

Оптимизация функциональных возможностей быстроразворачиваемой АСКРО с использованием методов вероятностного анализа безопасности третьего уровня (ВАБ-3)

В статье описываются цели, задачи и общие решения быстроразворачиваемой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (БР АСКРО). Приведен способ оценки и оптимизации функциональных возможностей БР АСКРО при размещении на местности с учетом вероятностных характеристик аварийных выбросов и условий распространения радиоактивных веществ в окружающей среде с использованием методов вероятностного анализа безопасности третьего уровня ОИАЭ (ВАБ-3 ОИАЭ).

Ключевые слова:

радиоактивные вещества, авария, безопасность, радиация, мониторинг, БР АСКРО, АСКРО, чрезвычайная ситуация, ВАБ-3, вероятностный анализ безопасности, риск, ОИАЭ.

**В.А.Пантелеев, М.Д.Сегаль,
С.Л.Гаврилов, А.Е.Пименов,
Е.В.Попов**

(Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, г. Москва)

Ю.Н.Мартынюк

(Научно-производственное предприятие «Доза», г. Зеленоград)

Территориальные автоматизированные системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) являются одним из основных элементов системы аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации с радиационным фактором. Основным назначением территориальных АСКРО является контроль радиационной обстановки и информационная поддержка деятельности территориальных и федеральных органов исполнительной власти по обеспечению радиационной безопасности. Территориальные АСКРО являют-

ся источником информации о радиационной обстановке для лиц, принимающих решения по защите населения, а также для граждан и СМИ.

Анализ зарубежного опыта создания автоматизированных систем радиационного контроля показал, что высокую плотность размещения стационарных постов радиационного контроля на своей территории имеет ряд развитых европейских стран, таких как Финляндия, Германия, Австрия. Плотность размещения средств радиационного мониторинга на территории

Европы в сравнении с Россией представлена на рис. 1. Однако стоит отметить, что территориальные особенности России не позволяют оснастить всю территорию достаточно густой сеткой постов радиационного контроля как по экономическим, так и по демографическим соображениям.

В соответствии с [1] в случае аварий технические средства радиационного контроля должны гарантированно обеспечить обнаружение радиационной аварии. Однако по оценкам [2], даже для

обнаружения самого факта радиационной аварии при рассматриваемых в проектах радиационно опасных объектов наихудших «базовых» сценариев, при категории атмосферной устойчивости типа F в модели Паскуилла–Гиффорда, минимальное число постов контроля, расположение которых оптимизировано для обнаружения конкретной аварии, должно составлять несколько десятков единиц. При рассмотрении всего спектра аварий на рассматриваемых радиационно опасных объектах число постов кон-

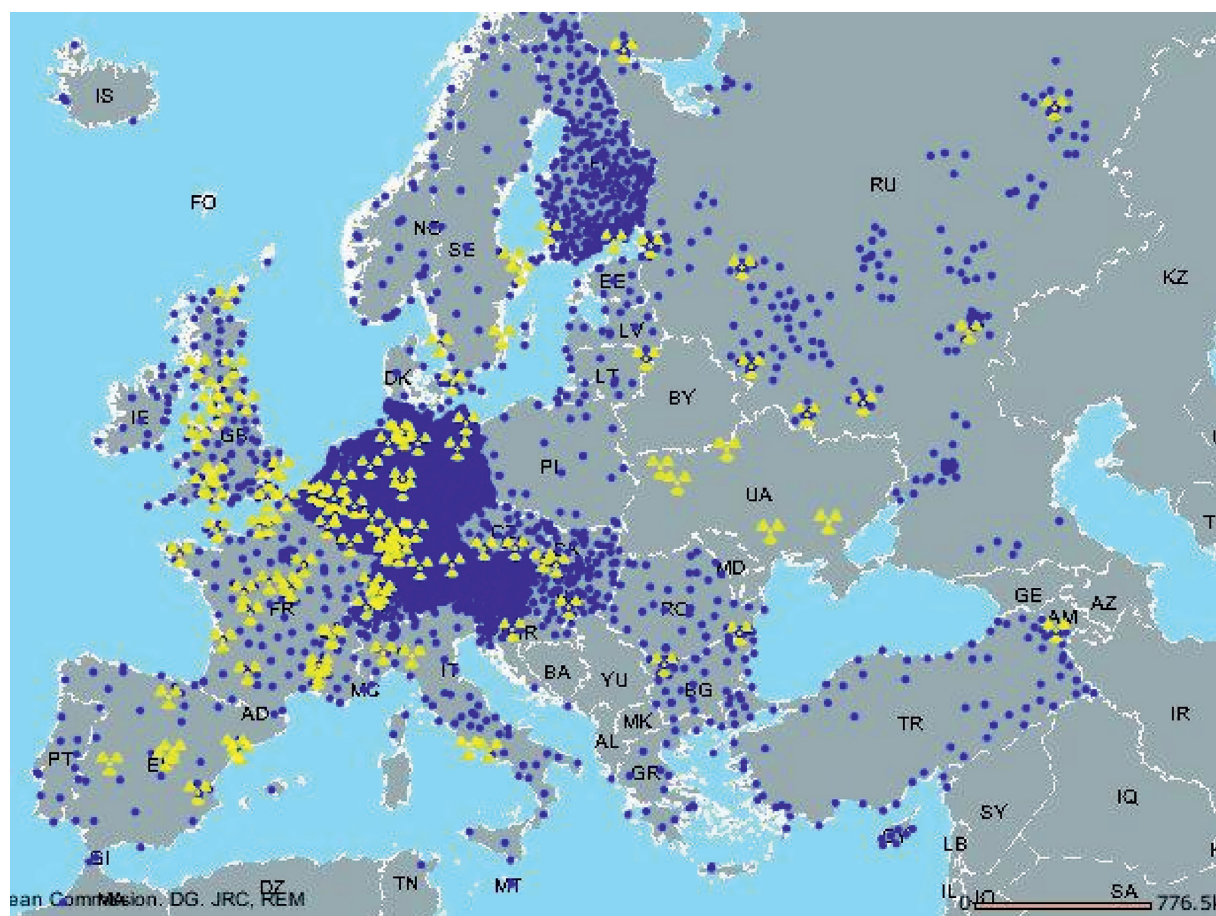


Рис. 1. Плотность размещения средств радиационного мониторинга на территории Европы.



