

УДК 614.8; 502.36

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2018

Комплексная оценка риска возникновения аварии на опасных производственных объектах на основе аппарата нечетких множеств и логико-вероятностного подхода

**А. В. Рыбаков,
А. Д. Сорокин,
В. В. Кочетков,**

Академия гражданской защиты
МЧС России,
г. Химки

Е. В. Арефьева,
ФГБУ ВНИИ ГОЧС МЧС России,
г. Москва

Аннотация

В статье изложен алгоритм, позволяющий комплексно оценивать риск возникновения аварии и состояние объекта по совокупности показателей мониторинга. Предлагаемый подход позволяет выявить совместное действие опасных факторов, которые могут быть обнаружены на объекте, учесть отклонения всех контролируемых показателей, а также отклонения в пределах, близких к допустимым. Возможно учитывать показания значительного числа датчиков. В автоматизированном режиме алгоритм может быть применим для обработки большого количества наблюдаемых параметров, установленных на технологическом оборудовании и конструктивных элементах объекта.

Ключевые слова: комплексный показатель мониторинга, риск аварии, опасный производственный объект, безопасность, нечеткие множества, логико-возможностное моделирование.

Содержание

Введение
1. Постановка задачи
2. Решение задачи
3. Пример
Заключение
Литература

Введение

Существуют два основных пути обеспечения безопасности на опасных производственных объектах. Во-первых, это предотвращение нарушений нормальных режимов функционирования производственного процесса, эксплуатации помещений. При этом предотвращение в широком смысле этого слова может означать принятие комплекса мер: обеспечение необходимой прочности изделий, безотказности работы элементов технологических схем, предупреждение разладок и разрегулировок, исключение нерасчетных режимов и эксплуатационных условий, защита от вредного воздействия внешних факторов и эксплуатационных нагрузок и, конечно, предотвращение отказов и сбоев в работе операторов. Во-вторых, предотвращение дальнейшего развития уже возникших

нарушений нормальных режимов функционирования, исключение случаев перерастания таких нарушений в аварийные и катастрофические ситуации. В свою очередь, предупреждение подобных ситуаций неразрывно связано с качественным проведением мониторинга состояний и базовых параметров объекта.

Как правило, количество используемого оборудования на опасных производственных объектах (далее — ОПО) очень велико, в связи с чем комплексный мониторинг правильности его работы для своевременного выявления предаварийной ситуации и, как следствие, безопасности всего объекта, представляется очень сложным процессом. Под мониторингом состояний и базовых параметров ОПО понимается мониторинг состояний опасного вещества, технологических систем, систем жизнеобеспечения, состояний систем безопасности ОПО на основе сигналов датчиков, установленных на объекте. Процесс обработки данных мониторинга и их анализа осложняется еще и тем, что различные датчики, обеспечивающие мониторинг работы отдельных узлов объекта, имеют разные единицы измерения и градацию шкал опасного и безопасного функционирования, разную чувствительность к изменению ситуации, что затрудняет своевременное выявление предаварийных ситуаций.

Существующие на данный момент подходы к оценке состояния ОПО и систем, обеспечивающих безопасность, схожи между собой тем, что рассматривают объект отдельно по каждому дестабилизирующему фактору. По этой причине нет возможности в короткие сроки оперативно получать полную картину состояния объекта в каждый отдельный момент времени, а также оперативно получать прогноз возможных последствий и аварийных ситуаций (в т. ч. с визуальным моделированием) и выработкой управленческих решений по парированию возможных угрожающих ситуаций. Как показывает анализ ЧС техногенного характера на ОПО [1], развитие аварийной ситуации может быть спровоцировано отклонением не только одного контролируемого показателя, но и отклонениями в допустимых пределах совокупности наблюдаемых параметров.

Таким образом, к аварийной ситуации (особенно при значительном износе оборудования) может

привести состояние, характеризующееся значениями измеряемых параметров, каждый из которых находится близко к критическим значениям, но в пределах нормы (поэтому и не отражается на приборах как опасный сигнал).

Отсюда возникает задача: разработать комплексный показатель мониторинга состояния ОПО (по ключевым показателям), который позволил бы учесть показания всех наблюдаемых параметров не в отдельности по каждому, а в совместном рассмотрении и влиянии каждого (с весовым коэффициентом) на безопасное состояние объекта, технологическое оборудование и производственный процесс.

