pripachkin D.A., Strizhov V.F.. Operational analysis of the accident at the Fukushima-1 NPP (Japan) and forecasting its consequences. *Atomnaya Energiya*. 2012, v. 112, no 3, pp. 151-159; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9540-7> (in Russian).
10. Harutyunyan R.V., Bolshov L.A., Borovoi A.A., Velikhov E.P. System analysis of causes and consequences of the Fukushima-1 NPP accident. Moscow Nuclear Safety Institute of RAS Publ., 2018. Available at: http://www.ibrae.ac.ru/docs/Monografii/velikhov_web.pdf (accessed Mar 20, 2020) (in Russian).
11. The accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant. CEO Report. IAEA, Vienna, 2015. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf> (accessed Mar 20, 2020) (in Russian).
12. The Fukushima Daiichi Accident. IAEA, Vienna, 2015, Vol. 4 : Radiological Consequences. 262 p. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV4-Web.pdf> (accessed Mar 20, 2020).
13. Map of the Tver Region. Available at: <http://openstreet-map.ru/#map=16/56.8417/61.3167&q=Тверская область&qmap=/> (accessed Mar 20, 2020) (in Russian).
14. SP 131.13330.2018. *Construction Climatology*. Updated edition of SNiP 23-01-99*. Date of introduction 2019-05-29. Available at: <http://sniprf.ru/sp131-13330-2018/> (accessed Mar 20, 2020) (in Russian).
15. 2018 Kalininskaya NPP *Environmental Safety Report*. Available at: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/922/92289881c70e1cbb3b2734745f70a720.pdf> (accessed Mar 20, 2020) (in Russian).

Authors

Istomina Nadezhda Yurievna, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: NYIstomina@mephi.ru

Noskov Mikhail Dmitrievich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: MDNoskov@mephi.ru;

Istomin Andrey Dmitrievich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: istomin@ssti.ru;

Bugrina Valeriya Sergeevna, Student

E-mail: vbugrina@mail.ru;

Popova Kseniya Yevgenievna, Student

E-mail: ksenya.ksenia.popova@mail.ru