Рис.2. Внешний вид модуля БР АСКРО.

троля возрастет еще больше. Таким образом, задача сводится к резкому увеличению постов радиационного контроля без существенного удорожания стоимости создания и обслуживания систем АСКРО.

Для обеспечения решения данной задачи ИБРАЭ РАН и ООО НПП «Доза» совместно были разработаны модули быстроразворачиваемой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (БР АСКРО). Внешний вид модуля представлен на рис.2, общая функциональная схема представлена на рис.3. Модули БР АСКРО планируется использовать как дополнение к стационарным системам АСКРО для уточнения радиационной обстановки и расширения зоны покрытия территории России средствами радиационного мониторинга, притом,

что существенно, именно в тех местах, где это целесообразно.

В состав модуля быстроразворачиваемой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки входят следующие элементы:

- МК – схема управления на базе микроконтроллера;
- ЧРВ – часы реального времени;
- БЗСС – блок звуковой и световой сигнализации;
- ДИИ – детектор ионизирующего излучения;
- GPS – приемник системы глобального позиционирования ГЛОНАСС;
- RF – радиочастотный блок связи;
- АИП – автономный источник питания.

Элементы в составе БР АСКРО могут решать следующие задачи:

- измерение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) с помощью блока

детектирования ионизирующего излучения;

- предварительная обработка полученной информации;
- сохранение полученной информации в энергонезависимой памяти с меткой времени в течение 14 дней. Запись в архив производится раз в 5 минут;
- передача последнего измеренного значения МАЭД из архива в центр сбора данных – один раз в час в основном режиме работы системы и один раз в 10 минут в режимах «превышения предупредительной уставки» и «превышения аварийной уставки»;
- определение географических координат точки установки (только в местах действия системы глобального позиционирования ГЛОНАСС);
- определение временных меток;
- обеспечение ретрансляции радиосообщений от сосед-

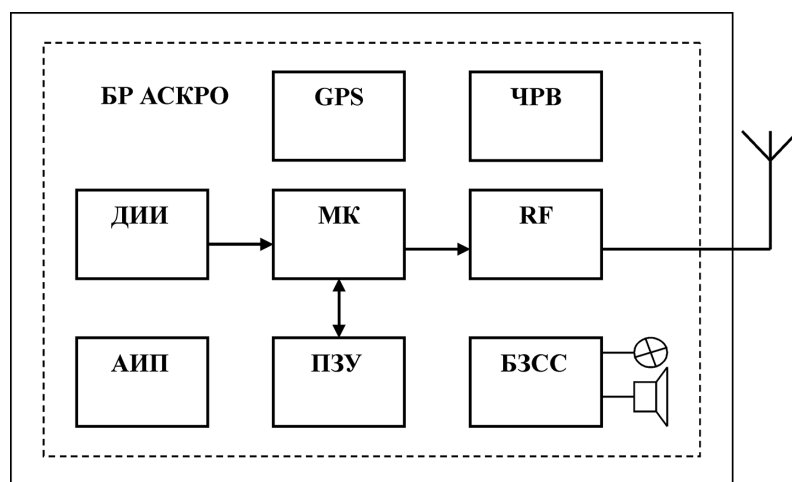


Рис.3. Общая функциональная схема БР АСКРО.

- них постов радиационного контроля;
- оповещение звуковыми и световыми сигналами о превышении заданного уровня радиационного излучения;
- оповещение о состоянии АМПРК при помощи светодиодной индикации;
- обеспечение подключения внешнего устройства, измеряющего другие радиационные параметры, с помощью интерфейса RS-485, получение от него данных о радиационной обстановке по протоколу Modbus и передаче ее в центр сбора данных.

Для создания системы радиационного мониторинга на основе модулей БР АСКРО используется:

- набор модулей БР АСКРО в количестве, определяемом требуемой зоной покрытия;
- рабочая станция на базе ноутбука со средствами передачи данных в центры сбора на базе кризисных центров;
- транспортная платформа на базе автомобиля повышенной проходимости для доставки аппаратуры и специалистов в места близ аварии.

Структурная схема БР АСКРО представлена на рис.4.

Особо стоит отметить использование в качестве каналов передачи данных между устройствами БР АСКРО ZigBee-модулей XBee, способных самостоятельно объ-

единяться в беспроводные сети с различной топологией – точка-точка, звезда, MESH (ячеистая сеть). Уникальной особенностью этих ZigBee-модулей является поддержка протокола DigiMesh, посредством которого появляется возможность построения сети со спящими ретрансляторами (роутерами). В сети DigiMesh нет координатора с выделенной ролью – каждый из узлов сети может взять его функции на себя. Прокладка и восстановление маршрутов в данной сети осуществляется автоматически. Подобное построение гарантирует прохождение информации при выходе из строя любого узла, так как в сети DigiMesh нет «слабого



Рис.4. Структурная схема работы БР АСКРО.