1. Постановка задачи

Пусть S — множество датчиков в системе мониторинга ОПО, измеряющих разные величины, а SS — комплексный показатель мониторинга, объединяющий в одном показателе все показания со всех типов датчиков (датчики, которые измеряют как одинаковые, так и разные физические параметры).

Каждый тип датчика S_i отображает показатель измеряемой им величины в пределах определенного множества значений,

$$V^i = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_p^i, a_{l+1}^i, a_{l+2}^i, \dots, a_m^i, a_{m+1}^i, a_{m+2}^i, \dots, a_n^i\}.$$

Каждое из данных значений является элементом одного из трех множеств состояний измеряемой величины: штатное —

$$S_i^N = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_p^i\},$$

предельное —

$$S_i^L = \{a_{l+1}^i, a_{l+2}^i, \dots, a_{l+m}^i\}$$

и критическое —

$$S_i^C = \{a_{m+1}^i, a_{m+2}^i, \dots, a_n^i\};$$

данные множества являются подмножествами множества состояний типов датчиков — S_i^{cond} .

Комплексный показатель мониторинга SS находится в пределах определенного множества значений,

$$V^{SS} = \{a_1^{SS}, a_2^{SS}, \dots, a_l^{SS}, a_{l+1}^{SS}, a_{l+2}^{SS}, \dots, a_m^{SS}, a_{m+1}^{SS}, a_{m+2}^{SS}, \dots, a_n^{SS}\}.$$

Каждое из данных значений является элементом одного из трех множеств состояний комплексного показателя мониторинга ОПО: штатное —

$$SS^N = \{a_1^{SS}, a_2^{SS}, \dots, a_m^{SS}\},$$

предельное —

$$SS^L = \{a_{l+1}^{SS}, a_{l+2}^{SS}, \dots, a_m^{SS}\}$$

и критическое —

$$SS^C = \{a_{m+1}^{SS}, a_{m+2}^{SS}, \dots, a_n^{SS}\}.$$

Для предупреждения возникновения чрезвычайной ситуации на опасном производственном объекте необходимо найти такие значения различных типов датчиков S_i^N , при которых комплексный показатель мониторинга SS находился бы в предельном SS^L или критичном состоянии SS^C (например, $S_i^N \cap S_{i+1}^N = S^L$, $S_i^N \cap S_{i+1}^N = S^C$).

2. Решение задачи

Для разработки комплексного показателя мониторинга возможно применение методов теории вероятностей путем построения многомерной функции распределения. Но такой подход имеет ряд существенных недостатков. Так, для построения функции распределения нужен значительный объем статистических данных о возможных причинах аварий и показаниях отклонений датчиков от штатного режима функционирования. Кроме этого, такие модели применимы для небольшого количества рассматриваемых датчиков (от 2 до 10). Зачастую статистические данные по техногенным ЧС отсутствуют, а если есть, то выборка незначительная и неоднородная, поэтому методы теории вероятностей становятся малоприменимыми для нахождения комплексного показателя мониторинга ОПО [2].

Другой подход основан на методах теории нечетких множеств и, в частности, теоретико-возможностном подходе [3, 4] для получения логической функции, значение которой будет описывать состояние объекта на основе автоматического перевода значений параметров мониторинга оборудования и объекта в соответствующие шкалы для выведения комплексного показателя.

Введем для каждого типа датчиков S_i лингвистическую переменную L_i . Термами T_i^{ii} данной лингви-

стической переменной L_i являются состояния датчиков: T_i^N (штатное), T_i^L (предельное) и T_i^C (критичное) для датчика S_i .

Функции принадлежности $\mu_i^{ii}(x)$ определяются по алгоритму, изложенному в работе [5]. Далее для каждого S_i^{cond} вычисляется степень принадлежности. Затем вычисляются общие значения a^{ii} для отсечения областей у функций принадлежности $\mu_i^{ii}(x)$ при помощи логико-возможностного подхода [6].

$$\begin{aligned} a^{ii} = & [\mu_i^{ii}(x) \wedge \mu_{i+1}^{ii}(x) \wedge \dots \wedge \mu_n^{ii}(x)] \vee \\ & \vee [\mu_i^{ii}(x) \wedge \mu_{i+1}^{ii}(x) \wedge \dots \wedge \mu_n^{ii}(x)] \vee \\ & \vee [\mu_i^{ii}(x) \wedge \mu_{i+1}^{ii}(x) \wedge \dots \wedge \mu_n^{ii}(x)], \end{aligned} \quad (1)$$

где x — значение, отображаемое S_i .