звена», отказ которого мог бы привести к полной неработоспособности системы.

Именно наличие ретранслятора в каждом модуле БР АСКРО выгодно отличает выбор данного вида связи от обычных радиоканалов, а работа БР АСКРО в условиях отдаленных местностей накладывает ограничение на использование сотовых сетей.

Логике работы БР АСКРО можно представить, как:

- сбор данных МАЭД с каждого модуля БР АСКРО посредством ZigBee-сети на Базовой станции, подключенной к ноутбуку по интерфейсу USB;

- отображение информации на ноутбуке в специализированных программных обеспечениях (рис. 5 и 6);
- передача данных из ноутбука по сотовым сетям (при наличии покрытия, в остальных случаях сохранение информации в локальных базах данных) в центры сбора на базе кризисных центров и отображение в специализированном программном обеспечении данных радиационного мониторинга (рис.6).

Опыт развития тяжелых аварий на ОИАЭ показывает, что аварии развиваются при существенной неопределенности прогнозов времени,

мощности выбросов и условий распространения радиоактивных веществ в окружающей среде [3-7].

Неопределенность времени выброса не позволяет точно оценить параметры распространения выбросов в атмосфере, таких как: направление ветра, скорость ветра, состояние устойчивости атмосферы.

В случае, если на объекте использования атомной энергии (ОИАЭ) возможны различные варианты развития аварии, также неопределенными являются параметры возможного выброса.

Кроме этого, в случае радиационных инцидентов, например, при транспор-

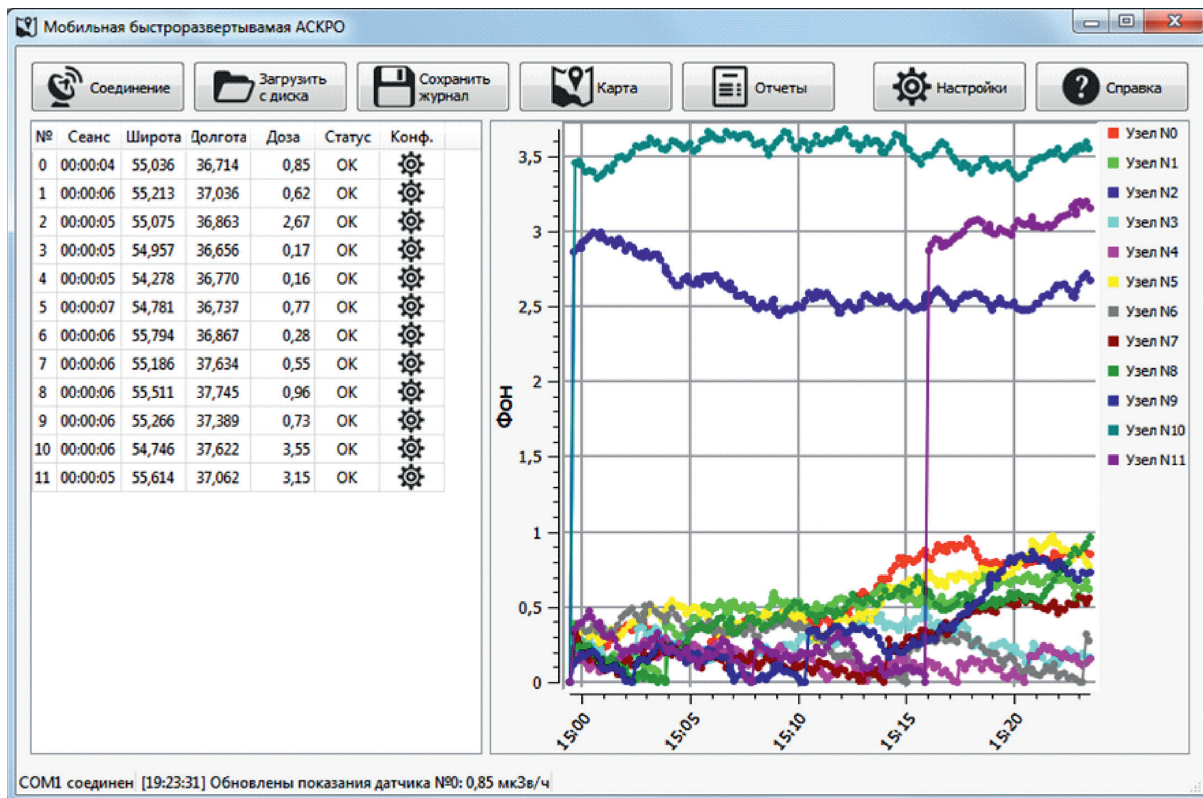


Рис.5. Специализированное программное обеспечение БР АСКРО по сбору данных.

тировке ОЯТ, время после инцидента, динамика и величина выбросов также часто могут иметь вероятностный характер.

В этих условиях поддержка решений применения мер по защите населения и территорий, включая применение БР АСКРО, без учета неопределенности условий развития аварии может оказаться недостаточно обоснованной.

Поэтому для увеличения эффективности применения БР АСКРО целесообразно использовать методологию вероятностного анализа безопасности ВАБ-3, учитывающую вероятностную природу аварийных выбросов и условий распространения РВ в окружающей среде.

Предлагается использовать следующую систему критериев «успеха» БР АСКРО.

K_{y1} – Критерий «успеха» отдельного модуля БР АСКРО предлагается определить как вероятность того, что при аварийном выбросе в атмосферу (или набора аварийных выбросов) с вероятностью реализации, равной 1,0, в районе поста создается мощность дозового функционала выше заданной величины.

K_{yc} – Критерий «успеха» системы модулей БР АСКРО предлагается определять как вероятность того, что хотя бы одним из модулей при аварийном выбросе в атмосферу (или набора аварийных выбросов) с вероятностью реализации, равной 1,0, создается мощность характер-

ного дозового функционала выше заданной величины.

Отметим, что в некоторых случаях может быть удобней рассматривать критерии «неуспеха» БР АСКРО K_n . При этом выполняется равенство:

$$K_n + K_y = 1. \quad (1)$$

Для наглядного представления эффективности систем АСКРО предлагается использовать интегральные и дифференциальные диаграммы успеха.

Интегральная угловая диаграмма успеха $Fi(\alpha)$ определяется как зависимость величины успеха системы АСКРО при увеличении азимутального угла от 0 до 360 градусов. При 360 градусах величина интегральной функции успеха численно равна K_{yc} .

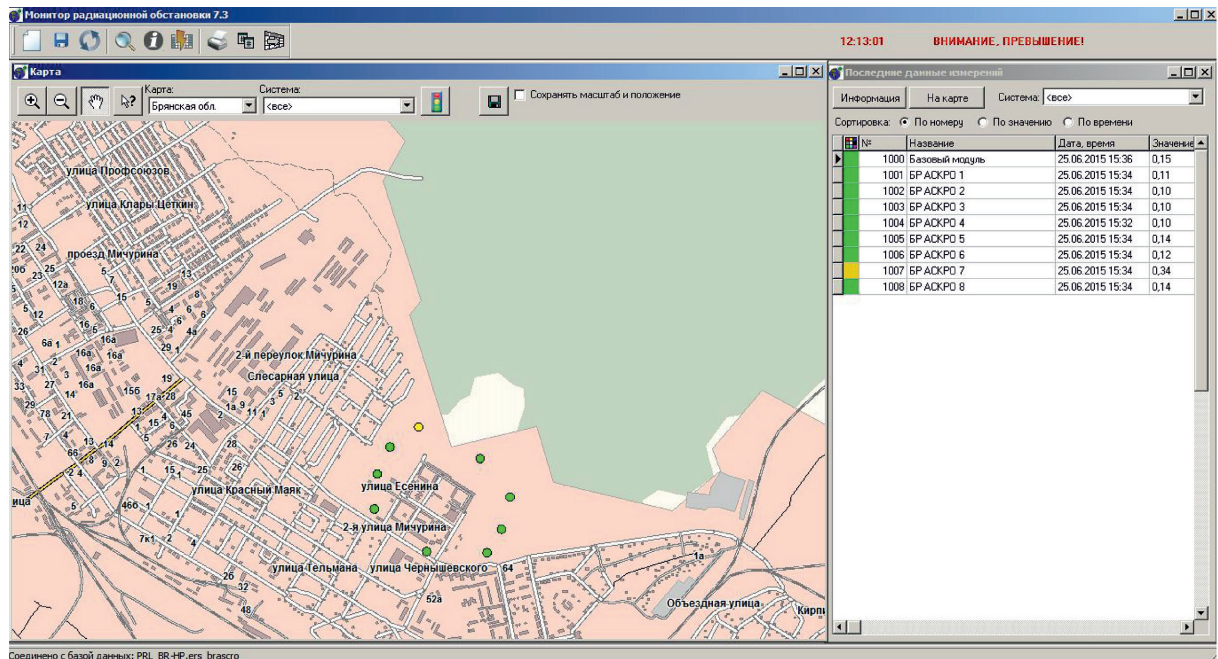


Рис.6. Специализированное программное обеспечение БР АСКРО по отображению данных с использованием ГИС-технологий.

Дифференциальная угловая диаграмма успеха $Fd(\alpha)$ определяется как:

$$Fd(\alpha) = dF_i(\alpha) / d\alpha, \quad (2)$$

где:

α – азимутальный угол;

$F_i(\alpha)$ – интегральная угловая функция успеха.

Чем больше угол наклона интегральной диаграммы и больше величина дифференциальной диаграммы «успеха», тем более эффективна система датчиков на этих азимутальных углах.

Для длительных выбросов РВ в атмосферу мощность дозы от облака имеет наибольшую прогностическую ценность с точки зрения дальнейшего роста мощности дозы излучения от выпадающих на поверхность РВ.

Для мгновенных выбросов РВ в атмосферу большей прогностической ценностью обладает мощность дозы излучения от поверхности земли в связи с коротким временем повышения мощности дозы от облака РВ.

В качестве характерной граничной величины превышения мощности дозы излучения над уровнем естественного фона принимается 0,2 мкЗв/ч. Данное превышение соответствует мощности дозы 0,3 мкЗв/ч, обычно принимаемой за предупредительный уровень АСКРО при среднем уровне естественного фона ~0,1 мкЗв/час [3].

Для оценки количественных характеристик критериев «успеха/неуспеха» БР АСКРО используется один из промежуточных результатов ВАБ-3 ОИАЭ – «Полная таблица аварийных ситуаций», которая, среди прочих, содержит для каждой из рассматриваемых «аварийных ситуаций» следующую информацию:

- вероятность «аварийной ситуации»;
- азимутальный угол направления ветра;
- величину дозовых функционалов в «характерных точках» в районе аварии.

Под «аварийной ситуацией» понимается весь комплекс существенных параметров аварии:

- характеристики источника выброса РВ (нуклидный состав, эффективная высота, время действия и т. д.);
- условия распространения РВ в атмосфере (азимутальный угол и скорость ветра, тип устойчивости атмосферы, интенсивность и тип осадков и т. д.).

В рассматриваемой задаче «характерными точками» являются места расположения модулей БР АСКРО.