Как отмечалось выше, разные типы датчиков S_i отображают измеряемые ими значения в разных единицах и диапазонах значений. Для того чтобы сопоставлять значения S_i друг с другом, необходимо привести их показания к единому диапазону и единице измерения, т. е. нормировать их шкалу показаний.

Нормирование проводится посредством линейного преобразования:

$$y(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2)$$

где x — значение показателя, отображаемого датчиком S_i , а $x_{\min}$ и $x_{\max}$ — минимально и максимально возможные значения показаний датчика.

На следующем этапе вычисляются три минимальные функции $\mu_{\min}^{ii}(x)$ среди функций принадлежности $\mu_i^{ii}(x)$ для каждого состояния S_i .

$$\mu_{\min}^{ii}(x) = \min(\mu_i^{ii}(x), \mu_{i+1}^{ii}(x) \dots \mu_n^{ii}(x)). \quad (3)$$

После нахождения минимальных функций $\mu_{\min}^{ii}(x)$ у них «отрезаются» все области, значения которых больше a^{ii} . Получившиеся области значений объединяются на координатной плоскости в одну фигуру, у которой находится центр тяжести. По оси абсцисс размечается общая шкала для трех разных состояний S_i ; берутся минимальные значения диапазонов значений состояний S_i .

Значение центра тяжести проецируется на ось абсцисс, и таким образом определяется состояние,

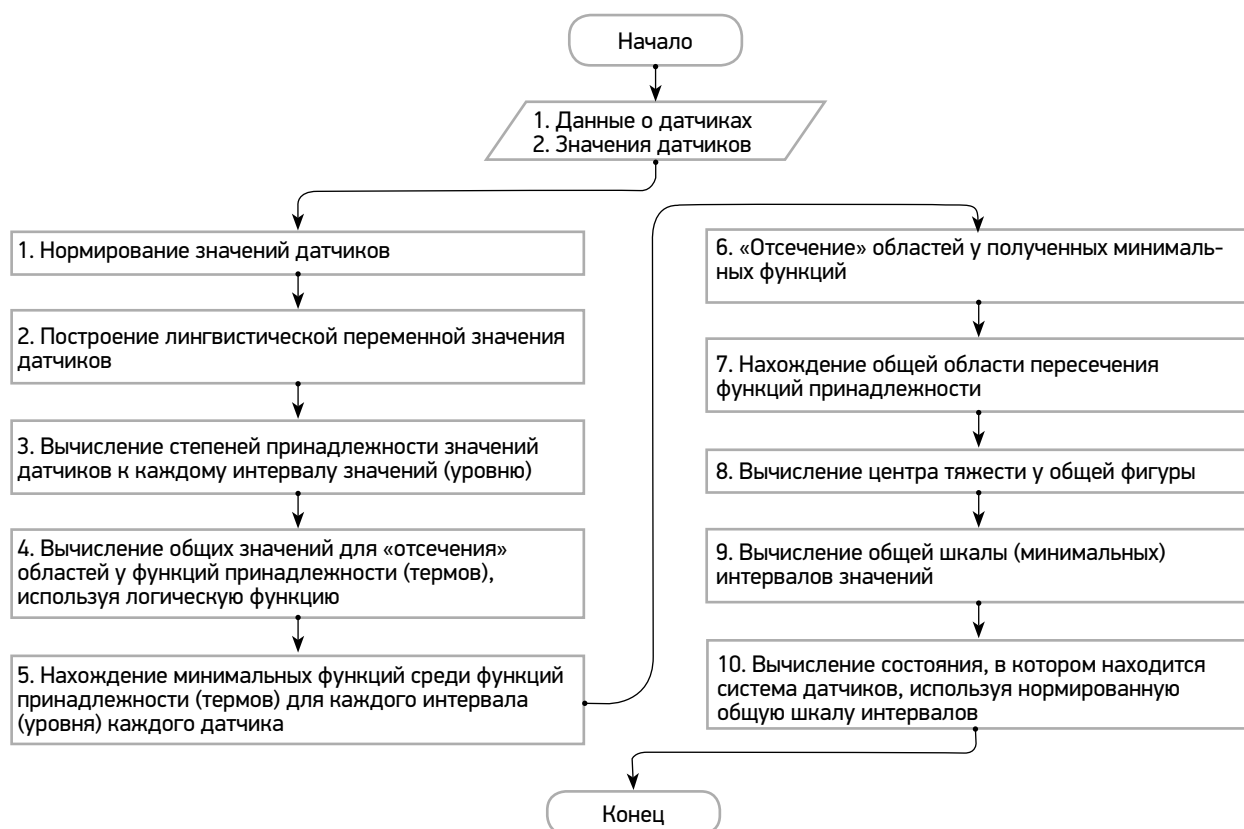


Рис. 1. Алгоритм определения комплексного показателя состояния ОПО

Входные данные

	Название	Знач.	Единицы измерения	Интервалы	Уровень
▶	Датчик температуры вещества в оборудовании и трубог	55,023	С	0..45..70..100	Предельный
	Стабилизатор напряжения	366,042	В	342..361..399..418	Предельный
	Датчик загазованности	1,1	%	0..1..3..5	Предельный
	Система мониторинга коррозии	0,09	мм/год	0..0,08..0,1..0,2	Предельный
	Датчик измерения вибрации. Виброскорость	58	мм/с	0..50..70..100	Предельный
	Датчик измерения вибрации. Виброускорение	45	мм/с ²	0,1..40..50..100	Предельный
*					

Моделировать показатели датчиков

v1.3.0.0

Рис. 2. Информация по типам датчиков



Рис. 3. Значение комплексного показателя мониторинга

которое соответствует состоянию системы мониторинга опасного производственного объекта, используя нормированную общую шкалу показаний. Это значение является комплексным показателем мониторинга.

Вышеописанные действия описаны в алгоритме, приведенном на рис. 1.

3. Пример

В качестве примера будет рассмотрен объект с шестью типами датчиков. На рис. 2 приведены названия типов датчиков, их показания, единицы измерения, интервалы значений и уровень (состояние), к которому сейчас принадлежит отображаемое значение (штатный, предельный или критичный).

Используя значения из рис. 2, вышеописанный алгоритм выдает значение комплексного показателя мониторинга, равное 0,52 (рис. 3). Данное значение находится в интервале критичных значений. Это означает, что весь объект мониторинга находится в критичном состоянии.

Рассмотрим более подробно вышеописанный алгоритм. Первым шагом в алгоритме является построение лингвистических переменных для каждого типа датчика. В качестве примера опишем данную переменную для датчика загазованности $L_{\text{заг}}$. $L_{\text{заг}} = \langle A, T, X, U \rangle$, где A — название лингвистической переменной: датчик загазованности, T — множество состояний данного типа датчика: $T_{\text{заг}}^N$ (штатное), $T_{\text{заг}}^L$ (предельное) и $T_{\text{заг}}^C$ (критичное), X — область определения (от 0 до 5), U — множество функций принадлежности:

$$\mu_{\text{заг}}^N(x) = \frac{1}{1 + e^{0,908(x-7,037)}}; \mu_{\text{заг}}^L = e^{\frac{-(x-17,70)^2}{0,461}};$$

$$\mu_{\text{заг}}^C(x) = \frac{1}{1 + e^{-2,139(x-23,89)}}.$$

Лингвистические переменные для остальных типов датчиков записываются аналогично, отличаться будут только названием лингвистической переменной и областью определения.