Обработка полной таблицы аварийных ситуаций позволяет количественно оценить определенные ранее критерии «успеха» БР АСКРО с учетом вероятностной природы

условий развития аварии, а также построить угловые интегральные и дифференциальные диаграммы «успеха» для БР АСКРО, наглядно характеризующие зависимость эффективности системы датчиков на разных азимутальных углах направления ветра.

Для проведения модельных расчетных оценок использовались характеристики выброса при гипотетической транспортной аварии с ОЯТ [8].

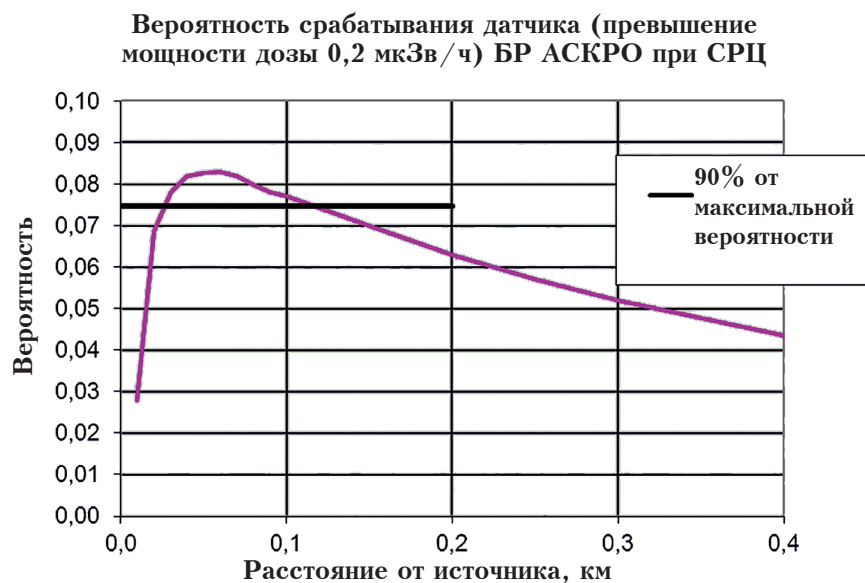
Предполагается, что авария произошла в безлюдной местности с климатическими условиями, характерными для Челябинской области, вне зоны действия стационарных АСКРО, и планируется применение БР АСКРО для оперативного создания системы контроля радиационной обстановки в месте аварии.

В качестве характерного дозового функционала использовалась мощность дозы излучения от выпадений РВ на поверхность земли.

Для оценки эффективности БР АСКРО при транспортной аварии вне стационарных АСКРО использовались диаграммы «успеха».

Вероятность аварийного выброса принималась равной 1.

Для определения вероятностных распределений метеорологических параметров использовались данные архивов четырех срочных наблюдений с базовых метео-

**Рис. 7.**

$K_{у1}$ – критерий «успеха» отдельного модуля БР АСКРО в зависимости от расстояния от места аварии (при осредненной по направлению ветра круговой розе ветров).

станций с сайта <http://meteo.infospace.ru> [9], которые позволяют провести обработку метеонаблюдений для построения зависимостей вероятности реализации сочетаний скорости ветра и состояния устойчивости атмосферы для различных направлений ветра. Данные метеонаблюдений были обработаны с учетом рекомендаций Паскуила-Гиффорда по определению класса устойчивости атмосферы [10].

Для расчета пространственного распределения дозовых функционалов при аварийных выбросах в атмосферу использовалась методика нормативно-технического документа [11].

Предполагалось, что авария произошла в безлюдной местности, поэтому модули БР АСКРО размещаются равномерно по азимуту от

места аварии на одинаковых расстояниях. Эффективность БР АСКРО оценивалась для разного количества модулей и для разных расстояний размещения модулей от места выброса.

Ниже приведены основные результаты оценки эффективности разворачивания БР АСКРО из 8 пунктов при транспортной аварии с ОЯТ. Также была проведена оценка эффективности БР АСКРО в зависимости от изменения количества модулей.

На рис.7 приведены критерии «успеха» $K_{у1}$ отдельного поста БР АСКРО в зависимости от расстояния от места аварии при осредненной по румбам круговой розе ветров. Приведенный результат можно оценить как эффективность отдельного модуля БР АСКРО в зависимости от расстояния. Максималь-

ное значение $K_{у1}$ достигается на расстоянии 0,6 км от места выброса при 90% «окне возможностей» от 250 до 1100 м.

На рис.8 приведены вероятностные распределения мощности дозы от загрязнения поверхности земли РВ в местах расположения модулей БР АСКРО на расстоянии 0,6 км от источника для различных румбов. Как видно из рис.8, эффективность датчиков может отличаться в несколько раз на различных азимутальных углах.

На рис.9 приведены интегральные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО для критериев $K_{уac}$ при установке модулей на разном расстоянии от источника.

На рис.10 приведены интегральные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО для критериев $K_{уac}$ для 8, 13, 16 и 20 модулей, установлен-

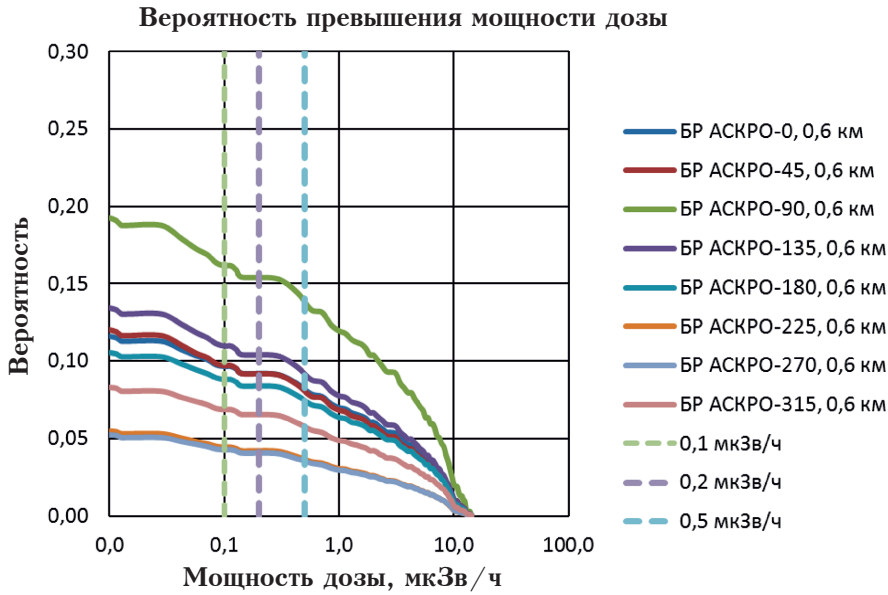


Рис. 8.
Вероятностное распределение мощности дозы от загрязнения поверхности земли РВ в местах расположения модулей БР АСКРО на расстоянии 0,6 км от источника для различных румбов.

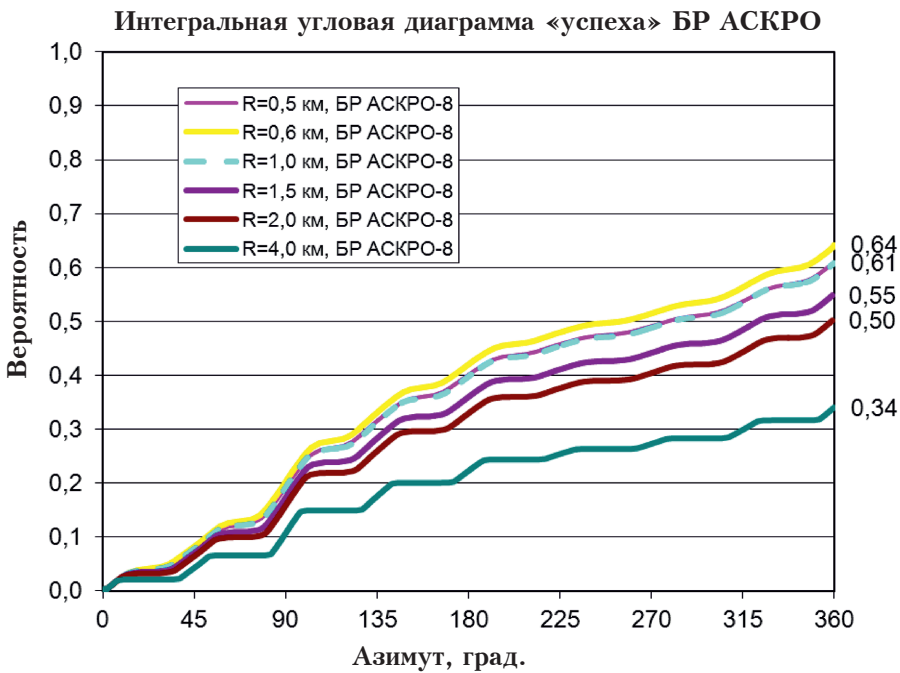


Рис. 9.
Интегральные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО для критериев $K_{уС}$ для восьми модулей, установленных на разных расстояниях от источника.

Интегральная угловая диаграмма «успеха» БР АСКРО

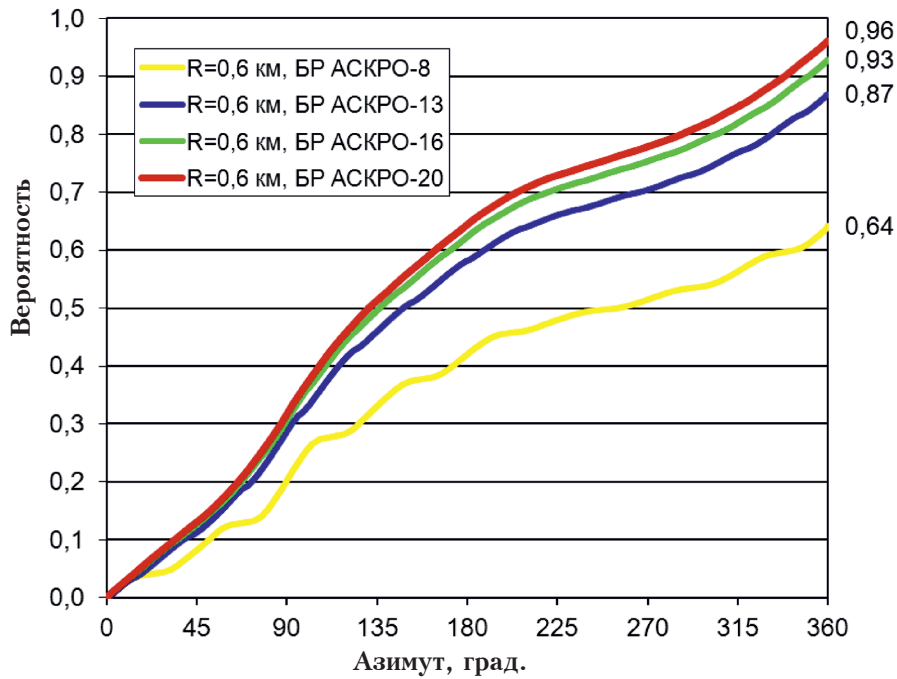


Рис.10. Интегральные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО для критериев $K_{уС}$ для 8, 13, 16 и 20 модулей, установленных на 0,6 км от источника.