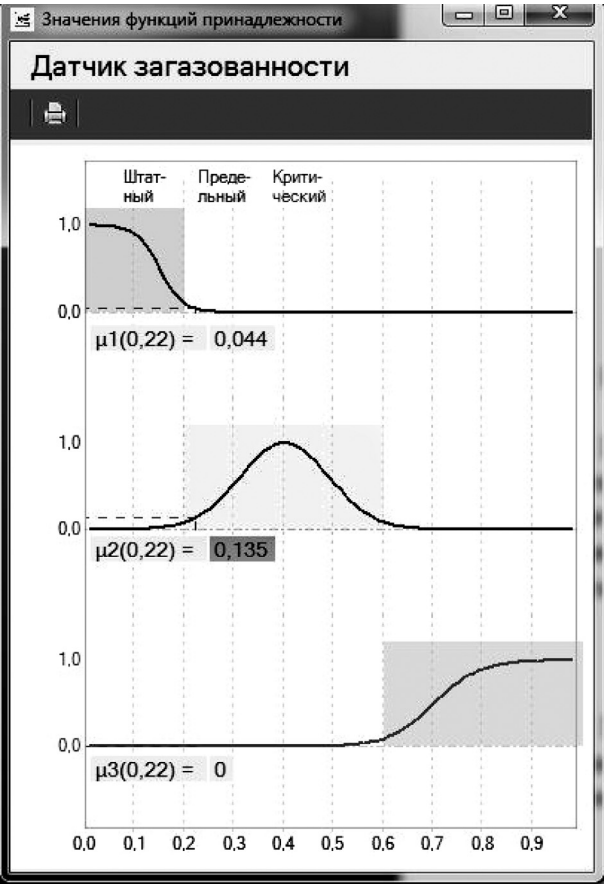


Рис. 4. Степень принадлежности показания датчика загазованности

После описания лингвистических переменных вычисляется степень принадлежности значений типов датчиков к каждому интервалу (состояний) датчика, причем ось абсцисс отображает значения в нормированном виде посредством линейного преобразования по формуле (2). На рис. 4 изображены графики функций принадлежности $L_{\text{заг}}$.
Следующим шагом вычисляются значения a^{ii} для «отсечения» областей у функций принадлежности $\mu_i^{ii}(x)$ с использованием логико-вероятностного подхода. Рассмотрим данный шаг для трех типов датчика: температуры, загазованности и вибрации. Значения функций принадлежности для данных типов датчиков отображены в табл. 1.
Далее вычисляется a^N по формуле (1), а промежуточный этап вычисления отображен в табл. 2.

Значения функций принадлежности для датчиков температуры, загазованности и вибрации

Таблица 1

Датчик	$\mu^N(x)$	$\mu^L(x)$	$\mu^C(x)$
Температуры	0,015	0,947	0,002
Загазованности	0,044	0,135	0
Вибрации	0,027	0,923	0,004

Промежуточный этап вычисления a^N

Таблица 2

$\mu_{\text{тем}}^N$	$\mu_{\text{заг}}^N$	$\mu_{\text{вибр}}^N$	$\min(\mu_i^N)$
0,015	0,044	0,027	0,015
0,015	0,044	0,973	0,015
0,015	0,956	0,027	0,015
0,015	0,956	0,973	0,015
0,985	0,044	0,027	0,027
0,985	0,044	0,973	0,044
0,985	0,956	0,027	0,027

Значения a^{ii}

Таблица 3

Количество датчиков	a^N	a^L	a^C
Три	0,044	0,865	0,004
Шесть	0,044	0,752	0,045

В первой строке записаны значения функций принадлежности к нормальному состоянию ($\mu_i^N(x)$). Следующие строки записываются с инверсией для каждого значения, перебираются все возможные варианты, за исключением инверсий всех значений в одной строке. Так, во второй строке вместо $\mu_{\text{вибр}}^N(x)$ записана инверсия $\mu_{\text{вибр}}^N(x)$ (вместо 0,027 записано 0,973). После нахождения минимумов всех строк (последний столбец) вычисляется a^N . Для этого находится максимальное значение из последнего столбца, $a^N = 0,044$.
Значения a^{ii} для трех типов датчиков (табл. 1) и шести типов датчиков (рис. 2) приведены в табл. 3.
После нахождения a^{ii} вычисляются три минимальные функции $\mu_{\min}^{ii}(x)$ среди функций принадлежности $\mu_i^{ii}(x)$ для каждого состояния S_i по фор-

муле (3). Затем у $\mu_{\min}^{ii}(x)$ «отсекаются» все области, значения которых больше a^{ii} . Получившиеся области значений объединяются на координатной плоскости в одну фигуру, у которой находится центр тяжести.