Дифференциальная угловая диаграмма «успеха» БР АСКРО

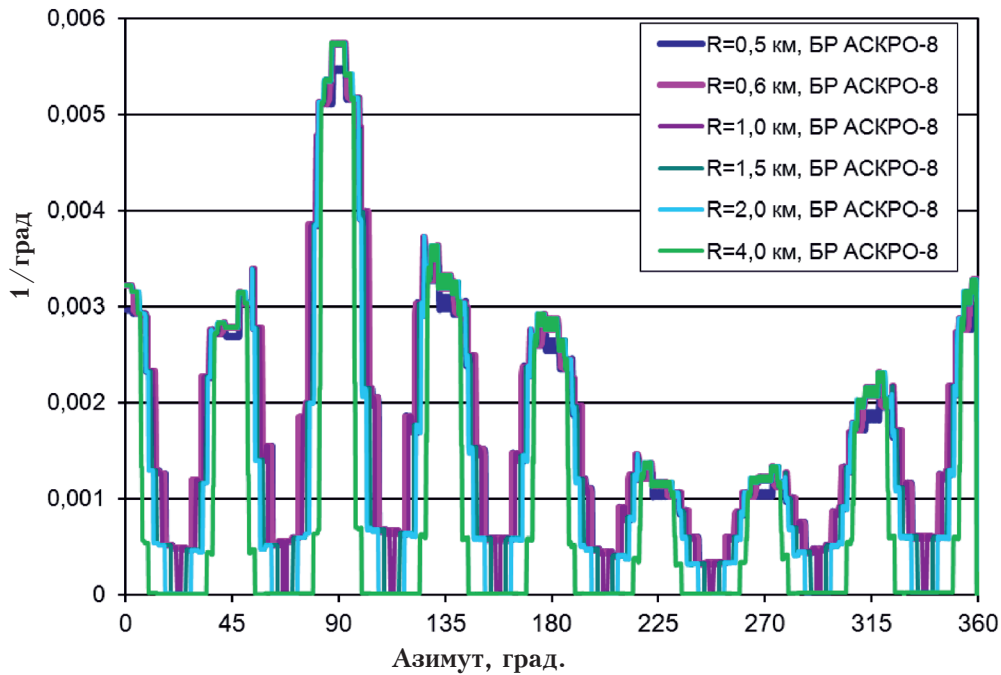


Рис.11. Дифференциальные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО из 8 модулей для критериев $K_{уС}$ для разных расстояний расстановки модулей от источника.

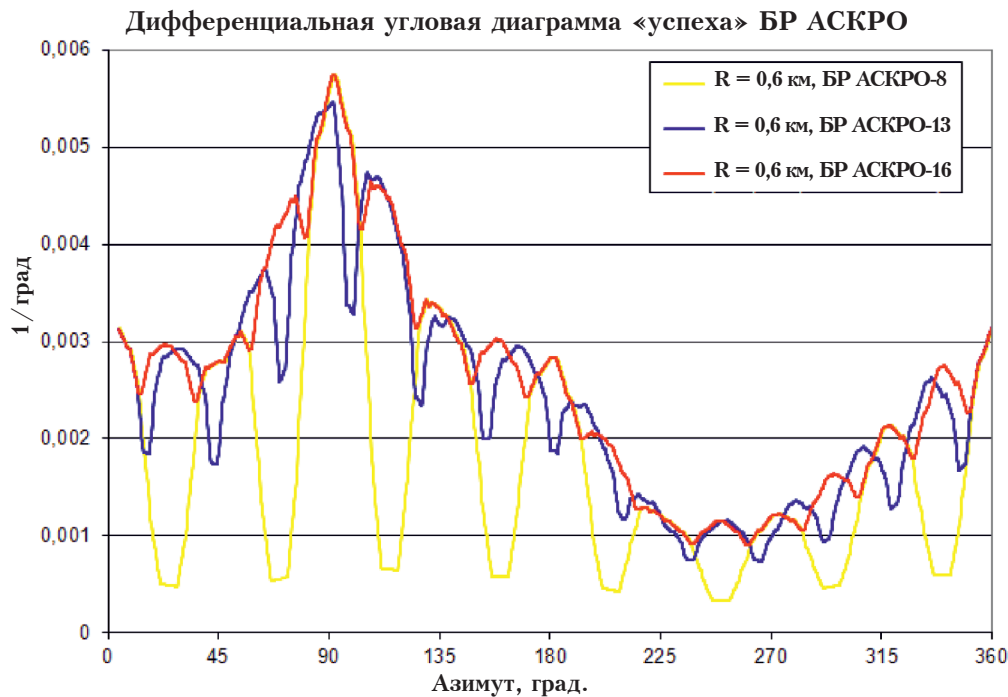


Рис.12.
Дифференциальные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО для критериев $K_{уac}$ при разном количестве модулей БР АСКРО 8, 13, 16.

ных на расстоянии 0,6 км от источника.

На рис.11 приведены дифференциальные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО для критериев $K_{уac}$ для разных расстояний расстановки модулей от источника.

На рис.12 приведены дифференциальные угловые диаграммы «успеха» БР АСКРО для критериев $K_{уac}$ при разном количестве модулей БР АСКРО.