Перед нахождением центра тяжести необходимо преобразовать получившуюся фигуру в многоугольник. Для этого производится дискретизация с шагом 0,01, после чего получается многоугольник, который содержит 102 вершины. Данное число вершин позволяет получить многоугольник, достаточно приближенный к оригинальной фигуре. У получившегося многоугольника, определенного n вершинами $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})$, центром тяжести является точка (C_x, C_y) [7], где

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i);$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i);$$

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i).$$

По оси абсцисс размечается общая шкала для трех разных состояний S_p , берутся минимальные значения диапазонов значений состояний S_i . Например, у $S_{\text{темп}}$ диапазоном нормальных значений является диапазон в пределах от 0 до 45, а для $S_{\text{заг}}$ — от 0 до 1 (рис. 2). Нормированный диапазон значений для $S_{\text{темп}}$ — от 0 до 0,45, для $S_{\text{заг}}$ — от 0 до 0,2. Тогда интервал нормального диапазона на общей шкале будет от 0 до 0,2.

Комплексный показатель мониторинга состояния ОПО вычисляется проецированием на ось абсцисс значения центра тяжести (рис. 2).

Заключение

Таким образом, нахождение комплексного показателя систем мониторинга ОПО по вышеописанному алгоритму позволит комплексно оценить риск возникновения аварии, кроме этого:

- выявить совместное действие опасных факторов, которые могут быть обнаружены на объекте,

комплексно оценивать показания различных датчиков, что позволит заблаговременно принять меры и предотвратить развитие аварийной ситуации, спровоцированной совокупностью предопасных состояний;

- учесть отклонения всех контролируемых показателей, а также отклонения значений показателей в пределах, близких к допустимым;

- учитывать показания значительного числа датчиков с возможностью оперативной автоматизированной обработки большого количества наблюдаемых параметров, установленных на технологическом оборудовании и конструктивных элементах объекта.

Литература

1. Уроки, извлеченные из аварий [Электронный ресурс] // Ростехнадзор — URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (Дата обращения: 07.11.2016).
2. Королев В.Ю., Арефьева Е.В., Рыбаков А.В., Лазовский Р.А. Прогнозирование рисков техногенных чрезвычайных ситуаций на основе оценки вероятностей ущербов в результате чрезвычайных ситуаций, рассматриваемых как неоднородный поток экстремальных событий. // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 3. С. 73—78.
3. Рыбаков А.В., Арефьева Е.В. Модель комплексного состояния мониторинга состояния объектов нефтехранения // Нефтяное хозяйство, 2015. № 9. С. 116—120.
4. Соложенцев Е.Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2004. 432 с.
5. Леоненко А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
6. Матюшкин Д.И., Рыбаков А.В. О комплексном мониторинге состояния пожаровзрывоопасного объекта // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2014. № 4. С. 113—117.
7. Calculating the area and centroid of a polygon [Электронный ресурс] // Paul Bourke URL: <http://paulbourke.net/geometry/polygonmesh/> (Дата обращения: 07.11.2016).

Сведения об авторах

Рыбаков Анатолий Валерьевич: доктор технических наук, доцент Академии гражданской защиты МЧС России, начальник лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки РСЧС
Количество публикаций: 85

Область научных интересов: математическое моделирование сложных процессов, защита в чрезвычайных ситуациях

Контактная информация:

Адрес: 141435, г. Химки, ул. Соколовская, д. 1

Тел.: +7 (929) 631-34-95

E-mail: anatoll_rubakov@mail.ru

Сорокин Андрей Дмитриевич: оператор лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки РСЧС Академии гражданской защиты МЧС России

Количество публикаций: 2

Область научных интересов: оценка риска, управление качеством, безопасность в чрезвычайных ситуациях

Контактная информация:

Адрес: 141435, г. Химки, ул. Соколовская, д. 1

Тел.: +7 (916) 876-99-96

E-mail: dalwe@yandex.ru

Кочетков Виктор Вячеславович: оператор лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки РСЧС Академии гражданской защиты МЧС России

Количество публикаций: 1

Область научных интересов: оценка риска, информационные системы, безопасность в чрезвычайных ситуациях

Контактная информация:

Адрес: 141435, г. Химки, ул. Соколовская, д. 1

Тел.: +7 (915) 392-54-91

E-mail: victor.development@yandex.ru

Арефьева Елена Валентиновна: доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник НИЦ ФГБУ ВНИИ ГОЧС МЧС России

Количество публикаций: 95

Область научных интересов: анализ и оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций, математическое моделирование опасных природных процессов и их последствий

Контактная информация:

Адрес: 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7

Тел.: +7 (495) 400-90-11

E-mail: elaref@mail.ru