Из приведенных результатов можно сделать выводы, что развертывание БР АСКРО из 8 модулей при модельной аварии позволяет:

- добиться величины «успеха» БР АСКРО по критерию $K_{уac}$ (превышение 0,2 мкЗв/ч дополнительно к естественному фону мощности дозы от загрязнения

поверхности земли РВ хотя бы на одном посту) до ~65% при расстоянии установки модулей ~600 м от источника;

- «окно возможности» 90% от максимума эффективности БР АСКРО составляет от 250 до 1100 м.
- при увеличении количества модулей до 13 величина «успеха» достигает 87%, при 16 постах – 93% (при размещении на оптимальном расстоянии ~600 м равномерно по азимуту от источника);
- предложенная методика использования промежуточных результатов методологии ВАБ-3 ОИАЭ для количественной оценки функциональных возможностей и оптимизации БР АСКРО позволяет с учетом неопределенности времени ава-

рийного выброса и условий распространения РВ в атмосфере на момент выброса:

- количественно оценить эффективность отдельного модуля БР АСКРО в зависимости от расстояния до источника выбросов;
- определить «окно возможности» для расстояния установки датчиков с заданным отступлением от оптимума;
- количественно оценить вероятность «успеха» БР АСКРО при различных вариантах размещения модулей;
- выбрать наиболее оптимальные расстояния установки модулей БР АСКРО от места аварии;
- оценить зависимость эффективности БР АСКРО от числа модулей;

- оценить наиболее проблемные азимутальные сектора БР АСКРО.
- Аналогичный подход использования методологического аппарата ВАБ-3 ОИАЭ для оценки вероятностных распределений дозовых функционалов на территории в случае аварии может быть использован для решения следующих задач:
 - оценка эффективности и оптимизации размещения постов стационарных объектов АСКРО;
 - оценка эффективности и оптимизации усиления существующих стационарных АСКРО за счет дополни-
- тельных стационарных постов наблюдения;
- оценка эффективности и оптимизации усиления существующих стационарных АСКРО за счет размещения модулей БР АСКРО на местности в режиме повышенной готовности.

Литература

1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Контроль радиационной безопасности. Общие требования. Методические указания МУ 2.6.1.14-2001.
2. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население (РБ-053-10). Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 июня 2010 г. С. 465.
3. Арутюнян Р.В., Воронов С.И., Камышанский М.И., Кучеренко С.В., Пантелеев В.А., Перовицкий В.Я. Радиационная безопасность населения: Основы организации и обеспечения. М.: Институт риска и безопасности, 2011. 384 с.
4. Российский национальный доклад «25 лет Чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986-2011 гг.». МЧС России. М., 2011.
5. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Припачкин Д.А., Семенов В.Н., Сороковикова О.С., Фокин А.Л., Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Смирнова М.М. Оценка выброса радионуклидов при аварии на АЭС Фукусима-1 (Япония). 15 марта 2011 // Атомная энергия. Т.112, вып.3, март 2012. С. 159-163.
6. Арутюнян Р.В., Пантелеев В.А., Сегаль М.Д., Чернов С.Ю. О значимости разработки методологического аппарата вероятностного анализа безопасности третьего уровня (ВАБ-3) для объектов использования атомной энергии // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2015. №2. С. 91-99.
7. Арутюнян Р.В., Пантелеев В.А., Сегаль М.Д. Состояние разработки вероятностного анализа безопасности третьего уровня (ВАБ-3) для объектов использования атомной энергии // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. №2. С. 49-57.
8. R. Bakin, E. Mitenkora, N. Novikov, A. Shickin. Assessment of the Probability of Initiating a Spontaneous Chain Reaction Within a Metallic-Concrete Transportation Cask: Case of Temporary Storage of Vessel Spent Nuclear Fuel of the Russian Navy, in A.A. Sarkisov and L.G. La Sage (eds.), Remaining Issues in the Decommissioning of Nuclear Powered Vessels. 2003, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. P. 301-305.
9. Данные из архива погодных условий: <http://meteo.infospace.ru>.
10. Aloha 5.4.2. User Manual, 2008.
11. Нормативно-технический документ 38.220.56-84 МХО «Интератомэнерго». Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения населения. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Optimization of a Rapidly Deployable Automated Radiation Monitoring System Modules Placement Using Methods of the Probabilistic Safety Analysis of the Third Level (PSA Level 3) for the Nuclear Facility

Panteleev Vladimir, Segal Mikhael, Gavrilov Sergey, Pimenov Artem, Popov Eugeny
(Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia);
Martynyuk Yuriy (Scientific Production Company «Doza», Ltd, Zelenograd, Russia)

Abstract. The article describes the goals, tasks and general solutions of a rapidly deployable automated radiation monitoring system (RD RMS). The article provides a method for evaluating and optimizing the functionality of the RD RMS system when placed on the terrain, taking into account the probabilistic characteristics of accidental releases and the conditions for the spread of radioactive substances in the environment, using probabilistic safety analysis of the third level methods for nuclear facilities (PSA Level 3).

Key words: radioactive substance, accident, safety, radiation, monitoring, RD RMS, RMS, emergency situation, PSA Level 3, probabilistic safety analysis, risk, nuclear facility.

В.А.Пантелеев (к.ф.-м.н., с.н.с.), М.Д.Сегаль (д.т.н., в.н.с.), С.Л.Гаврилов (зав.отд.),
А.Е.Пименов (н.с.), Е.В.Попов (доц., к.т.н., зав.лаб.) – Институт проблем безопасного
развития атомной энергетики РАН, г. Москва.

Ю.Н.Мартынюк (к.ф.-м.н., гл.констр.) – НПП «Доза», г. Зеленоград.

Контакты: тел: +7 (499) 955-22-14; e-mail: bob_rsi@mail.ru.